

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



UNIVERSITE ABDERRAHMANE  
MIRA – BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE  
ELECTRIQUE



Réf : .....

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue d'obtention du diplôme Master en Électrotechnique*

*Option : Commande Électrique.*

*Thème :*

*Étude et modélisation et simulation d'un  
convertisseur double pont actif monophasé  
pour application chargeur de batterie*

Présenté par :

**BOUHEDOU Hayet**

**TAKABAÏT Zahra**

Encadré par :

**M<sup>r</sup> GHEDAMSI Kaci**

**Soutenu le : 19/06/2023** Devant le jury composé de :

**Nom et Prénom**

**M<sup>r</sup> BOUTEBEL Mohamed**

**M<sup>r</sup> BABOURI Rabah**

**Prof**

**Prof**

**Univ. de Bejaia**

**Univ. de Bejaia**

**Président**

**Examineur**

*Promotion 2022-2023*

# Remerciement

*Nous remercions avant tous, **dieu** le tout puissant de nous avoir donné la patience, la volonté et la bravoure de finir ce travail à temps.*

*Nous remercions ainsi nos **familles** qui nous ont soutenus et encouragés durant ce long parcours.*

*Nous remercions vont également à notre encadreur **Mr. GHEDAMSI Kaci** pour son soutien et ses conseils judicieux.*

*Ainsi, nous exprimons notre profonde reconnaissance aux **membres de jury** d'avoir accepté d'examiner notre manuscrit et de soulever les critiques nécessaires afin d'enrichir nos connaissances et d'apporter un plus à notre travail, sans oublier de remercier tous les enseignants qui nous ont formé.*

*On remercie également les personnes qui nous soutiennent et nous encouragent de prêt ou de loin, à vous tous, sans vous nommer pour n'oublier personne, merci de votre présence et de vos aides si importantes.*

# *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A ma très chère Mère surtout, à mon cher Père et ma chère tante Karima, qui m'ont encouragé à aller de l'avant et Qui m'ont donné tout leur amour.*

*A mes Chers Frères Younes, Azzedine et Lounis.*

*A ma chère sœur Zakia.*

*A ma chère sœur Malia, son mari Djilali.*

*A mes neveux Razine et Assirem.*

*A ma tante Fatima.*

*A mon oncle Youcef, Arezki et Amer.*

*A toute la famille BOUHEDOU.*

*A ma chère binôme Zahra.*

*A mes chères amies Soussou, Fairouz, Celina.*

*A mon cher Ami Riyad.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Hayet*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à ma très chère **Mère** honorable, aimable. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études, à mon **Père** ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*A mes chères sœurs **Lydia**, **Selma**.*

*A ma chère sœur **Lamia** et à mon neveu **Messyelan**.*

*A mon cher frère **Fouad**.*

*A mes chères amis **Sylia**, **Soussou** et ma chère binôme **Hayet**.*

*A mes chers amis **Riyad**, **Yanis Laz**.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Zahra*

## Table des matières

Introduction générale	1
<b>Chapitre I. Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé</b>	<b>3</b>
I.1. Introduction	3
I.2. Convertisseur DC/DC	3
I.3. Convertisseurs DC/DC bidirectionnel	4
I.4. Convertisseur DAB monophasé	5
I.5. Convertisseur DAB à résonance série DC/DC	7
I.6. Convertisseur DAB à résonance série DC/DC à trois sources	7
I.7. Convertisseur DAB à double pont actif triphasé	8
I.8. Principe de fonctionnement d'un convertisseur DAB monophasé	9
I.9. Modèle de convertisseur DAB monophasé	10
I.10. Avantages du convertisseur DAB monophasé	11
I.11. Inconvénients du convertisseur DAB monophasé	11
I.12. Domaines d'application des convertisseurs DAB monophasé	11
I.13. Conclusion	11
<b>Chapitre II. Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé</b>	<b>12</b>
II.1. Introduction	12
II.2. Description du circuit	12
II.3. Modélisation de DAB monophasé	13
II.4. Modèle de simulation du DAB monophasé sous MATLAB/Simulink	15
II.4.a. Résultats de simulation	16
II.4.b. Interprétation des résultats	17
II.5. Contrôle du double pont actif	20
II.5.a. Contrôler le modèle DAB avec régulateur PI	20
II.6. Modèle DAB avec régulation sous MATLAB/Simulink	20

## Table des matières

II.6.a. Résultats de simulation	21
II.6.b. Interprétation des résultats	23
II.7. Conclusion	23
<b>Chapitre III. Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie</b>	<b>24</b>
III.1. Introduction	24
III.2. Chargeur de batterie	24
III.2.a. Types de chargeurs	24
III.2.b. Classification des chargeurs	24
III.2.c. Structures de chargeur	25
III.2.d. Chargeurs monophasés et triphasés	26
III.3. Redresseur	27
III.3.a. Description du redresseur monophasé	27
III.3.b. Applications des redresseurs	28
III.4. Commande modulation de largeur d'impulsion	28
III.4.a. Avantages de la commande modulation de largeur d'impulsion	28
III.5. Redresseur MLI	29
III.5.a. Différents types de redresseur MLI	29
III.5.b. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI	29
III.5.c. Redresseurs MLI à absorption sinusoïdale	29
III.6. Modélisation de redresseur actif	30
III.7. Contrôle du redresseur	31
III.7.a. Module de synchronisation	32
III.8. Modèle de simulation de redresseur MLI a absorption sinusoïdale	32
III.8.a. Résultats de simulation	35
III.8.b. Interprétation des résultats	37
III.9. Chargeur à double pont actif monophasé avec une charge résistive	37

## Table des matières

III.9.a. Modèle de simulation	37
III.9.b. Resultats de simulation	39
III.9.c. Interprétation des résultats	40
III.10. Chargeur à double pont actif monophasé avec une charge de batterie	40
III.10.a. Resultats de simulation	42
III.10.b. Interprétation des résultats	42
III.11. Conclusion	43
Conclusion générale	44

## **Bibliographie**

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 : Schéma synoptique de convertisseur DC/DC.....	3
Figure I.2 : Différents topologies de convertisseur DC/DC .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure I.3 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur un demi-pont alimenté en tension et un pont complet alimenté en tension .....	6
Figure I.4 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur deux demi- ponts alimentés en tension.....	6
Figure I.5 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur deux ponts complets alimentés en tension.....	6
Figure I.6 : Convertisseur DC/DC à résonance série.....	7
Figure I.7 : Convertisseur DC/DC à trois sources avec une topologie DAB à résonance série.	8
Figure I.8 : Topologie du convertisseur DAB triphasé.....	8
Figure I.9 : Topologie de la structure DAB.....	9
Figure I.10 : Formes d’ondes dans le transformateur du DAB. ....	10
Figure I.11 : Modèle DAB sans pertes. ....	10

### Chapitre II

Figure II.1 : Topologie d’un convertisseur DC/DC monophasé .....	13
Figure II.2 : Schéma du DAB monophasé sous MATLAB/Simulink .....	15
Figure II.3 : Tension aux bornes de la charge R. ....	16
Figure II.4 : Tension d’entrée et de sortie du DAB monophasé. ....	16
Figure II.5 : Tension aux bornes de l’inductance.....	16
Figure II.6 : Courant de l’inductance de DAB monophasé.....	17
Figure II.7 : Modèle du gyrateur moyen du DAB.....	19
Figure II.8 : Schéma de contrôle de DAB monophasé .....	20
Figure II.9 : Modèle DAB monophasé avec régulation sous MATLAB/Simulink. ....	21
Figure II.10 : Tension aux bornes de la charge R. ....	21
Figure II.11 : Tension d’entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l’inductance. ....	22
Figure II.12 : Tension d’entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l’inductance a l’instant $t= 0$ à $t= 0.1$ . ....	22

Figure II.13 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance a l'instant $t= 0.1$ à $t= 0.2$ .....	22
Figure II.14 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance a l'instant $t= 0.2$ à $t= 0.3$ .....	23

### Chapitre III

Figure III.1 : Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur.....	25
Figure III.2 : Circuits bidirectionnels de base.....	26
Figure III.3 : Schéma de redresseur monophasé.....	27
Figure III.4 : Schéma de redresseur MLI monophasé.....	29
Figure III.5 : Modèle du redresseur.....	31
Figure III.6 : Synoptique de contrôleur du redresseur.....	31
Figure III.7 : Synoptique de la PLL.....	32
Figure III.8 : Schéma MATLAB/Simulink du redresseur.....	33
Figure III.9 : Schéma MATLAB/Simulink du PWM.....	33
Figure III.10 : Schéma MATLAB/Simulink du la PLL.....	34
Figure III.11 : Schéma MATLAB/Simulink du contrôle de redresseur.....	34
Figure III.12 : Allure de la tension et le courant d'entrée de redresseur.....	35
Figure III.13 : Allure de la tension présente aux bornes de la charge.....	36
Figure III.14 : Résultats de simulation de la PLL.....	36
Figure III.15 : Chargeur à double pont actif monophasé.....	37
Figure III.16 : Schéma chargeur à double pont actif monophasé sous MATLAB/Simulink... ..	38
Figure III.17 : Allure de la tension et le courant d'entrée.....	39
Figure III.18 : Allure de la tension de sortie du redresseur.....	39
Figure III.19 : Allure de la tension présente aux bornes de la charge.....	40
Figure III.20 : Schéma chargeur à double pont actif monophasé avec une charge de batterie sous MATLAB/Simulink.....	41
Figure III.21 : Résultats de simulation aux bornes de la batterie.....	42

### Liste les tableaux

Tableau 1 : Paramètres de simulation de DAB monophasé. ....	15
Tableau 2 : Paramètres de simulation de Redresseur MLI. ....	35
Tableau 3 : Paramètres de simulation chargeur à DAB monophasé.....	38
Tableau 4 : Paramètres de simulation de la batterie. ....	41

### Liste des abréviations

<b>AC</b>	Alternatif Current
<b>BT</b>	Basse tension
<b>CF</b>	Current fed
<b>DAB</b>	Duel active bridge
<b>DC</b>	Courant continue
<b>GTO</b>	Gate turn – Off
<b>HF</b>	Haut fréquence
<b>IGBT</b>	Insulated gate bipolar transistor
<b>MLI</b>	Modulation en l'largeur d'impulsion
<b>PI</b>	Proportionnel-intégral
<b>PLL</b>	Phase-locked loop
<b>RCD</b>	Dispositif a courant résiduel
<b>SOC</b>	State of charge
<b>THD</b>	Total harmonic distortion
<b>VF</b>	Voltag fed
<b>ZCS</b>	Zero Current switching
<b>ZVS</b>	Zero voltage switching

## Liste des symboles et des notations

### Liste des symboles et des notations

$L_s$	L'inductance de côté réseau
$V_p$	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
$i_{c1}$	Le courant du condensateur C1
$i_{c2}$	Le courant du condensateur C2
$v_1$	La tension d'entrée DAB
$v_2$	La tension de sortie DAB
$v_{A1A2}$	La tension aux bornes A1, A2
$v_{B1B2}$	La tension aux bornes B1, B2
$v_{D1D2}$	Tension aux bornes D1, D2
$v_s$	La tension côté réseau
$C1$	La capacité du côté de l'entrée
$C2$	La capacité du côté sortie
$K_i$	Gain intégral
$K_p$	Gain proportionnel
$L$	L'inductance de transformateur

## Liste des symboles et des notations

<b>p</b>	La Puissance moyenne
<b>R</b>	La résistance
<b>f</b>	La fréquence
<b>n</b>	Rapport de transformateur
$\varphi$	Le déphasage

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Le convertisseur de puissance est un composant essentiel qui permet de transformer et d'adapter l'énergie électrique en fonction des besoins spécifiques des appareils et des systèmes, ce qui contribue à une utilisation plus efficace et plus sûre de l'énergie électrique.

Ils peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur fonctionnement : les convertisseurs DC-DC (courant continu vers courant continu), les convertisseurs DC-CA (courant continu vers courant alternatif), les convertisseurs AC-DC (courant alternatif vers courant continu) et les convertisseurs AC-AC (courant alternatif vers courant alternatif).

Le convertisseur double pont actif est largement apprécié par les chercheurs depuis environ vingt ans en raison de ses performances élevées et de ses nombreux avantages. Parmi ces avantages, on peut noter tout d'abord son rendement élevé, sa capacité de commutation douce et l'isolation galvanique. Les topologies DAB conviennent particulièrement bien au transfert bidirectionnel d'énergie DC-DC, lorsque l'isolation est nécessaire.

Les topologies DAB présentent également l'avantage d'une capacité de commutation à tension nulle (ZVS), ce qui permet de réduire les pertes d'énergie liées à la commutation. De plus, elles offrent un fonctionnement de type "buck-boost", ce qui signifie qu'elles peuvent augmenter ou réduire la tension d'entrée en fonction des besoins de la charge. Les topologies DAB résonantes nécessitent une prise en compte supplémentaire du réservoir résonant. En revanche, les topologies DAB non résonantes offrent une structure et un contrôle plus simples.

Il existe plusieurs solutions pour limiter les effets des courants harmoniques dans les réseaux électriques. L'un de ces solutions consiste à utiliser des dispositifs à absorption sinusoïdale de courant tel que le redresseur à Modulation de largeur d'Impulsion qui permet une compensation des harmoniques et un contrôle précis de la puissance électrique ce qui conduit à une amélioration du facteur de puissance en ligne.

Dans la commande de redresseur MLI, la synchronisation avec le réseau électrique est un aspect crucial à prendre en compte pour le contrôle efficace d'un tel convertisseur connecté au réseau. Les systèmes de génération d'énergie électrique tels que les chargeurs de batterie, la synchronisation avec le réseau est essentielle pour garantir un transfert d'énergie efficace et sécurisé. La PLL est une technique de synchronisation couramment utilisée pour assurer une

## Introduction générale

synchronisation précise entre un signal de référence et un signal d'entrée dans les dispositifs connectés au réseau électrique.

Afin de garantir une régulation précise des boucles de courant et tension on a utilisé le régulateur Proportionnel-Intégral (PI), ce choix a été motivé par la nécessité d'obtenir des réponses précises et stables dans la régulation des grandeurs électrique. Il s'agit d'un contrôleur proportionnel intégral pour la tension et une commande proportionnelle pour le courant.

L'objectif principal de notre mémoire est d'étudier en profondeur un convertisseur DAB monophasé et de l'appliquer spécifiquement au chargeur de batterie.

Ce mémoire constitue de trois chapitres :

Le premier chapitre intitulé « généralités sur le convertisseur DAB », dont on a présenté les convertisseurs DC-DC, les topologies de convertisseur DC-DC bidirectionnel et les types de (DAB).

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation et le contrôle du double pont actif monophasé et de réaliser sa simulation.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation de la commande d'un redresseur à absorption sinusoïdale associé à une commande par MLI, en présentant les détails de chaque partie constituant sa commande. De plus, une simulation d'un chargeur de batterie et interprété des résultats à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK.

Ce travail s'achève avec une conclusion générale qui résume tout le travail et qui donne une synthèse des différents résultats faites dans cette étude.

**Généralités sur le convertisseur  
double pont actif monophasé**

# Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

## Chapitre I. Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

### I.1. Introduction

Il existe des convertisseurs de plus forte puissance employant normalement 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 (1).

Le convertisseur double pont actif monophasé est un type de convertisseur largement utilisé dans nombreuses application industrielles et résidentielles. Il met en évidence un domaine de l'électronique de puissance qui joue un rôle magistral dans la conversion d'énergie électrique d'une forme a une autre afin de répondre aux exigences spécifiques des charges électriques (moteur, pompe, machines-outils ...etc.).

Ce chapitre mentionnée une étude détaillée des topologies des convertisseurs DC/DC. En se basant, le convertisseur à double pont actif, qui représente la topologie des convertisseurs la plus adéquate à l'application chargeur de batterie.

### I.2. Convertisseur DC/DC

La littérature nous offre une très large gamme de topologies DC/DC isolées. La majorité de ces topologies peuvent être décrites par le schéma synoptique présenté dans la figure I.1.

La topologie active isolée étant divisée en trois parties :

- Un convertisseur côté primaire, pour générer une tension ondulée à haute fréquence.
- Un transformateur pour garantir l'isolation galvanique.
- Un convertisseur côté secondaire, pour assurer une tension continue en sortie.

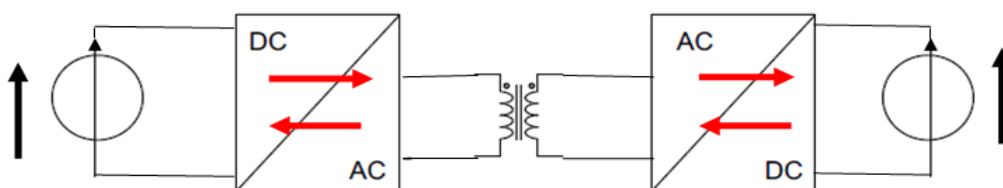


Figure I.1 : Schéma synoptique de convertisseur DC/DC.

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

La combinaison de ces trois structures donne naissance à différents types de convertisseurs isolés. En outre, il est commun de trouver différents noms pour des topologies basées sur un même principe, et ce par exemple lorsque le sens de transfert de puissance principal est inversé (1).

### I.3. Convertisseurs DC/DC bidirectionnel

Pour garantir la bidirectionnalité, certaines topologies DC/DC sont privilégiées. De plus, elles offrent une isolation galvanique, un coût réduit et un système peut encombrant. Les différentes topologies de convertisseurs DC-DC bidirectionnels basées sur l'alimentation des entrées/sorties est illustré dans la figure I.2.

