



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : machines Electriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Lasгаа Habib Chaouki

Le : lundi 25 juin 2018

Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible

Jury :

Mr	CHARROUF Omar	MAA	Université Mohamed Khider Biskra	Président
Mr	SAADI Ramzi	MCB	Université Mohamed Khider Biskra	Encadreur
M ^{eme}	BENYAHYA Naima	MAA	Université Mohamed Khider Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.

*