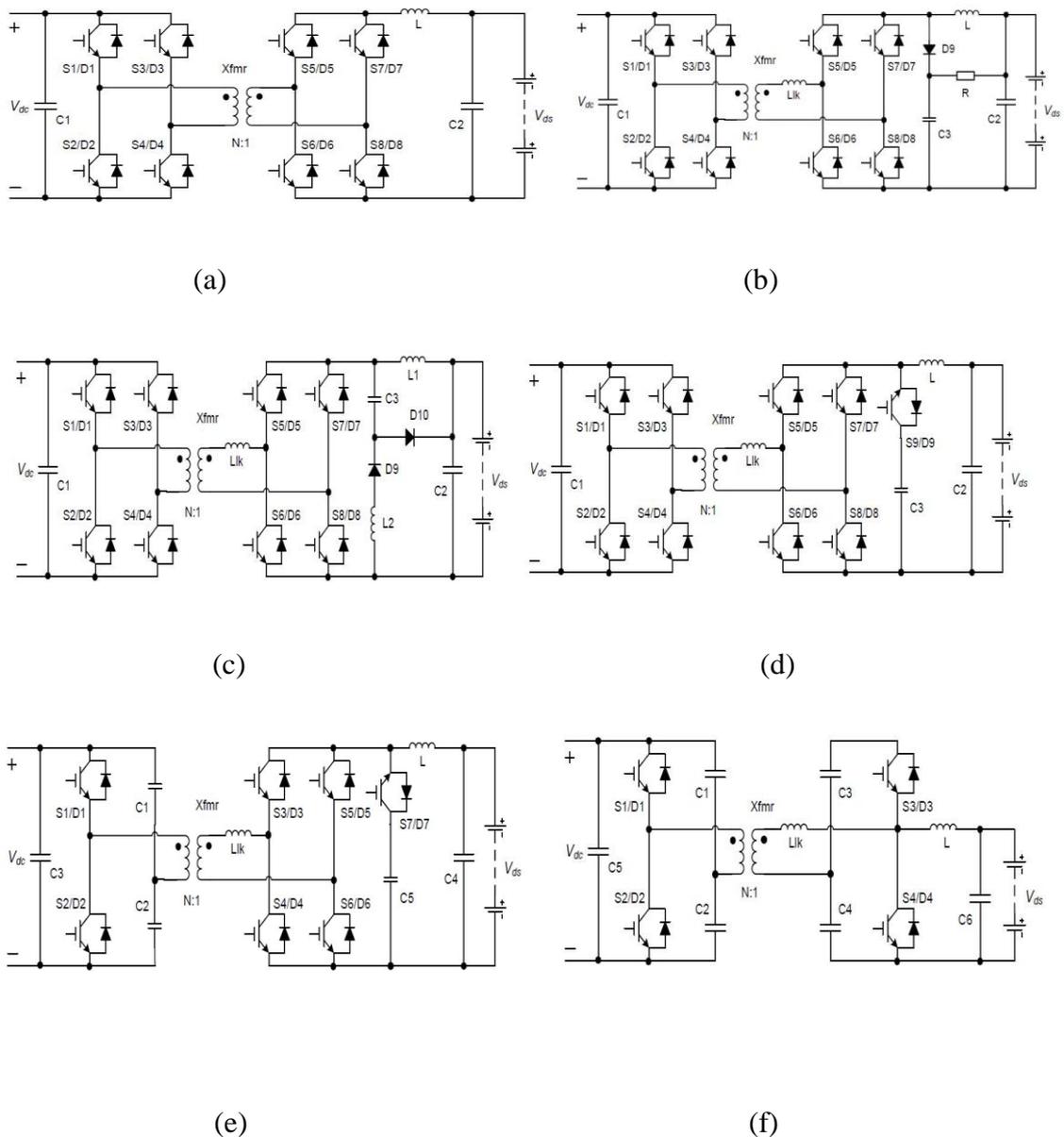


Figure I.2 : Différents topologies de convertisseur DC/DC (2).

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

Le convertisseur bidirectionnel DC-DC :

Dans la figure I.2.(a) est constitué d'un pont complet alimenté en tension VF et un pont complet alimenté en courant CF, et interface entre la batterie basse-tension et le bus de haute tension. Son inconvénient pour les applications à forte puissance est le pic de haute tension sur les commutateurs provoqués par l'inductance de fuite.

Dans la figure I.2.(b) un amortisseur RDC de différentiel est ajouté à la topologie précédente pour contrôler la tension de commutation du côté CF.

Dans la figure I.2.(c) un amortisseur sans perte remplace l'amortisseur RDC Afin de réduire plus efficacement la tension des commutateurs côté CF.

La topologie de la figure I.2.(d), se concentre sur la commutation à tension nulle, toujours basée sur la première topologie, la figure I.2, a ajouté une pince active permettant d'atteindre ZVS dans CF et ZVS ou ZCS dans VF, cependant, la tension des commutateurs côté CF dépasse la tension source  $V_{ds}$ , ce qui réduit son utilisation pour les applications ayant une tension source inférieure dans le côté CF.

La figure I.2.(e) est une dérivation de la topologie précédente en remplaçant le convertisseur côté grille par un demi pont VF.

Ensuite, la topologie de la figure I.2.(f) est fournie avec deux demi-ponts VF et CF, éliminant ainsi la nécessité d'ajouter des amortisseurs supplémentaires pour les commutateurs dans lesquels le commutateur S1 joue le rôle de commutateur à pince active (7).

### I.4. Convertisseur DAB monophasé

Le convertisseur DC/DC bidirectionnel basé uniquement sur des ponts alimentés en tension, connus sous le nom de convertisseur DC/DC à double pont actif, livré avec trois dérivations, comme illustrés dans les figures I.3, I.4 et I.5 :

Les ponts actifs doubles ont également quelques dérivés, tels que la combinaison d'un pont complet alimenté en tension et d'un demi-pont alimenté en tension, comme le montre la figure I.3, ou la combinaison de deux demi-ponts alimentés en tension, comme le montre la figure I.4. Chacun comprenant des interrupteurs de puissance (transistors ou thyristors) et des diodes de roue libre.

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

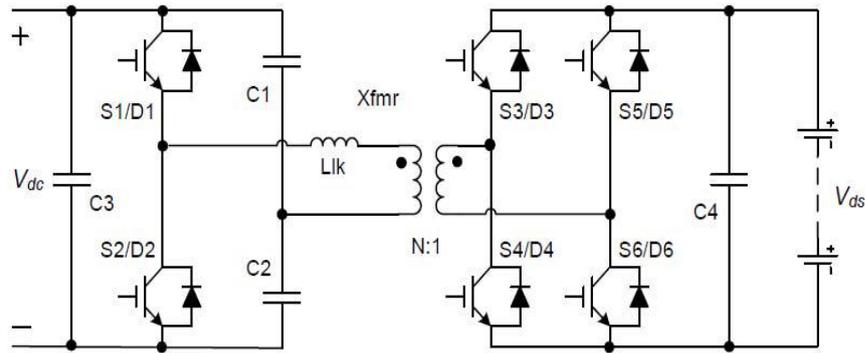


Figure I.3 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur un demi-pont alimenté en tension et un pont complet alimenté en tension (2).

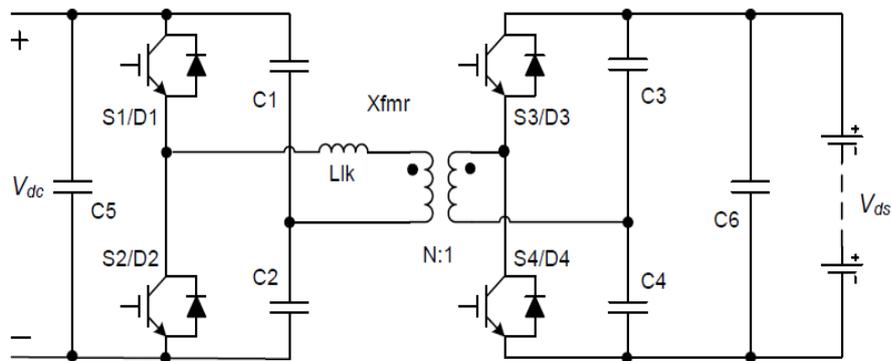


Figure I.4 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur deux demi-ponts alimentés en tension (2).

Dans la figure I.5, les ponts actifs doubles consistent en deux ponts complets alimentés en tension, qui sont directement interfacés avec deux sources de tension continue.

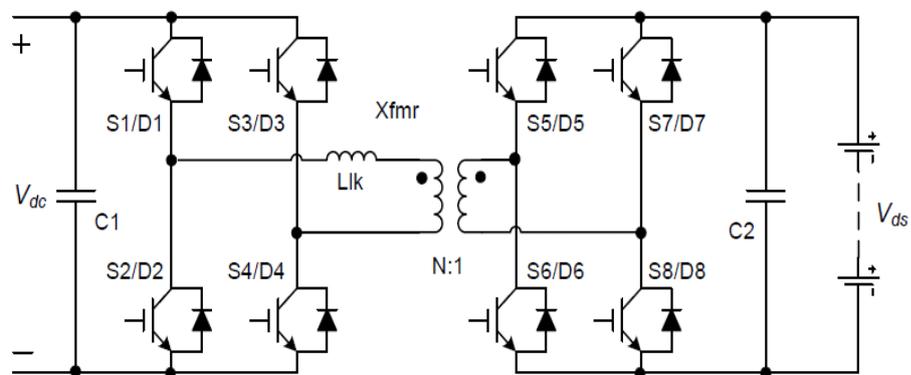


Figure I.5 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur deux ponts complets alimentés en tension (2).

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

Des exemples d'applications de cette topologie peuvent être trouvés dans les systèmes de stockage d'énergie et les entraînements de moteurs. Le contrôle des ponts actifs doubles est très flexible. Par exemple L'un des ponts est contrôlé par déphasage et 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 contrôlée (2).

### I.5. Convertisseur DAB à résonance série DC/DC

Le convertisseur DC/DC de type DAB à résonance série est représenté sur la figure I.6. On peut observer que la source DC d'entrée  $V_p$  ainsi que la sortie  $V_s$  sont connectées au convertisseur à travers des filtres passe-bas du deuxième ordre pour 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  $v_2$  (3).

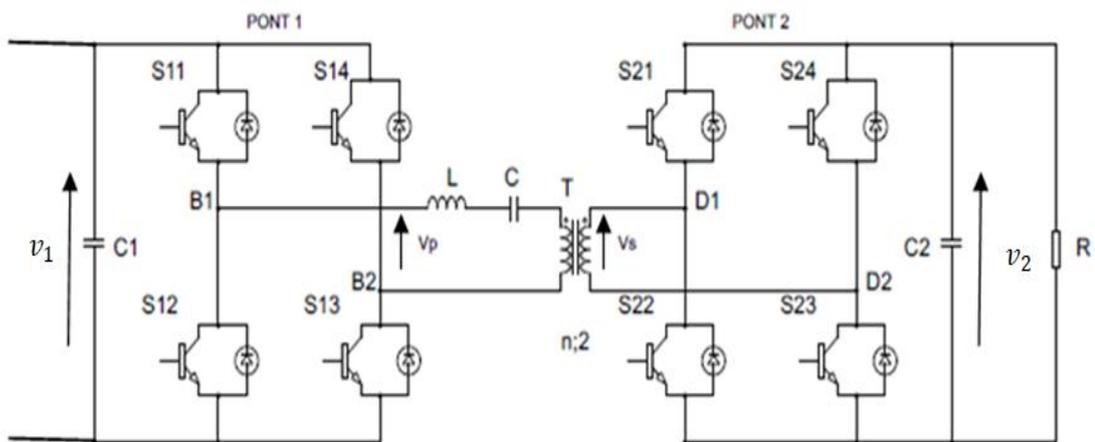


Figure I.6 : Convertisseur DC/DC à résonance série.

### I.6. 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 I.7.

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

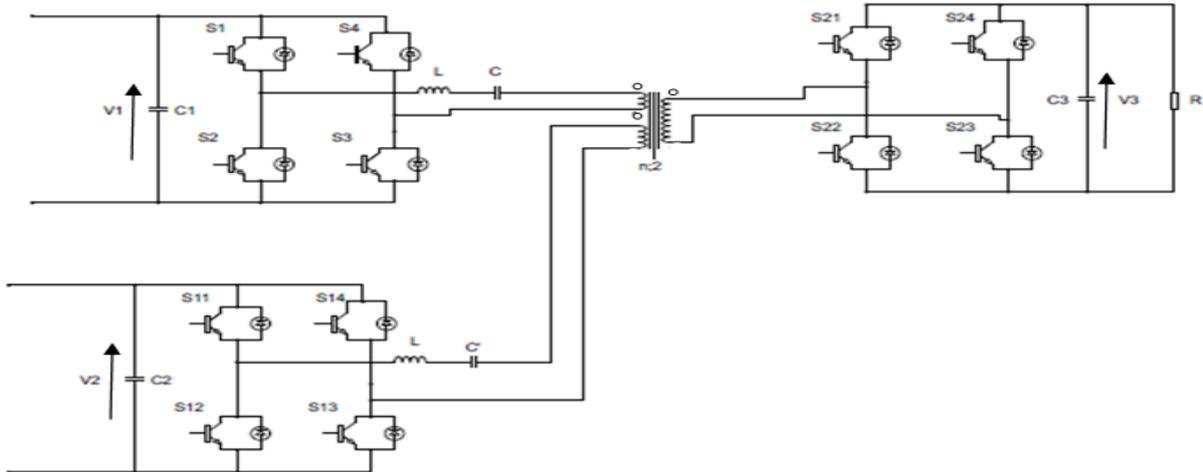


Figure I.7 : Convertisseur DC/DC à trois sources avec une topologie DAB à résonance série.

Ce convertisseur est composé de trois ponts actifs, deux circuits à résonance série et un transformateur HF à trois enroulements. Toutes les sources DC sont connectées vers le convertisseur avec des filtres passe-bas du deuxième ordre (3).

### I.7. Convertisseur DAB à double pont actif triphasé

Le DAB triphasé (figure I.8) utilise trois demi-ponts du côté primaire et trois autres demi-ponts du côté secondaire. Il nécessite 3 transformateurs HF (qui peuvent être regroupés sur un seul transformateur HF triphasé) et aussi peut au lieu du transformateur triphasé, trois transformateurs monophasés identiques sont connectés pour obtenir un convertisseur DAB triphasé souhaitée. Ce dernier est recommandé pour ses performances globales élevées avec un transformateur et des commutateurs à faible VA et des courants de condensateur à faible valeur efficace (4).

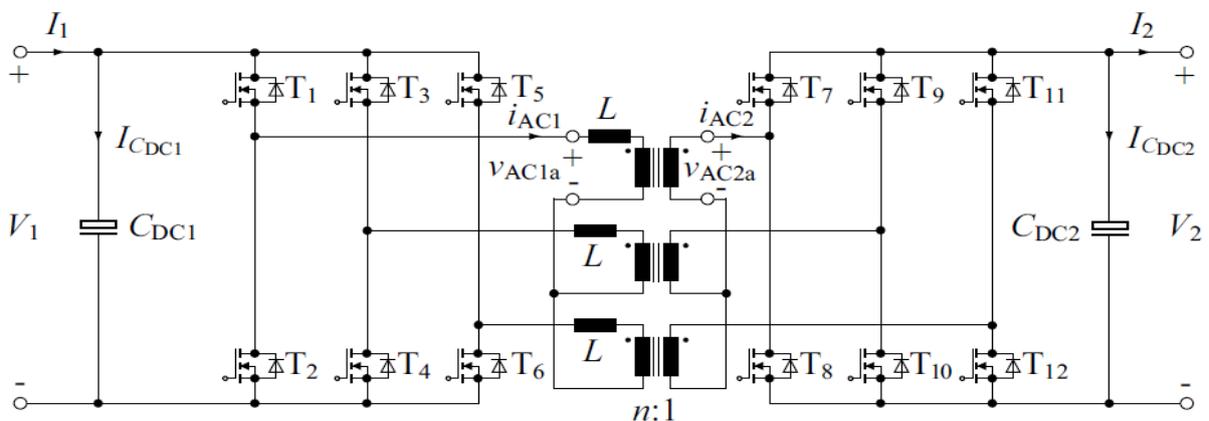


Figure I.8 : Topologie du convertisseur DAB triphasé (4).

# Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

## I.8. Principe de fonctionnement d'un convertisseur DAB monophasé

Dans notre projet, on s'intéresse à étudier le convertisseur DAB monophasé qui a été présentée par sa topologie (Kheraluwala et al dès) est constituée de deux convertisseurs à double ponts complets actifs, l'un d'eux fonctionne en mode d'onduleur et l'autre étant exploitée en mode de redresseur.

Les bornes AC de ces ponts sont reliées entre elles par l'intermédiaire d'un transformateur à haute fréquence, ce qui permet de faire circuler le flux d'énergie dans les deux sens comme montré sur la Figure I.9. Chaque pont peut être contrôlé afin de générer une tension carrée à haute fréquence aux bornes du transformateur ( $\pm V_1$ ,  $\pm V_2$ ). En profitant de l'inductance de fuite du transformateur, les deux ondes de tension carrée peuvent être déphasées de façon appropriée pour piloter d'énergie transitant d'un côté à l'autre du convertisseur. Un transfert de puissance bidirectionnel peut ainsi être réalisé. Dans une large plage de rapport des tensions entrée / sortie et de puissance transférée, tous les interrupteurs peuvent fonctionner dans les zones de commutation douce augmentant l'efficacité énergétique de la structure de conversion (5).

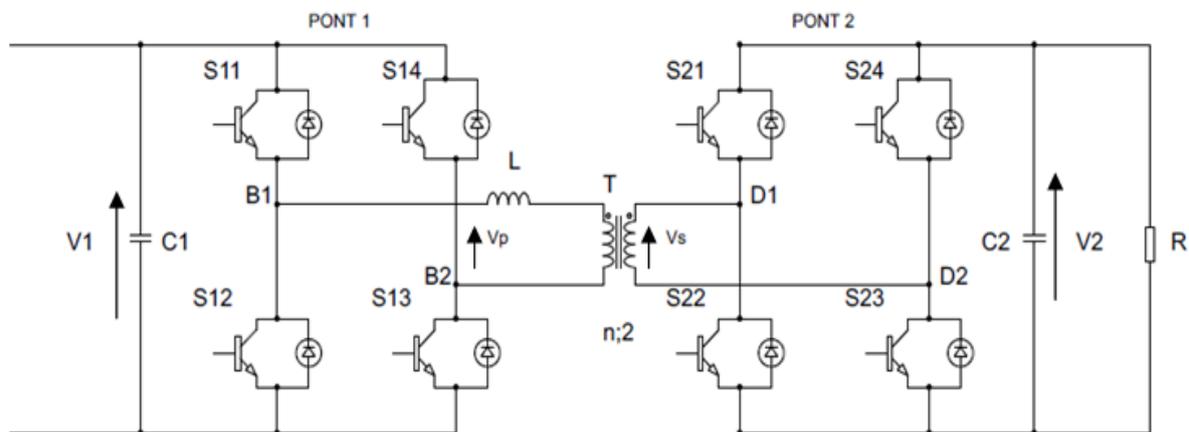


Figure I.9 : Topologie de la structure DAB.

Pour le fonctionnement en mode classique, la puissance transférée à tension de sortie du convertisseur donnée est contrôlée par le réglage du déphasage  $\varphi$  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 I.10.

## Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé

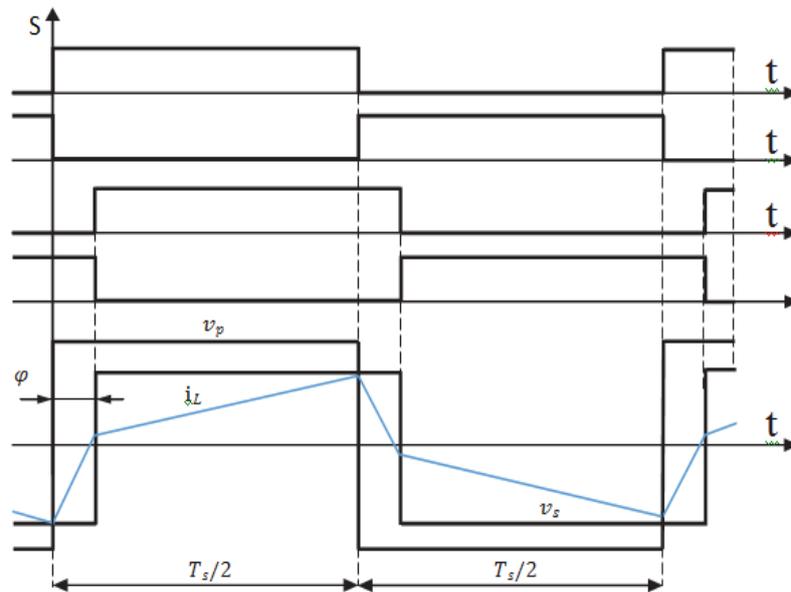


Figure I.10 : Formes d'ondes dans le transformateur du DAB.

### I.9. Modèle de convertisseur DAB monophasé

Pour le modèle de convertisseur DAB électrique le plus simple (4):

- Toutes les pertes sont négligeables;
- L'inductance de magnétisation du transformateur et les capacités parasites sont négligeables;
- Toutes les quantités du côté BT sont référencées du côté HT;
- Les tensions d'alimentations constantes  $V_p$  et  $V_s$  sont prises en compte.

Le modèle DAB sans perte qui en résulte est représenté à la figure I.11.

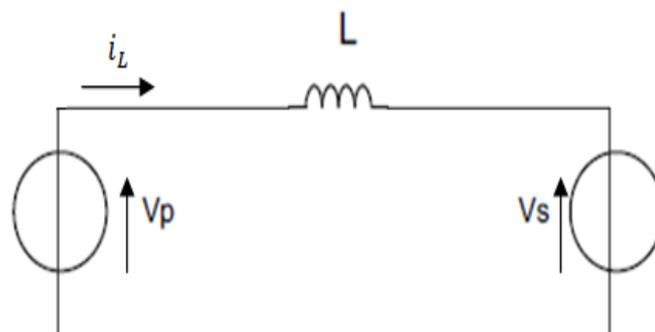


Figure I.11 : Modèle DAB monophasé sans pertes.

## **Généralités sur le convertisseur double pont actif monophasé**

### **I.10. Avantages du convertisseur DAB monophasé**

Le convertisseur double pont actif monophasé présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types de convertisseurs de puissance électronique. En voici quelques-uns (2):

- ✓ Fournir une tension continue de haute qualité;
- ✓ ZVS peut être atteint pour les interrupteurs des deux ponts;
- ✓ Le nombre d'interrupteurs est inférieur à celui des ponts complets alimentés en tension et en courant;
- ✓ La tension des interrupteurs est faible par rapport à celle des ponts complets alimentés en courant;
- ✓ Un rendement élevé.

### **I.11. Inconvénients du convertisseur DAB monophasé**

Les inconvénients à prendre en compte lors de l'utilisation d'un convertisseur DAB monophasé (2):

- ✓ Complexité du circuit;
- ✓ Coût élevé;
- ✓ Faible charge;
- ✓ Le rapport entre la puissance réactive et la puissance active est élevé;

### **I.12. Domaines d'application des convertisseurs DAB monophasé**

Le convertisseur double pont actif monophasé est largement utilisé dans de nombreuses applications, telles que l'électronique, les communications, l'informatique, l'automatisation industrielle, conversion d'énergie, notamment pour les moteurs électriques, les systèmes de stockage d'énergie, les alimentations électriques, les panneaux solaires, les éoliennes et les onduleurs.

### **I.13. Conclusion**

Nous avons entamé dans ce chapitre par une présentation de différentes topologies de convertisseur DC/DC bidirectionnel. Nous s'intéressons au convertisseur DAB puis nous avons exposé ces types.

De plus, nous avons développé le fonctionnement de ce convertisseur, et à la fin on a présenté les avantages et les inconvénients de (DAB) monophasé ainsi les domaines d'application de ce convertisseur.

**Modélisation et simulation d'un  
convertisseur DAB monophasé**

## Chapitre II. Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

### II.1. Introduction

Un convertisseur double pont actif monophasé est un dispositif électronique de conversion de puissance qui permet de convertir une tension continue en une tension continue, ou de réguler la tension et la fréquence de sortie d'une source d'alimentation alternative.

Ce chapitre se concentre sur la modélisation d'un convertisseur double pont actif monophasé. Elle est importante pour comprendre son comportement et son fonctionnement. On commence d'abord par description de circuit, On s'intéresse à établir le système d'équation du DAB puis élaborer son modèle moyen. La dernière étape sera sur le contrôle de ce convertisseur.

Après avoir terminé l'analyse théorique, on passe à la simulation en utilisant le logiciel bien approprié, à savoir MATLAB/Simulink.

### II.2. Description du circuit

La figure II.1 montre la topologie d'un convertisseur DC/DC monophasé à deux étages pour un convertisseur double pont actif (DAB) (6), où :

- ✓  $v_1$  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);
- ✓ C1 est la capacité du côté de l'entrée;
- ✓ C2 est la capacité du côté sortie;
- ✓  $i_1, i_D, i_{c1}, i_{c2}$  et  $i_2$  sont respectivement le courant d'entrée de sortie, le courant du condensateur C1, C2 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.

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

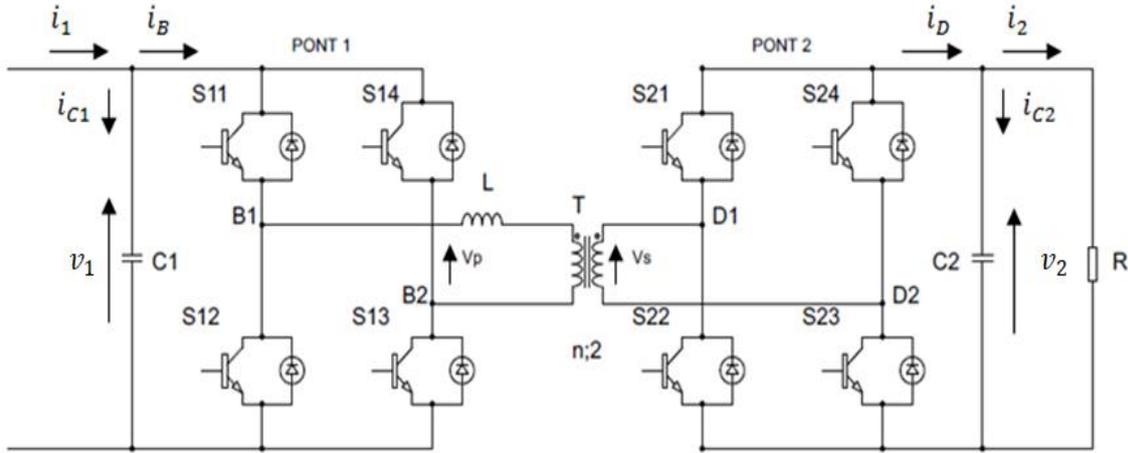


Figure II.1 : Topologie d'un convertisseur DC/DC monophasé

On notera que la commutation des interrupteur 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.

### II.3. Modélisation de DAB monophasé

La représentation du système sous forme d'équations nous permet d'obtenir la fonction de transfert appropriée entre le courant de sortie et le rapport de déphasage du DAB. Ces fonctions sont utiles pour concevoir des contrôleurs appropriés pour les opérations de charge et de décharge de la batterie.

Le convertisseur à double pont actif DAB est illustré à la Fig. II.1. Il existe deux modes de fonctionnement selon le type de charge affectée à la sortie DAB, soit en tant que charge résistive, soit en tant que source de tension.

Analysez le modèle de circuit pour aboutir le modèle d'état pour le DAB. Les fonctions de commutation des deux ponts calculées sur une période de commutation du DAB et pour des commutateurs idéaux sont les suivantes :

$$\begin{cases} S_{11} = S_{13} = 1 - S_{12} \\ S_{12} = S_{14} = 1 - S_{11} \\ S_{21} = S_{23} = 1 - S_{22} \\ S_{22} = S_{24} = 1 - S_{21} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

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 :

$$v_{B1B2} = \begin{cases} v_1 & \text{si } S_{11} = 1 \\ -v_1 & \text{si } S_{11} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

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

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

D'où,

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

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

$$v_{D1D2} = \begin{cases} v_2 & \text{si } S_{21} = 1 \\ -v_2 & \text{si } S_{21} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

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

$$i_B = \begin{cases} i_L & \text{si } S_{11} = 1 \\ -i_L & \text{si } S_{11} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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

$$i_D = \begin{cases} n \cdot i_L & \text{si } S_{21} = 1 \\ -n \cdot i_L & \text{si } S_{21} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

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

Le courant dans l'inductance L et la tension aux bornes de la capacité C2, représentent les variables d'état du DAB tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{B1B2} - L \frac{di_L}{dt} - n \cdot v_{D1D2} = 0 \rightarrow L \frac{di_L}{dt} = v_{B1B2} - n \cdot v_{D1D2} \\ i_D - i_{C2} - i_2 = 0 \rightarrow C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_D - i_2 \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{B1B2} - n \cdot v_{D1D2} = v_1(2S_{11} - 1) - n \cdot v_2(2S_{21} - 1) \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_D - i_2 = n \cdot i_L(2S_{21} - 1) - i_2 \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

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

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L} [v_1(2S_{11} - 1) - n \cdot v_2(2S_{21} - 1)] \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C2} [n \cdot i_L(2S_{21} - 1) - i_2] \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

### II.4. Modèle de simulation du DAB monophasé sous MATLAB/Simulink

Après avoir obtenu le modèle d'état du système, nous pouvons dériver le modèle moyen du DAB en utilisant l'expression de la puissance moyenne du transformateur. Pour simplifier les calculs, nous avons effectué une simulation qui a généré des courbes représentant les tensions et les courants du circuit correspondant.

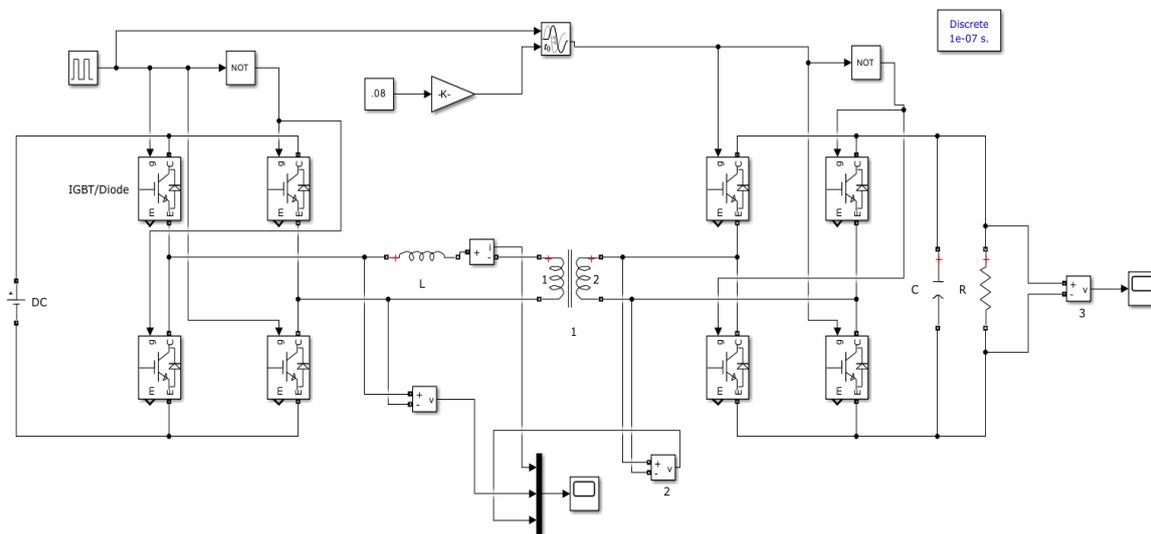


Figure II.2 : Schéma du DAB monophasé sous MATLAB/Simulink

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

Tableau 1 : Paramètres de simulation de DAB monophasé.

Vdc	50	V
n	2	-
$V_p$	50	V
$V_s$	25	V
L	10000	$\mu\text{H}$
C2	660	$\mu\text{F}$
R	2	$\text{m}\Omega$
$f$	$10 \cdot 10^3$	Hz

# Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

## II.4.a. Résultats de simulation

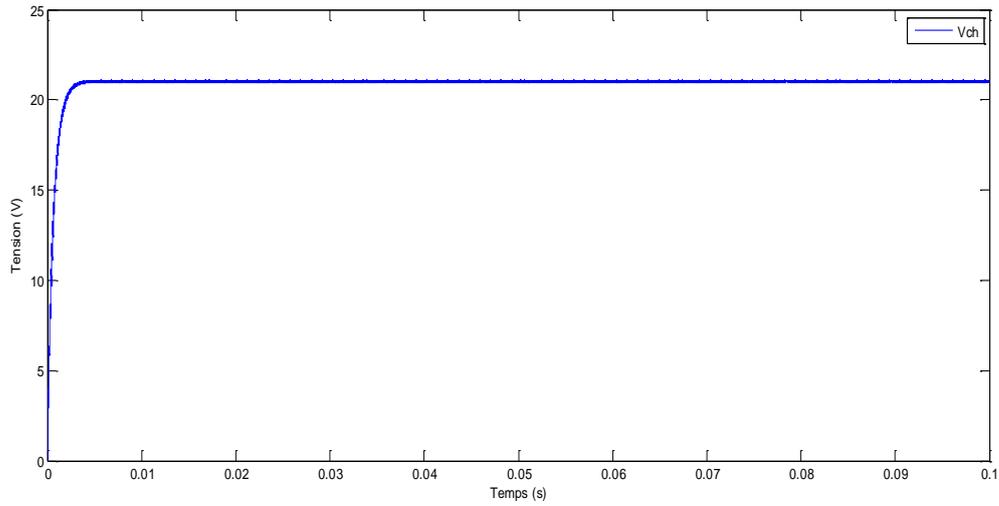


Figure II.3 : Tension aux bornes de la charge R.

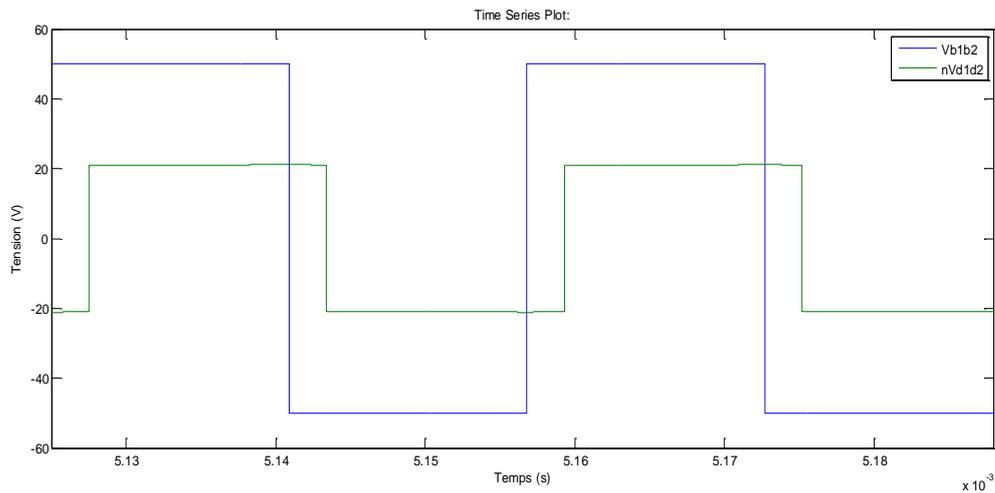


Figure II.4 : Tension d'entrée et de sortie du DAB monophasé.

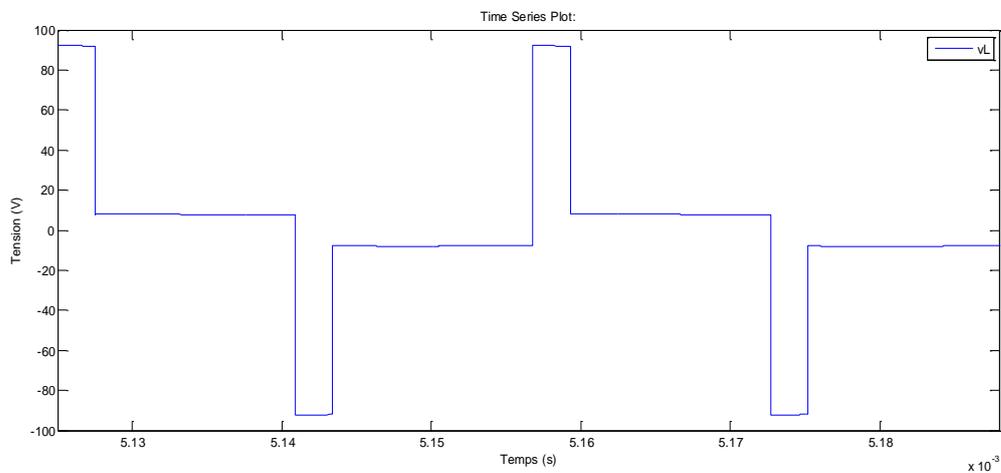


Figure II.5 : Tension aux bornes de l'inductance.

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

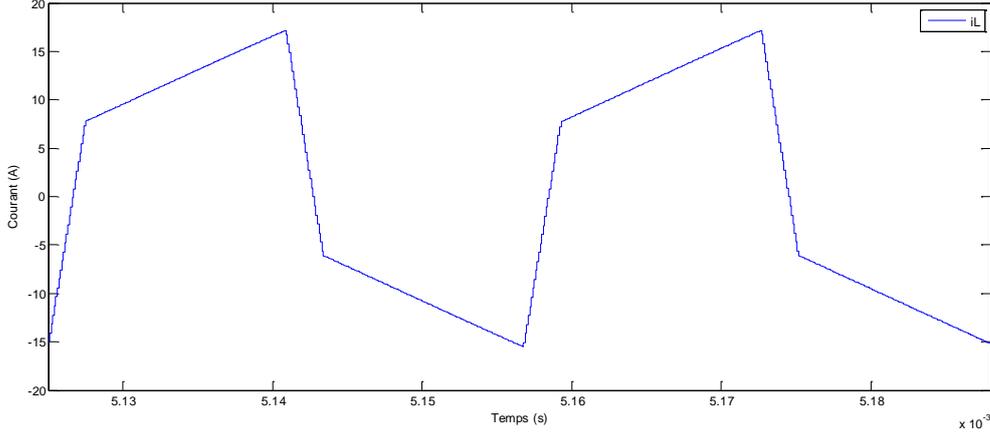


Figure II.6 : Courant de l'inductance de DAB monophasé.

### II.4.b. Interprétation des résultats

La figure II.4 montre que la tension aux bornes  $v_{D1D2}$  est en retard par rapport à  $v_{B1B2}$  par un déphasage  $\varphi$ .

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 le DAB est suffisante. Par application 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 II.4). L'équation P est :

$$P = \langle v_1 \cdot i_L \rangle_\pi = v_1 \cdot \langle i_L \rangle_\pi \quad (\text{II.10})$$

On a :

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

On effectue un changement de variable du domaine temporel au domaine angulaire, soit  $t = \frac{\theta}{\omega_s}$ . Avec  $\theta$  est le déphasage entre le pont du côté réseau et le pont du côté batterie du DAB, on obtient :

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

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

À partir de là, l'expression du courant exprimé dans (2.11) devient alors :

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

D'après la figure II.4 on a :

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

❖ Intervalle  $0 \leq \theta \leq \varphi$  :

$$\begin{cases} v_{B1B2} = v_1 \\ v_{D1D2} = -v_2 \end{cases}$$

$$i_L(\theta) = \frac{v_1 + nv_2}{LW_s} \cdot \theta - \hat{i}_L \quad (\text{II. 14})$$

❖ Intervalle  $\varphi \leq \theta \leq \pi$  :

$$\begin{cases} v_{B1B2} = v_1 \\ v_{D1D2} = v_2 \end{cases}$$

$$i_L(\theta) = \frac{v_1 - nv_2}{LW_s} \cdot (\theta - \pi) + \hat{i}_L \quad (\text{II. 15})$$

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  $\langle i_L \rangle_\pi$  :

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

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

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

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{v_1 + nv_2}{Lw_s} \cdot \frac{\varphi^2}{2} + \frac{v_1 - nv_2}{Lw_s} \cdot \left[ -\frac{(\varphi - \pi)^2}{2} \right] + (\pi - 2\varphi) \cdot \hat{i}_L \right\} \\
 &= \frac{v_1 \pi (2\varphi - \pi) + nv_2 \cdot (2\varphi^2 - 2\varphi\pi + \pi^2) + (\pi - 2\varphi) [v_1 \pi + (2\varphi - \pi)nv_2]}{2\pi Lw_s} \\
 &= \frac{nv_2}{2\pi Lw_s} = [2\varphi^2 - 2\varphi\pi + \pi^2 - (2\varphi - \pi)^2] = \frac{nv_2}{Lw_s} \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \\
 \langle i_L \rangle_\pi &= \frac{nv_2}{Lw_s} \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \tag{II.18}
 \end{aligned}$$

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

$$P = \frac{nv_1 v_2}{Lw_s} \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \tag{II.19}$$

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

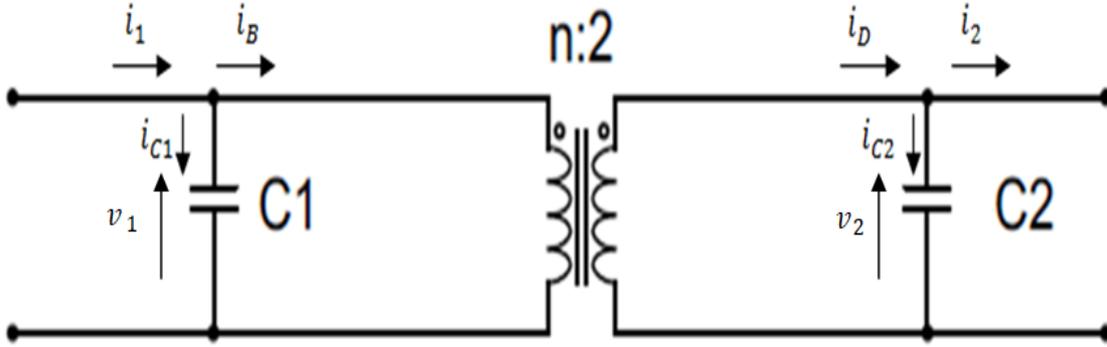


Figure II.7 : Modèle du gyrateur moyen du DAB

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

$$\begin{cases} i_D = \frac{P}{v_2} = \frac{nv_1}{Lw_s} \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \\ i_B = \frac{P}{v_1} = \frac{nv_2}{Lw_s} \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \end{cases} \tag{II.20}$$

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

Ce qui nous donne :

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

### II.5. Contrôle du double pont actif

#### II.5.a. Contrôler le modèle DAB avec régulateur PI

Le contrôle de la puissance transféré par le DAB se fait en modulant l'amplitude du courant de l'inductance série. La régulation est réalisée en modifiant le déphasage entre les ondes carrées appliquées de chaque côté du transformateur en série avec l'inductance. Cette amplitude augmente en fonction du déphasage appliqué entre les deux ondes carrées. Le régulateur utilisé est de type proportionnel intégral (8).

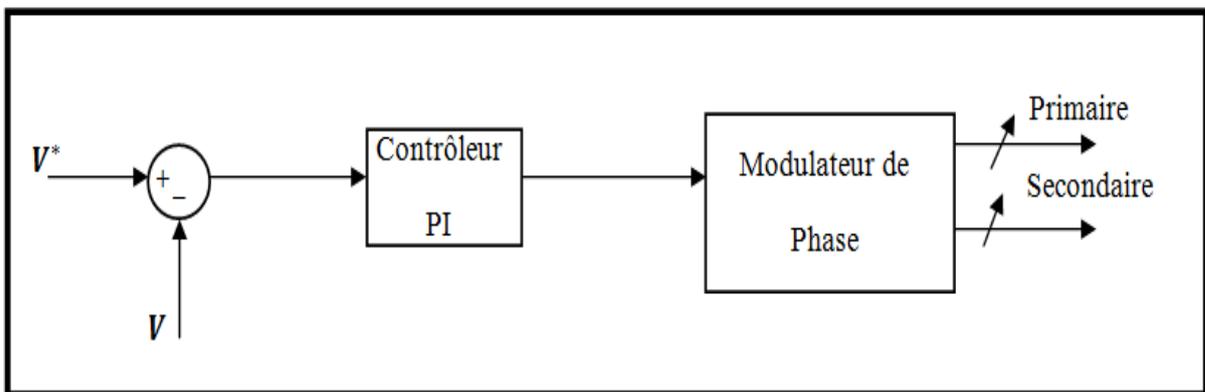


Figure II.8 : Schéma de contrôle de DAB monophasé

#### II.6. Modèle DAB avec régulation sous MATLAB/Simulink

La bibliothèque Matlab/Simulink a permis la conception du schéma de convertisseur DAB monophasé ci-après, qui nous a permis d'obtenir les allures des différentes tensions et courant de charge, en tenant compte des paramètres des régulateur PI tel que ( $K_p = 0.25$  et  $K_i = 0.0000850$ ), et du fait que nous avons incéré une tension de référence a les instantes suivantes:

- A l'instant  $t = 0$  à  $t = 0.1$  nous avons incéré une tension de valeur  $V = 6v$ ;
- A l'instant  $t = 0.1$  à  $t = 0.2$  nous avons incéré une tension de valeur  $V = 12v$ ;
- A l'instant  $t = 0.2$  à  $t = 0.3$  nous avons incéré une tension de valeur  $V = 24v$ .

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

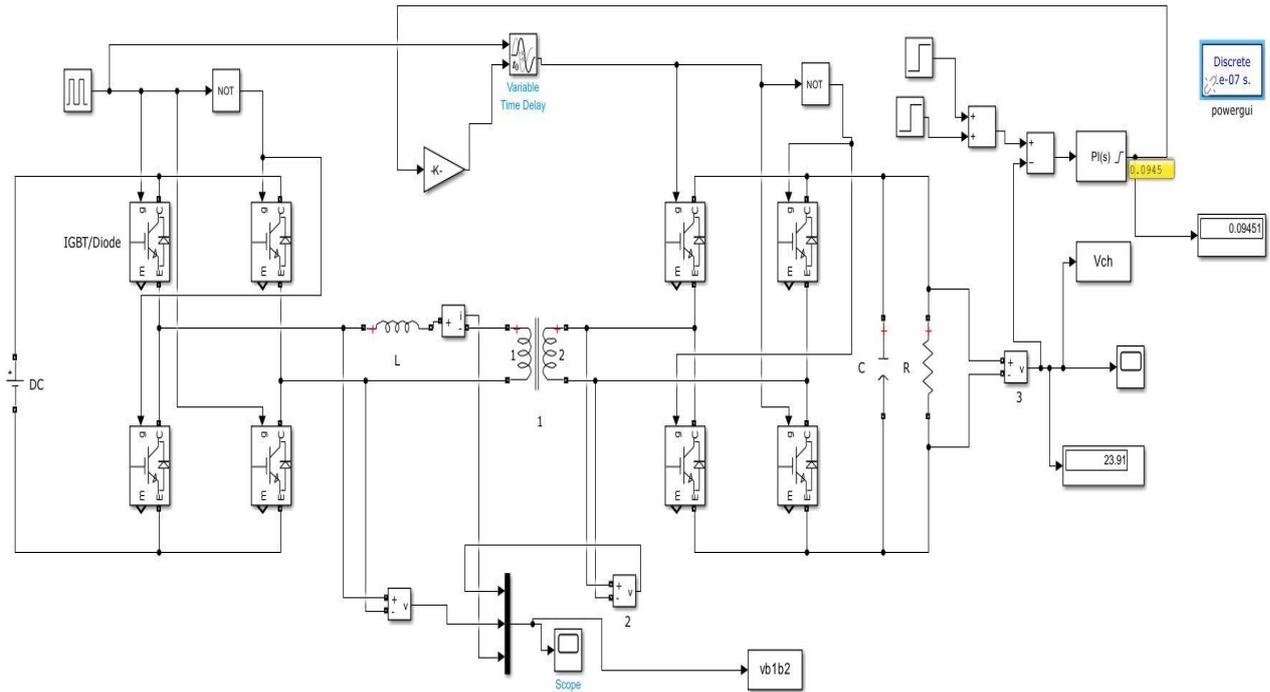


Figure II.9 : Modèle DAB monophasé avec régulation sous MATLAB/Simulink.

### II.6.a. Résultats de simulation

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

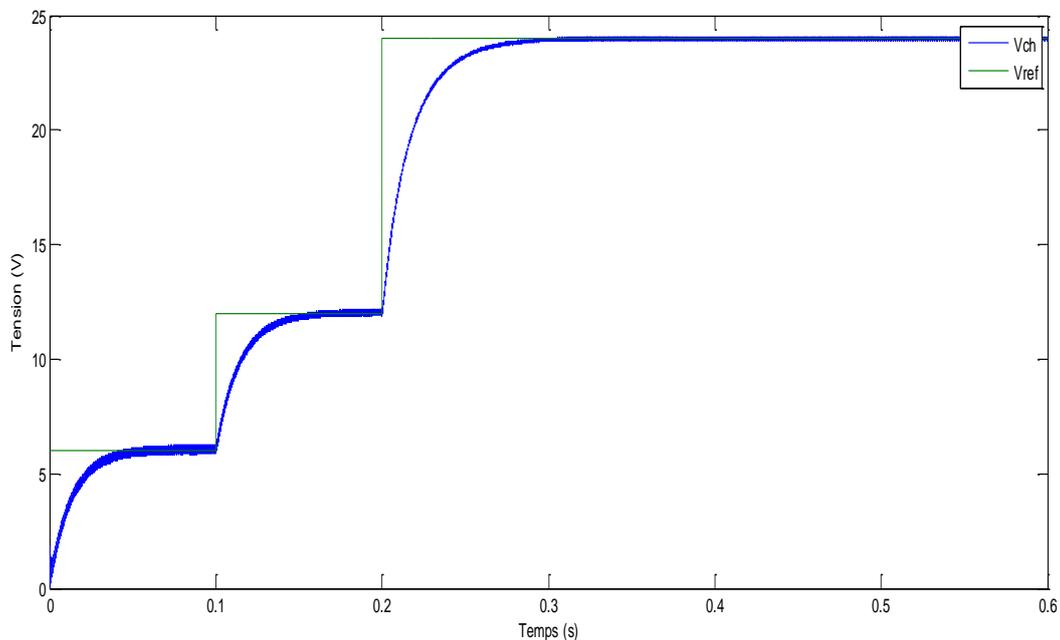


Figure II.10 : Tension aux bornes de la charge R.

# Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

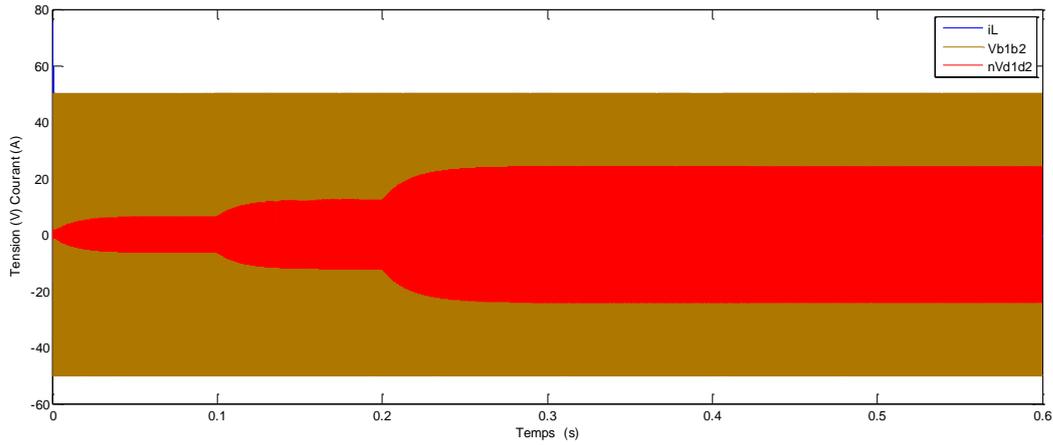


Figure II.11 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance.

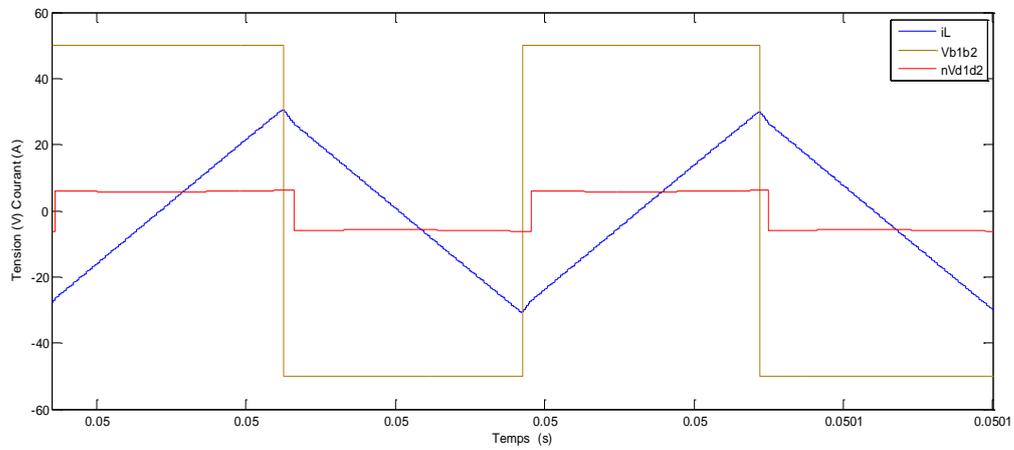


Figure II.12 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance a l'instant  $t=0$  à  $t=0.1$ .

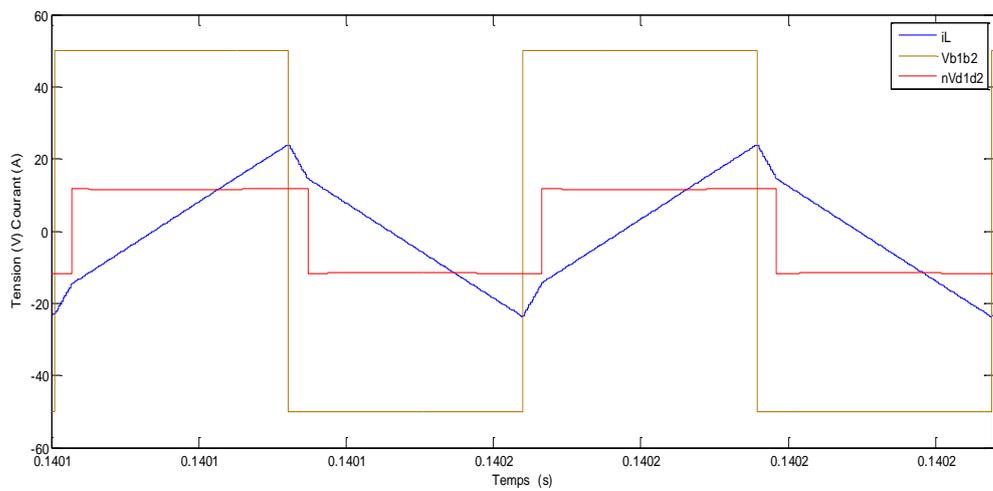


Figure II.13 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance a l'instant  $t=0.1$  à  $t=0.2$ .

## Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB monophasé

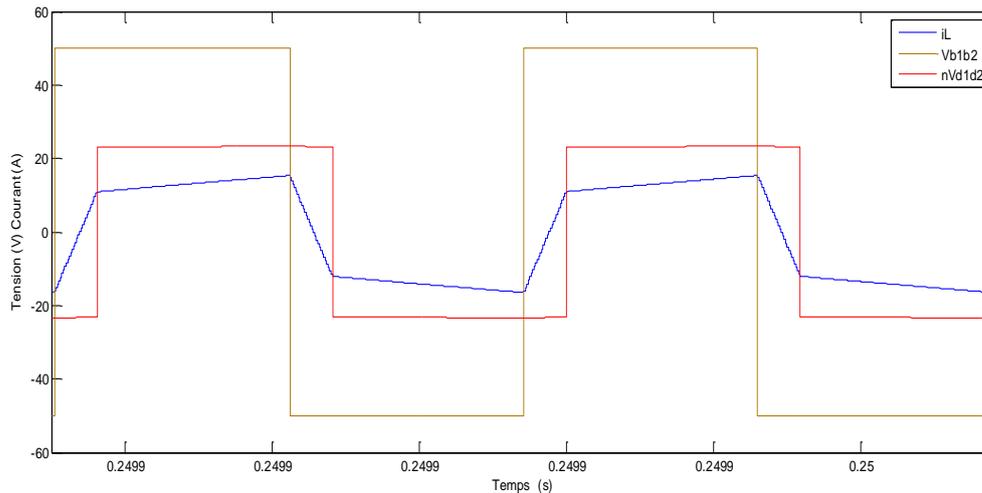


Figure II.14 : Tension d'entrée et de sortie du DAB et le courant aux bornes de l'inductance a l'instant  $t=0.2$  à  $t=0.3$ .

### II.6.b. Interprétation des résultats

La figure II.10 représente la tension aux bornes de la charge R suit sa référence qui est un échelon passant de 6V, 12V à 24V.

Les figures II.11/ II.12 /II.13 représentent les tensions  $v_{B1B2}$  et  $v_{D1D2}$  et le courant aux bornes de l'inductance  $i_L$  à des instants déférentes.

Le test de contrôle optimisé en boucle fermé est effectué à une tension d'entrée de 50V et à une fréquence de commutation de 10kHz et appliquant une variation de tension de sortie de 6 à 24 V. D'après les résultats de simulation, on remarque que le contrôle de DAB à mesure que le déphasage entre les deux tensions  $v_{B1B2}$  et  $v_{D1D2}$  augmente, l'amplitude de courant augmente également. En d'autres termes, plus le déphasage est important, plus l'amplitude du courant sera élevée.

### II.7. Conclusion

Au cours du deuxième chapitre, nous avons commencé par modéliser un système de DAB monophasé, et nous avons suivi plusieurs étapes pour parvenir à cette modélisation.

Une fois que nous avons obtenu le modèle d'état du DAB monophasé, nous avons procédé à la conception d'un régulateur PI approprié pour contrôler le système, puis on à effectuer la simulation sous MATLAB /SIMULINK.

**Convertisseur DAB monophasé pour  
application chargeur de batterie**

# **Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie**

## **Chapitre III. Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie**

### **III.1. Introduction**

Les chargeurs de batteries jouent un rôle essentiel dans le développement des véhicules électriques. Le temps de charge et la durée de vie de la batterie sont liés aux caractéristiques du chargeur de batterie. Un chargeur de batterie doit être efficace et fiable, avec une densité de puissance élevée, un faible coût, un volume et un poids réduit. Les structures utilisées peuvent être classées en deux groupes : Les montages mono-étage (Convertisseur AC-DC) ou les montages à deux étages (convertisseur AC-DC + DC-DC). Ce dernier est l'objet de notre étude.

D'après notre étude détaillée des topologies de convertisseur DC/DC dans le premier chapitre. Nous avons décidé d'arrêter notre choix sur le convertisseur DAB monophasé. Dans le cas de topologie de convertisseur AC/DC bidirectionnelle. On assume qu'un redresseur sera ajouté pour compléter le module de connexion réseau.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de redresseur et ainsi aborder son contrôle, nous devons présenter quelques généralités sur le redresseur MLI monophasé, et effectuer sa modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK.

### **III.2. Chargeur de batterie**

Le chargeur de batteries est un élément important du véhicule électrique. Il est un dispositif électrique conçu pour recharger les batteries en leur fournissant une source d'énergie électrique.

#### **III.2.a. Types de chargeurs**

Deux grands types de chargeurs ont été définis pour cette fonction:

- ❖ Les chargeurs de type "lents".
- ❖ Les chargeurs de type "rapides"(9).

#### **III.2.b. Classification des chargeurs**

Les chargeurs peuvent être classifiés selon les possibilités de transfert d'énergie, c'est-à-dire unidirectionnel ou bidirectionnel.

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

## A. 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 (9).

## B. Chargeurs bidirectionnels

Les chargeurs bidirectionnels peuvent être soit non isolés, ce qui n'est pas recommandé en raison de leur poids et de leur coût; soit des chargeurs isolés qui fournissent une densité de puissance élevée et un contrôle rapide. Il convient de noter que les chargeurs bidirectionnels sont nécessaires si l'on souhaite non seulement charger la batterie à partir du réseau, mais aussi injecter l'énergie stockée dans la batterie dans le réseau électrique lorsque cela est nécessaire, comme dans le cas des systèmes de stockage d'énergie à grande échelle.

### III.2.c. Structures de chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique, c'est-à-dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Dans le cas d'une alimentation par courant alternatif, la charge s'effectue généralement en deux étapes présentées dans la figure III.1 :

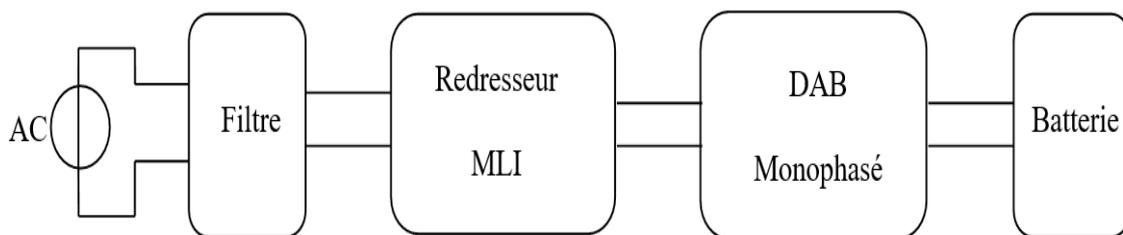


Figure III.1 : Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur.

Conversion AC/DC : la transformation du courant alternatif délivré par le réseau de distribution en courant continu est réalisée soit par un pont redresseur à diodes, ou par d'autres systèmes tels que, un pont à thyristors ou un convertisseur à absorption sinusoïdale de

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

courant. Le rôle du convertisseur AC/DC est de maintenir une tension de bus constante avec un facteur de puissance élevé pour la tension et le courant du réseau.

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 (9).

### III.2.d. Chargeurs monophasés et triphasés

Plusieurs topologies et schémas ont été rapportés pour les chargeurs monophasés et triphasés. Ces chargeurs peuvent utiliser des topologies en demi-pont ou en pont complet. Le demi-pont comporte moins de composants et est moins coûteux, mais il présente des contraintes élevées sur les composants. Les systèmes à pont complet ont plus de composants et un coût plus élevé, mais les contraintes sur les composants sont moindres. Cette topologie nécessite plus d'entrées de modulation de largeur d'impulsion (PWM) qui ajoutent à la complexité et au coût du circuit de commande. Les figures 4(a)-(c) montrent des circuits bidirectionnels de base (9).

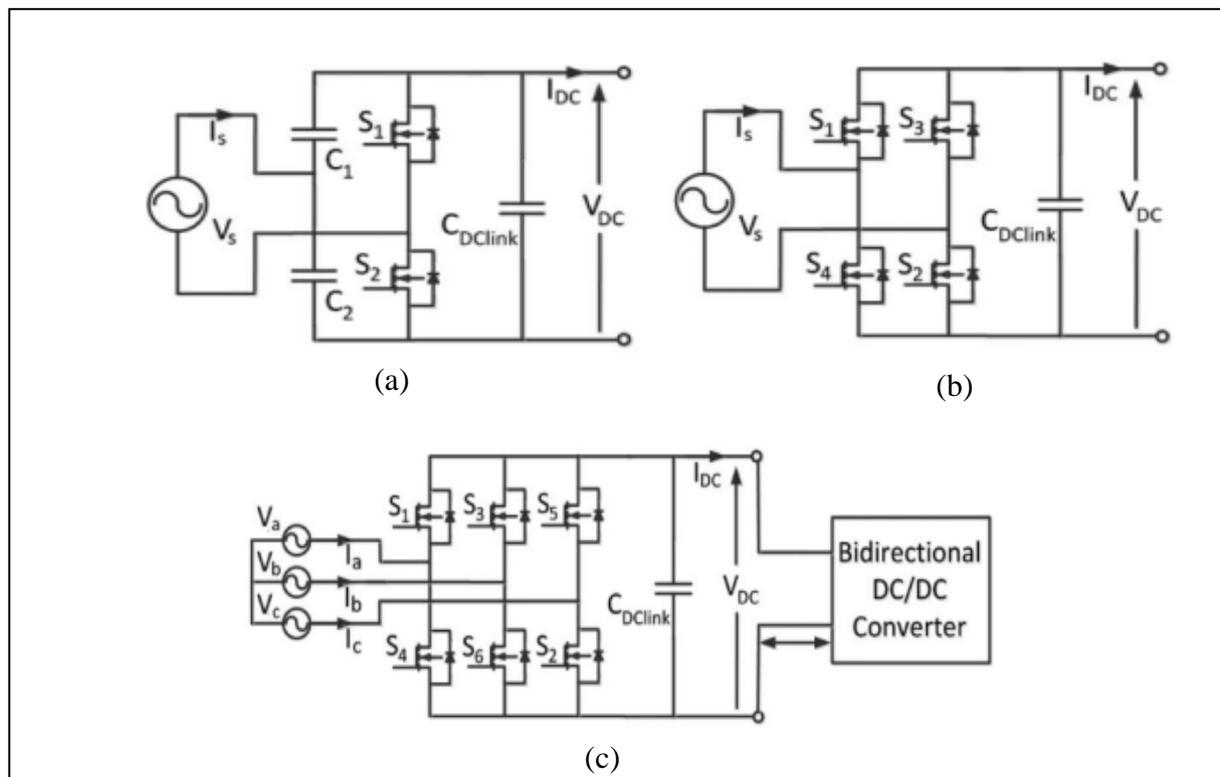


Figure III.2 : Circuits bidirectionnels de base (9).

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

La figure III.2 (a) montre un chargeur bidirectionnel monophasé en demi-pont.

La figure III.2 (b) montre un chargeur monophasé à pont complet.

La figure III.3 (c) montre une unité bidirectionnelle triphasée à pont complet qui s'interface avec un convertisseur DC/DC.

Pour cela, nous distinguons deux cas : le cas d'une alimentation monophasée (charge lente) puis d'une alimentation triphasée (charge rapide).

Nous avons fait le choix ici, d'étudier uniquement le chargeur alimenté au réseau monophasé. Pour analyser ce chargeur ainsi que pour caractériser ses performances, nous ferons d'abord une étude théorique sur le convertisseur AC/DC (Redresseur).

## III.3. Redresseur

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite d'être alimentée par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension.

Il peut être commandé ou non commandé, monophasé ou polyphasé. Cette conversion est accompagnée d'une altération de la qualité du réseau.

Il existe aussi des redresseurs à absorption sinusoïdale. Ce dernier est construit à l'aide de diodes, transistors IGBT qui sont utilisés afin d'améliorer la forme d'onde du courant alternatif consommé côté réseau(12).

### III.3.a. Description du redresseur monophasé

Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement au redresseur monophasé. L'ensemble source - redresseur - charge est représenté par la figure III.3:

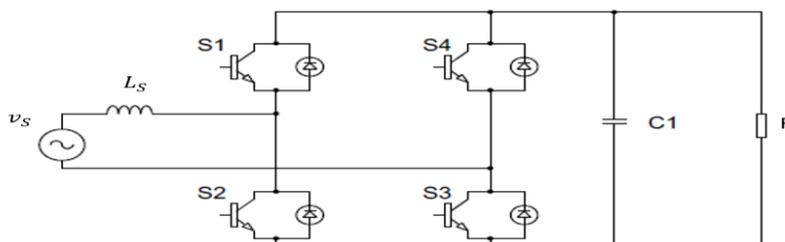


Figure III.3 : Schéma de redresseur monophasé.

## **Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie**

La figure montre le schéma de principe et indique les notations adoptées. Le redresseur est formé de quatre interrupteurs  $S$  commandés bidirectionnels en courant. Chaque interrupteur est composé d'un transistor IGBT et une diode montée de manière à assurer la continuité des courants de source.

Le réseau est modélisé par une source de tension monophasée sinusoïdale  $v_S$  avec  $L_S$ .

Du côté continu, on trouve une capacité  $C1$  en parallèle sur la charge caractérisant ainsi une source de tension.

Le redresseur est alimenté par une source de courant à cause de l'inductance  $L_S$ (13).

### **III.3.b. Applications des redresseurs**

Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux équipements industriels et domestiques ainsi que dans les dispositifs de conversion de l'énergie électrique. Nous citons ci-dessous les applications les plus courantes :

- Chargeurs de batterie ;
- Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs et à courant continu ;
- Circuit d'excitation des alternateurs ;
- Liaison à courant continu ;
- Dispositifs d'éclairage de nouvelle génération(12).

### **III.4. Commande modulation de largeur d'impulsion**

La modulation de largeur d'impulsion, (Pulse Width Modulation, PWM), est largement utilisée pour la commande des onduleurs. Le principe de la modulation de largeur d'impulsions MLI, est de comparer le signal de référence ou la modulante sinusoïdale avec une porteuse triangulaire de haute fréquence. Elle consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps(14).

#### **III.4.a. Avantages de la commande modulation de largeur d'impulsion**

Cette méthode de commande permet:

- D'éliminer de certaines harmoniques de tension ;
- De repousser les harmoniques à des fréquences plus élevés ;
- De faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie(12).

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

## III.5. Redresseur MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture grâce à la boucle de contrôle.

La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que, les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée(12).

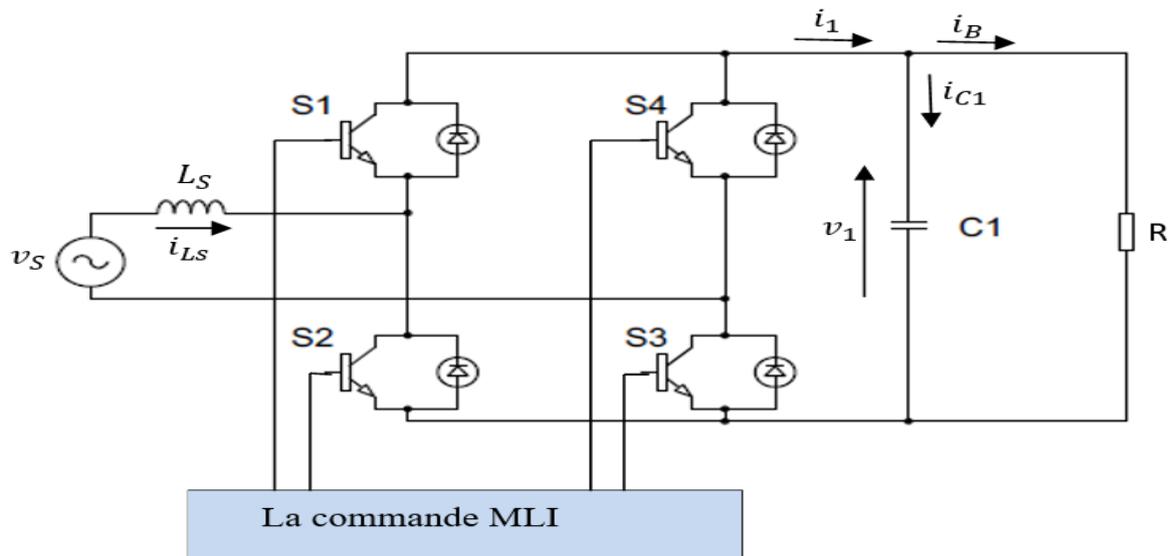


Figure III.4 : Schéma de redresseur MLI monophasé.

### III.5.a. Différents types de redresseur MLI

Redresseur à MLI de courant.

Redresseur à MLI de tension.

### III.5.b. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée. Pour cela, il faut régler cette tension de sortie en fonction de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence. La sortie du régulateur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur(15).

### III.5.c. Redresseurs MLI à absorption sinusoïdale

Différente de la version classique, une nouvelle structure de conversion AC/DC, où le courant peut être contrôlé. Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions MLI, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO.

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

Dans ce cas, le dispositif de filtrage est généralement nommé circuit de modulation en raison du fait qu'il impose aux courants une forme oscillante à haute fréquence autour d'une consigne désirée. La fréquence de modulation est déterminée par la fréquence de commutation des interrupteurs, elle-même imposée par le circuit de commande associé.

Ce type de dispositif est le plus utilisé actuellement dans les applications de faible, moyenne et forte puissance, et la présence d'éléments actifs de filtrage permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives(16).

### III.6. Modélisation de redresseur actif

Le redresseur est directement lié au réseau assurant la conversion de l'énergie de l'alternative en continu et vice versa tout en maintenant une tension de bus constante(7).

On notera que la commutation des interrupteurs par  $S_i$  avec ( $i=1,2,3,4$ )

Pour être plus précis, une paire d'interrupteur S1/S2, S3/S4 fonctionne en permanence

- Si S1-S3 est fermé S2-S4 ouvert.
- Si S2-S4 est fermé S1-S3 ouvert.

Les fonctions de commutation du redresseur actif sont :

$$\begin{cases} S_1 = S_3 = 1 - S_2 \\ S_2 = S_4 = 1 - S_1 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Et la tension d'entrée s'exprime par :

$$v_{A1A2} = \begin{cases} v_1 & \text{si } S_1 = 1 \\ -v_1 & \text{si } S_1 = 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$v_{A1A2} = v_1 s_1 - v_1 \bar{s}_1 = v_1 (s_1 - \bar{s}_1) \quad (\text{III.3})$$

$$\text{avec } \bar{s}_1 = (1 - S_1)$$

$$= v_1 (2s_1 - 1)$$

D'où  $d = s_1$

$$v_{A1A2} = v_1 (2d - 1) \quad (\text{III.4})$$

Ce qui nous donne un courant de sortie du redresseur de la forme :

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

$$i_1 = \begin{cases} i_{Ls} & \text{si } s_1 = 1 \\ -i_{Ls} & \text{si } s_1 = 0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{Ls}s_1 - i_{Ls}\bar{s}_1 = i_{Ls}(s_1 - \bar{s}_1) \\ &= i_{Ls}(2s_1 - 1) \\ i_1 &= i_{Ls}(2d - 1) \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Le modèle d'état du redresseur actif est donnée par l'équation (III.7) :

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{Ls}}{dt} = v_s - v_{A1A2} = v_s - v_1(2d - 1) \\ C1 \frac{dv_1}{dt} = i_1 - i_B = i_{Ls}(2d - 1) - i_L(2s_{11} - 1) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Le fonctionnement du redresseur peut être représenté par le modèle suivant :

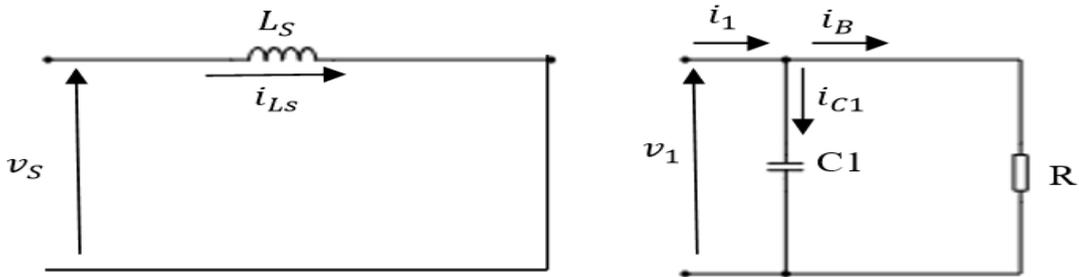


Figure III.5 : Modèle du redresseur.

### III.7. Contrôle du redresseur

La Figure III.6 détail la commande du redresseur. Que ce soit en mode redresseur ou onduleur, le contrôle de ce module ne diffère pas. La boucle de régulation de la tension du bus intermédiaire génère la référence d'amplitude de la boucle d'asservissement du courant. Il s'agit d'un contrôleur proportionnel intégral pour la tension et une commande proportionnel pour le courant.

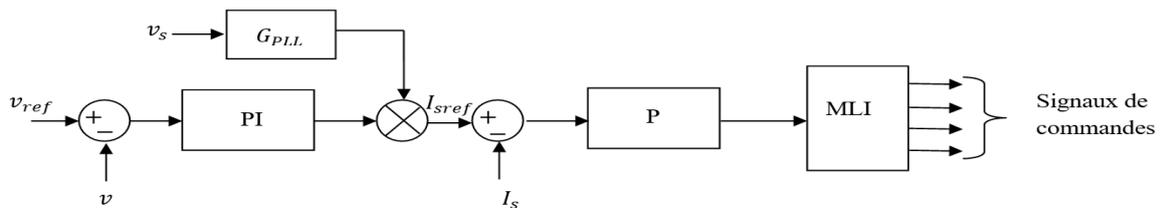


Figure III.6 : Synoptique de contrôleur du redresseur.

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

La fréquence et la phase de la tension du réseau sont détectées par le module de synchronisation (GPLL) et une référence sinusoïdale d'amplitude unitaire est générée. Cette dernière est multipliée par la sortie du régulateur de tension. La référence du courant de ligne est ainsi créée. Le régulateur de courant, un contrôleur proportionnel, multiplie l'erreur par un gain pour ensuite l'envoyer au modulateur de largeur d'impulsion(8).

### III.7.a. Module de synchronisation

Le redresseur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est donc d'obtenir la phase et l'amplitude de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle de verrouillage de phase (PLL, Phase Locked-Loop). Cette PLL permet d'estimer la fréquence, la pulsation, la phase instantanée et l'amplitude de vecteur tension réseau(15).

Le schéma suivant nous explique le principe de la PLL :

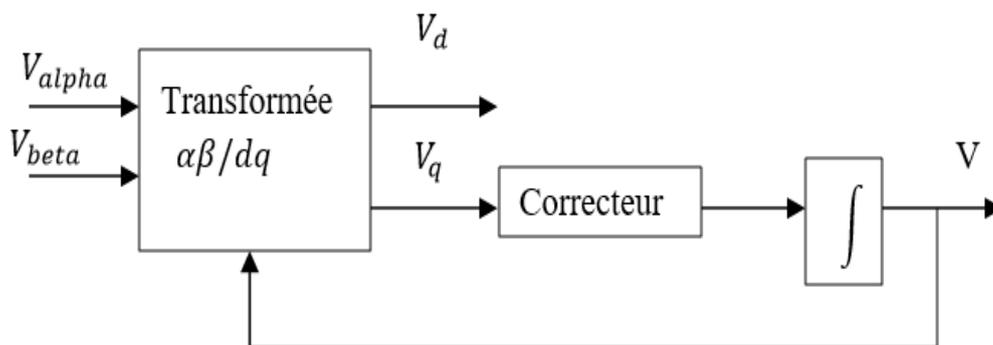


Figure III.7 : Synoptique de la PLL.

### III.8. Modèle de simulation de redresseur MLI a absorption sinusoïdale

La conception du redresseur est vérifiée à l'aide de la simulation complète du modèle sous MATLAB/Simulink et SimPowerSystems

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

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

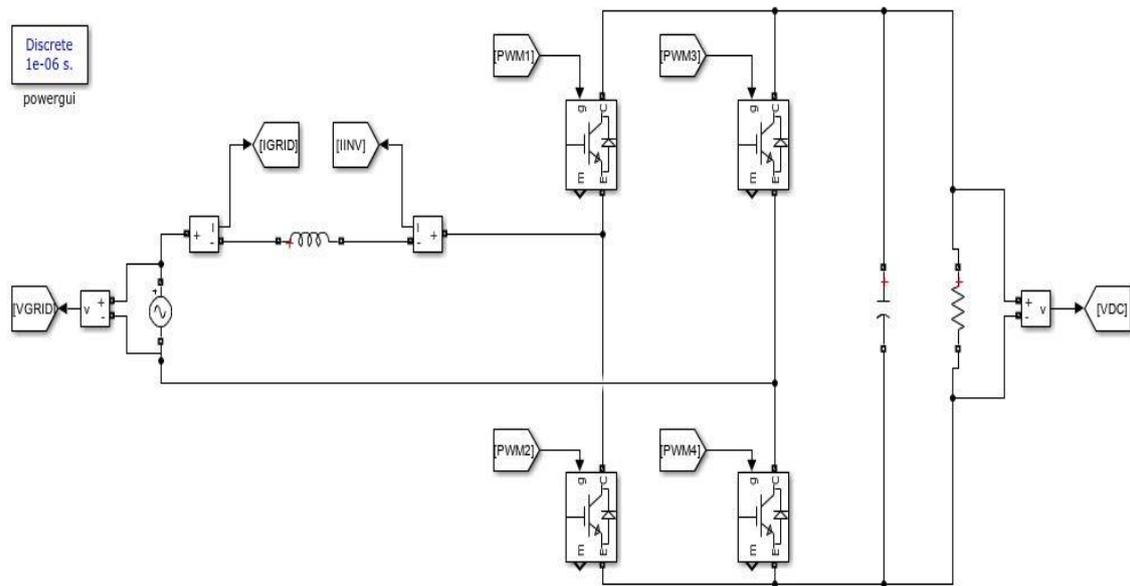


Figure III.8 : Schéma MATLAB/Simulink du redresseur.

La figure ci-dessus présente le modèle de la MLI sous MATLAB/Simulink :

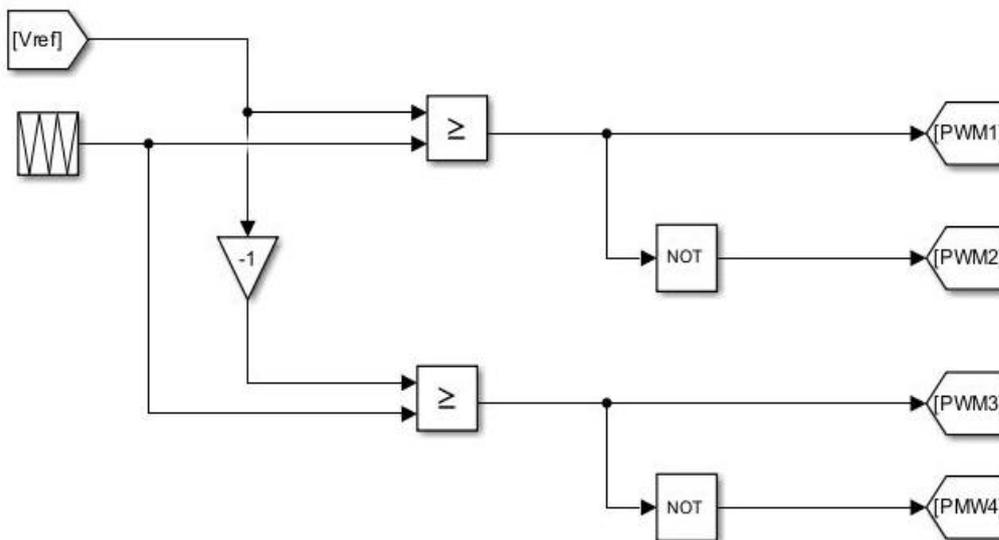


Figure III.9 : Schéma MATLAB/Simulink du PWM.

La figure ci-dessus présente le modèle de la PLL sous MATLAB/Simulink :

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

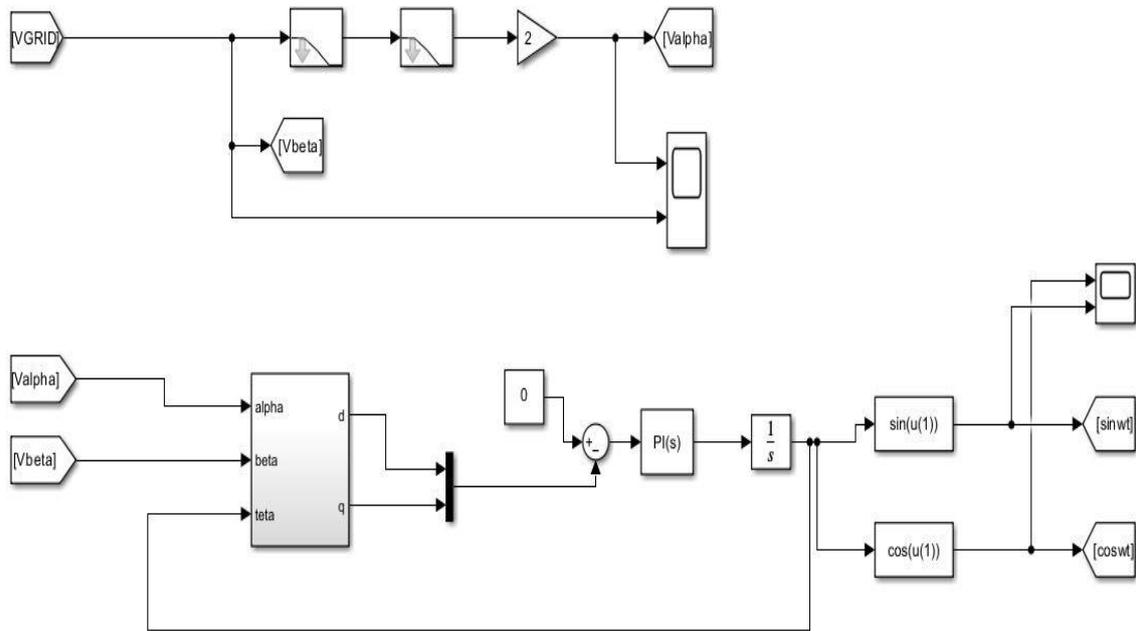


Figure III.10 : Schéma MATLAB/Simulink du la PLL.

La figure ci-dessus présente le modèle de contrôle de redresseur sous MATLAB/Simulink :

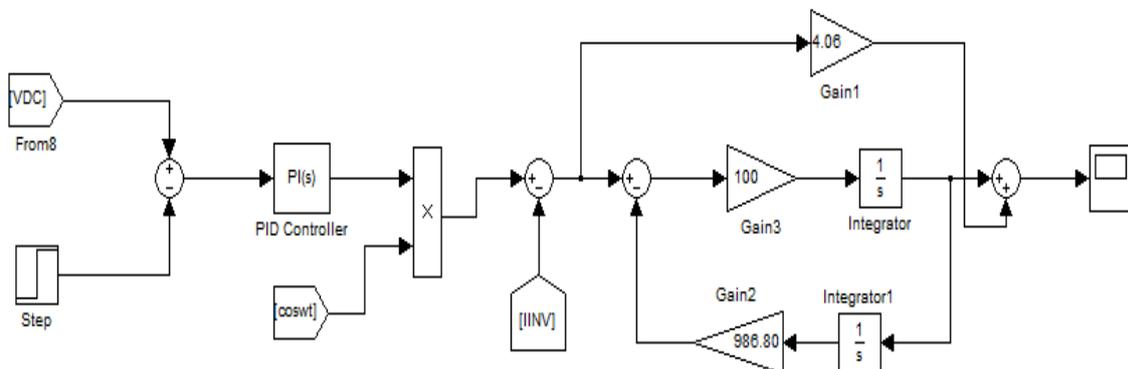


Figure III.11 : Schéma MATLAB/Simulink du contrôle de redresseur.

Les paramètres de simulation de Redresseur MLI utilisés sont donnés dans le tableau suivante :

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

Tableau 2 : Paramètres de simulation de Redresseur MLI.

$V_s$	55	V
$L_s$	4060	$\mu\text{H}$
$C$	3000	$\mu\text{F}$
$R$	80	$\Omega$
$f$	50	Hz
$V_{dc}$	100	V

## III.8.a. Résultats de simulation

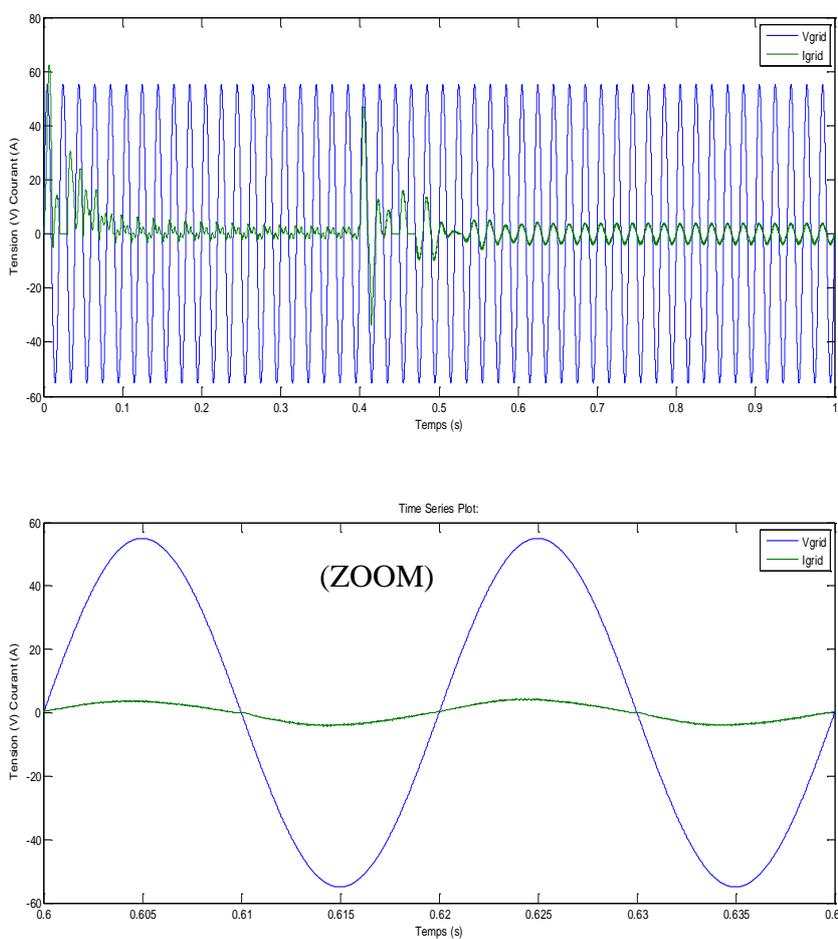


Figure III.12 : Allure de la tension et le courant d'entrée de redresseur.

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

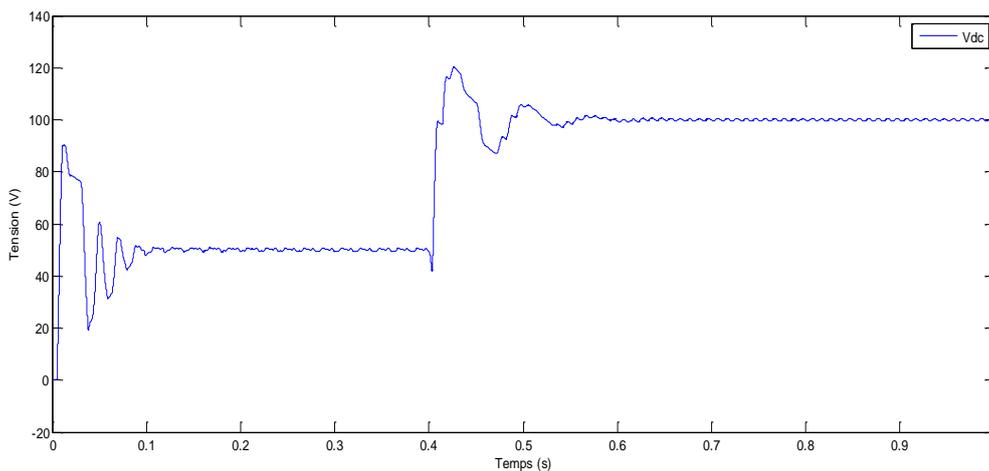


Figure III.13 : Allure de la tension présente aux bornes de la charge.

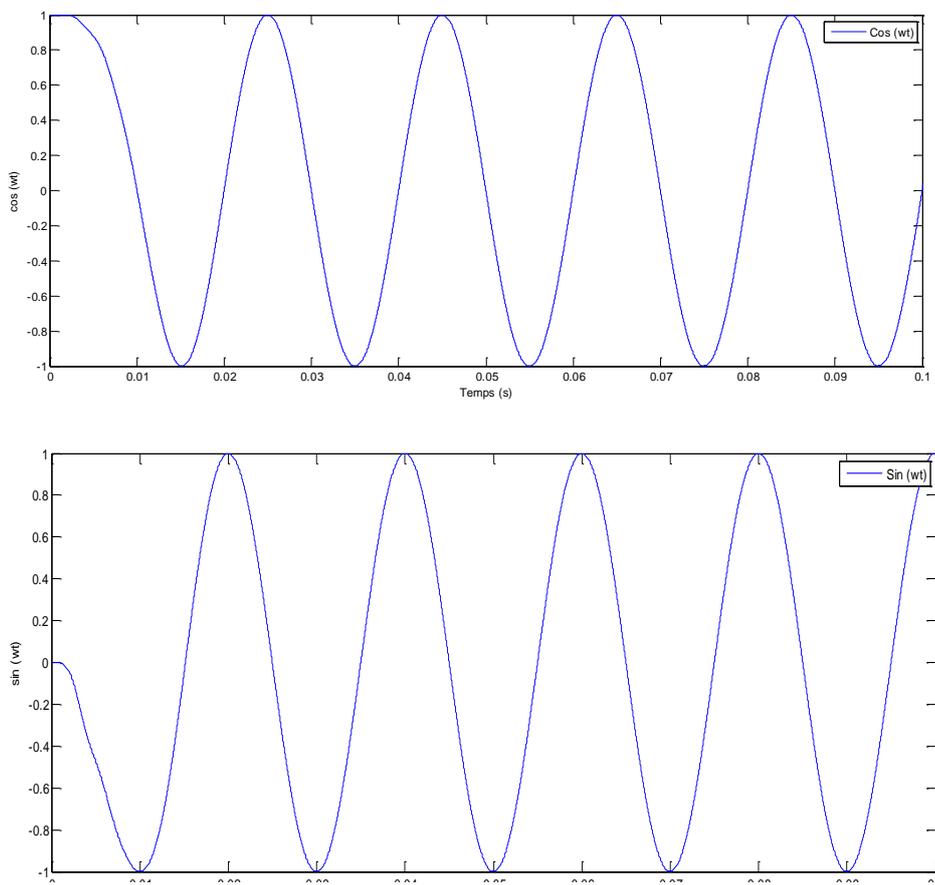


Figure III.14 : Résultats de simulation de la PLL.

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

## III.8.b. Interprétation des résultats

La figure III.12 montre le courant en régime permanent ; nous remarquons que ce dernier est en phase avec la tension. A partir de la forme du courant et la tension, il est clair que ces derniers sont sinusoïdal.

D'après la figure III.13 montre l'allure de la tension aux bornes de la charge, on remarque que cette dernière suit à sa référence.

La figure III.14 représente les résultats de simulation de la PLL, les tensions à l'entrée de la PLL sont effectivement sinusoïdales. Ce qui permet de dire que la PLL fournit des résultats acceptables.

## III.9. Chargeur à double pont actif monophasé avec une charge résistive

La topologie de la figure III.15 est un chargeur à double pont actif monophasé. Bien que ce circuit offre une densité de puissance élevée et une commande rapide, le grand nombre de composants peut augmenter le coût.

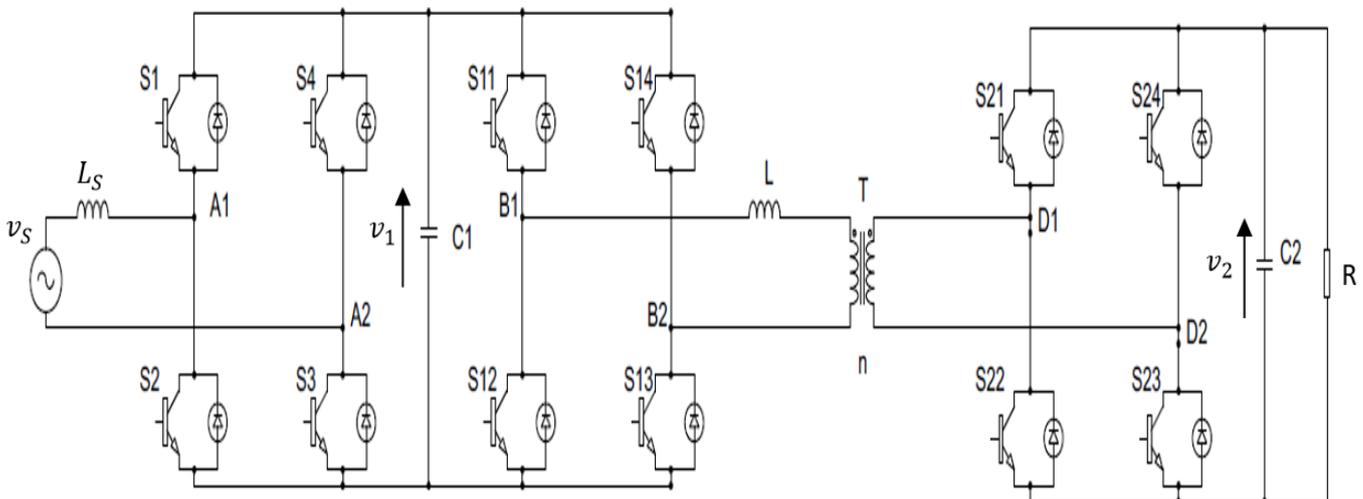


Figure III.15 : Chargeur à double pont actif monophasé.

### III.9.a. Modèle de simulation

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

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

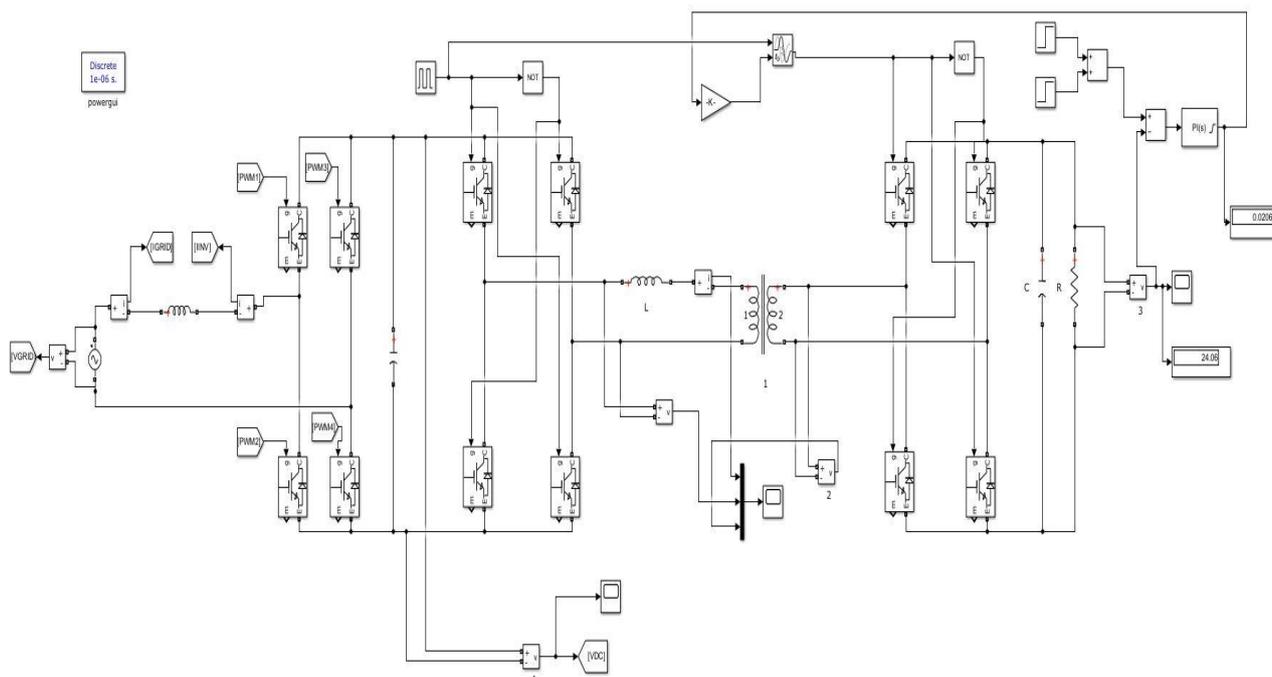


Figure III.16 : Schéma chargeur à double pont actif monophasé sous MATLAB/Simulink.

Les paramètres de simulation de chargeur à double pont actif monophasé utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Paramètres de simulation chargeur à DAB monophasé.

$V_s$	55	V
$f_s$	50	Hz
$V_{dc}$	100	V
$n$	2	-
$V_p$	50	V
$V_s$	25	V
$L$	10000	$\mu\text{H}$
$L_s$	4060	$\mu\text{H}$
$R$	2	$\text{m}\Omega$
$C_1$	3000	$\mu\text{F}$
$C_2$	660	$\mu\text{F}$
$f$	$10 \cdot 10^3$	Hz

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

## III.9.b. Resultats de simulation

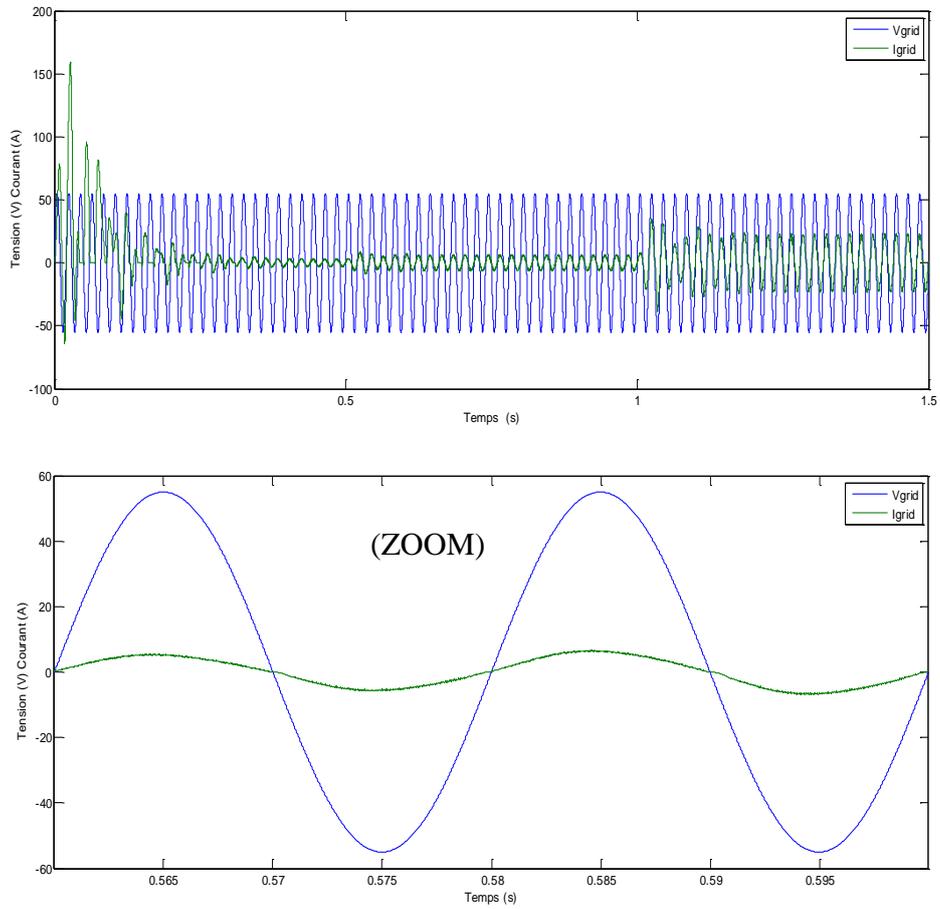


Figure III.17 : Allure de la tension et le courant d'entrée.

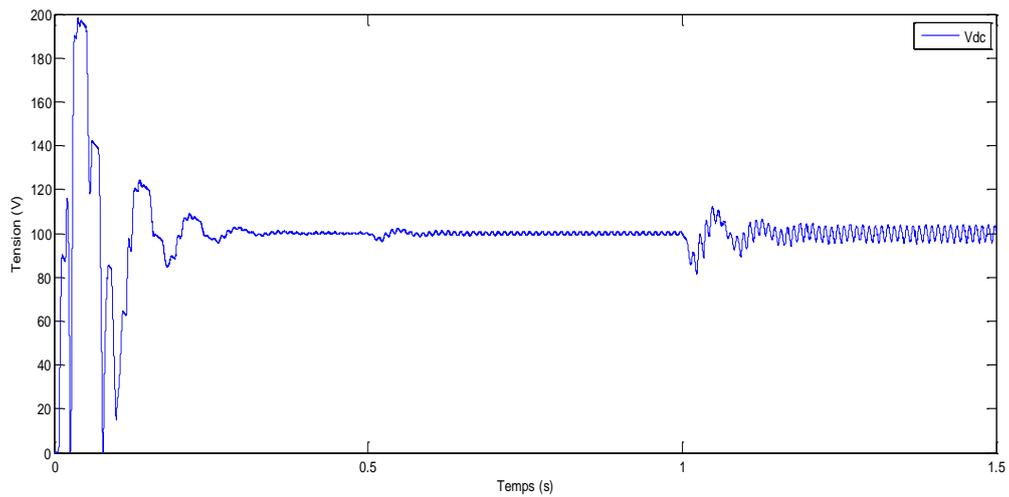


Figure III.18 : Allure de la tension de sortie du redresseur.

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

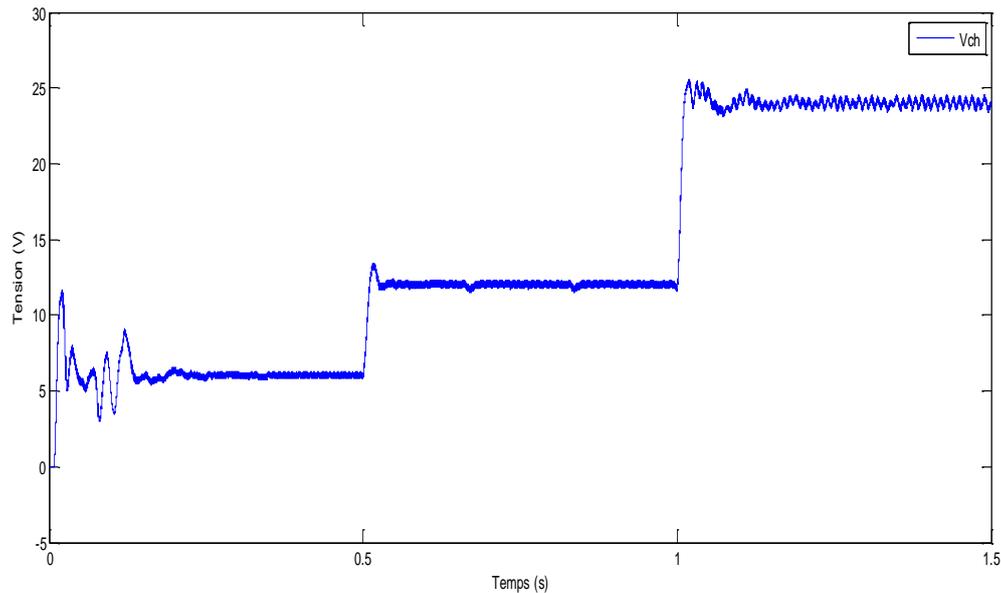


Figure III.19 : Allure de la tension présente aux bornes de la charge.

### III.9.c. Interprétation des résultats

La figure III.17 montre la tension  $v_S$  et le courant  $i_{LS}$  absorbé par le chargeur. Ils sont bien en phase. En d'autres termes nous observons la bonne synchronisation de la phase du courant avec la tension et que le facteur de puissance égale à 1, l'absorption sinusoïdale est vérifié.

La figure III.18 présente l'allure de la tension de sortie de redresseur, on remarque que cette dernière effectue un très léger dépassement avant de se stabiliser sur la valeur de référence imposée par Le contrôle.

La figure III.19 montre l'allure de la tension présente aux bornes de la charge. D'après la simulation de chargeur comprenant un contrôle de redresseur et DAB monophasé, La variation de la tension de la charge R suit sa référence.

### III.10. Chargeur à double pont actif monophasé avec une charge de batterie

La topologie de la figure III.20 est un chargeur à double pont actif monophasé avec une charge de batterie. Les paramètres de la simulation restent les mêmes que dans la simulation précédente, mais nous pouvons également inclure des paramètres de la batterie.

Les paramètres de simulation de la batterie utilisés sont donnés dans le tableau suivante :

## Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

Tableau 4 : Paramètres de simulation de la batterie.

Tension nominal	12	V
Capacité de la batterie	110	Ah
Etat initial de la batterie	45	%

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

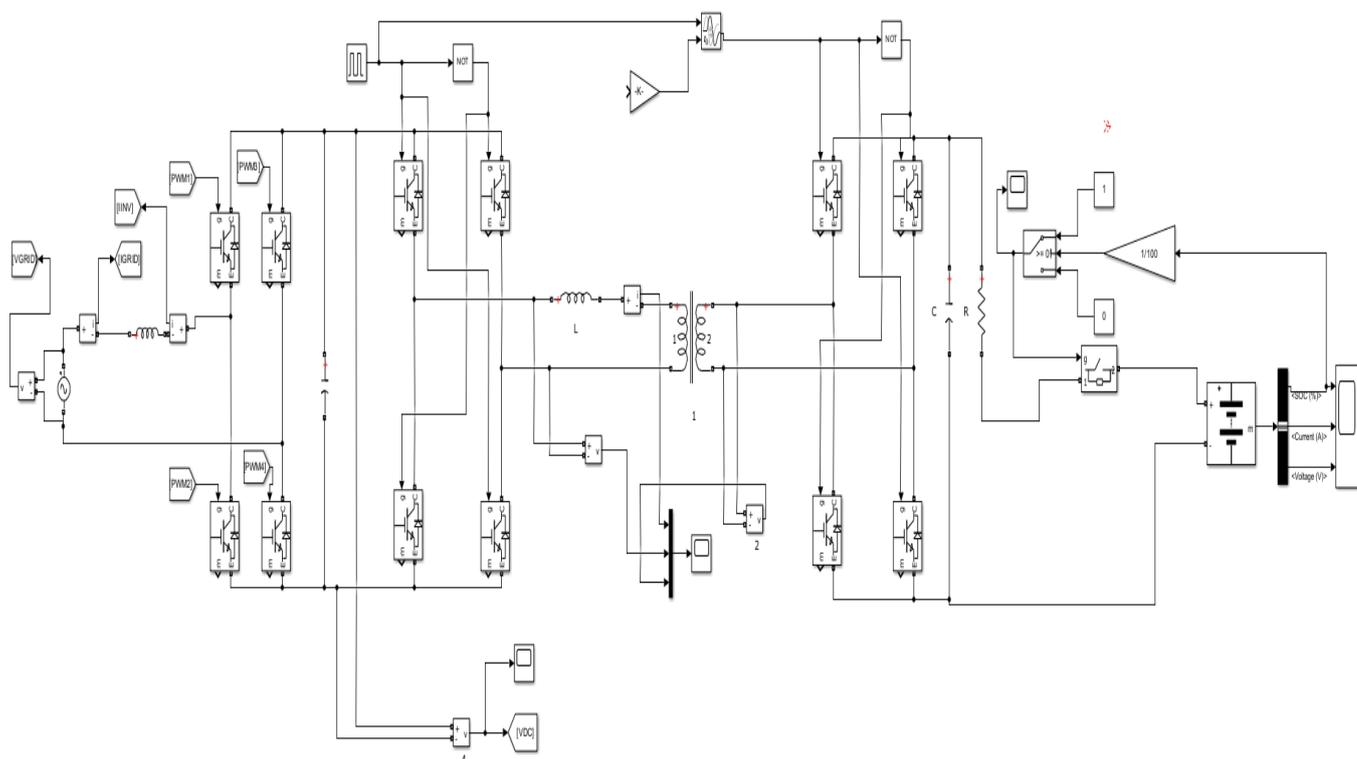


Figure III.20 : Schéma chargeur à double pont actif monophasé avec une charge de batterie sous MATLAB/Simulink.

# Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie

## III.10.a. Resultats de simulation

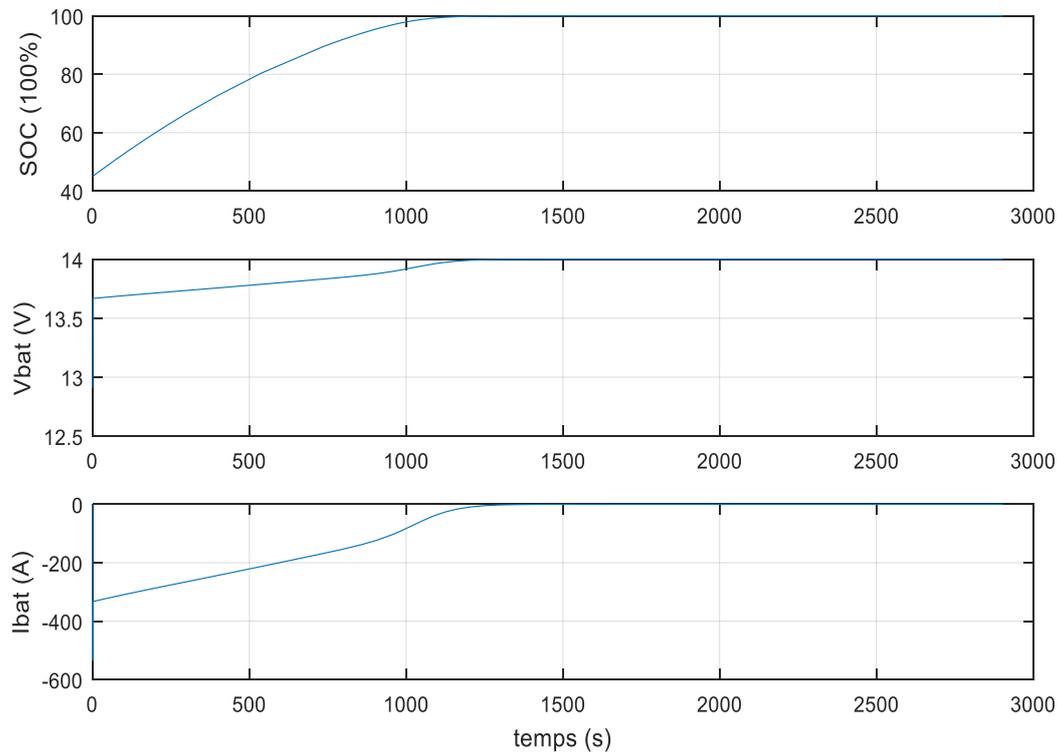


Figure III.21 : Résultats de simulation aux bornes de la batterie.

## III.10.b. Interprétation des résultats

La Figure III.21 représente les résultats de simulation aux bornes de la batterie tel que l'état de charge (SOC%), la tension et le courant.

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

- L'état de charge de la batterie a augmenté de 45 % à 100 % ;
- Cela a pris environ 1200 secondes (20 minutes) ;
- Une fois la batterie complètement chargée, le courant passe à zéro ;
- Le signe négatif indique que le courant va du convertisseur vers la batterie ;
- La tension de la batterie a atteint la valeur souhaitée de 14 volts.

En résumé ces informations semblent décrire un processus de charge de la batterie. Au début, la batterie était à 45 % de charge, et elle a été chargée jusqu'à atteindre 100 %. Pendant cette période de charge, le courant a été fourni par un convertisseur et a alimenté la batterie (d'où le signe négatif). Une fois la batterie complètement chargée, le courant a cessé de circuler, et la tension de la batterie a atteint la valeur souhaitée de 14 volts.

## **Convertisseur DAB monophasé pour application chargeur de batterie**

Cela suggère que la batterie a été chargée avec succès et qu'elle est prête à être utilisée.

### **III.11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous sommes concentrés sur la conception d'un chargeur de batterie bidirectionnel isolé. Nous avons présenté une topologie pour le premier étage du chargeur, qui utilise un redresseur. Cette structure est capable de s'adapter aux sources d'alimentation triphasées et monophasées, et permet tous les échanges de puissance possibles entre la source et la batterie. Le convertisseur a été conçu de manière à obtenir un facteur de puissance proche de l'unité et à minimiser le courant de ligne. Il offre de bonnes performances, même en cas de changement de charge.

Les résultats ont démontré un comportement dynamique approprié de la tension du bus CC, de la tension de la batterie et du courant de la batterie. Les harmoniques du courant de ligne sont fortement réduits grâce à l'utilisation de la technique de contrôle proposée.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de mener une recherche approfondie sur la modélisation et la simulation d'un convertisseur double pont actif monophasé pour application chargeur de batterie. Ce convertisseur comporté en générale deux étages de conversion (DC-AC et AC-DC) sont bidirectionnels.

Pour notre étude nous avons choisi d'utiliser une structure de type DAB (double pont actif). Cette structure nous permet d'isoler les hautes fréquences, d'ajuster le niveau de tension de sortie et de profiter d'une commutation douce (ZVS) pour tous ses ponts actifs.

Après avoir, modélisé le double pont actif monophasé (DC-DC) et le redresseur actif (AC-DC), nous avons élaboré les systèmes d'équation de leurs circuits ainsi que leurs modèles moyennes. Nous avons également présenté le principe de fonctionnement de chaque modèle.

Nous avons validé le fonctionnement du convertisseur DAB avec un régulateur PI et de redresseur monophasé à absorption sinusoïdale avec une commande MLI en simulation, nous avons analysé les résultats de simulation en régime permanent. Le courant et la tension obtenu côté réseau été sinusoïdaux, et la tension de sortie a été contrôlée selon nos besoins.

Une fois la simulation du système terminé, une batterie de 12 volts a été ajoutée pour être chargée. Les résultats de la simulation permettent de vérifier les performances du chargeur de batterie et de s'assurer qu'il est capable de charger la batterie de manière efficace et sûre.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] **BRANDELERO, Julio.** « *Conception et réalisation d'un convertisseur multicellulaire DC/ DC isolé pour application aéronautique* ». s.l. : THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE , 28/05/2015.
- [2] **Lukic, S.M., Huang, Alex Q. et Du, Yu.** « Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure ». September 2011, Vol. pp555.
- [3] **ROSAS, Damian SAL Y.** « *Etude et conception de convertisseurs réversibles multi-sources isolés pour l'interfaçage au réseau de sources d'énergies renouvelables et de moyens de stockage* ». s.l. : THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, 15 juin 2017.
- [4] **KRISMER, FLORIAN.** « *Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter Topologies* ». s.l. : THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE Wien born 11. April 1978 citizen of Austria, 2010.
- [5] **PHUNG, Thanh Hai.** « *Conception d'un équilibreur de charge de batterie à base du réseau de micro-convertisseurs* ». s.l. : THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 20/12/2013.
- [6] **Nam, N.N et Kim, S.H.** « Robust Tracking Control of Dual-Active-Bridge DC-DC Converters with Parameter Uncertainties and Input Saturation » 12 December 2022.
- [7] **JARRAYA, Fatma.** « *Étude et modélisation d'un convertisseur double pont actif triphasé pour application chargeur de batterie d'un véhicule électrique* ». MONTRÉAL : MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE M. Sc. A., 22 AOÛT 2019.
- [8] **CARON, Maxime.** « *CONCEPTION ET MISE AU POINT D'UN MODULE DE CONNEXION RÉSEAU MODULAIRE, BIDIRECTIONNEL EN COURANT ET ISOLÉ* ». MONTRÉAL : MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 9 janvier 2012.
- [9] **Chauchat, Bertrand.** « *chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique* ». s.l. THÈSE DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE , 28 Novembre 1997.
- [10] **LACROIX, Samantha.** « *Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries* ». s.l. : THÈSE DE DOCTORAT, ÉCOLE DOCTORALE : STITS Laboratoire de Génie Electrique de Paris, 29/05/2013.
- [11] **Yilmaz, Murat et Krein, Philip T.** « Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles ». MAY 2012, Vol. 28, 5.
- [12] **Wassila, Bensalah et Boutaleb, Nour el Houda.** « *Etude de la commande des redresseurs MLI* ». s.l. : mémoire de fin d'études Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent Institut des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique, 2015/2016.
- [13] **Sofiane, MEZIANI.** « *Etude et réalisation de la commande par DSP d'un convertisseur AC/DC* ». s.l. : mémoire de Fin d'Etudes pour Obtenir le diplôme de MAGISTER EN ELECTROECHNIQUE, 25/06/2012.

## Bibliographie

[14] **Souhila, Dechoucha. et Bourezg., Ouarda.** « *Conception des techniques MLI dédiées à la commande des convertisseurs DC/DC et DC/AC à base du microcontrôleur PIC18F4431* ». s.l. : Mémoire de Fin d'Etudes de Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016 /2017.

[15] **Nassim, BOUKHARI et STITI, Lyazid.** « *Commande d'un redresseur triphasé à MLI* ». Tizi-Ouzou : Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE Faculté De Génie Electrique Et D'informatiqueDEPARTEMENT D'Electrotechnique, 24 Septembre 2014.

[16] **Ahmed, Mr TEKAMERA Sid et Mr BAKOUR, Fouad.** « *Commande en puissance d'un redresseur Vienna* ». *Application dans un système de conversion d'énergie autonome.* BEJAIA : Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique Spécialité : Electrotechnique Industrielle, 2019/2020.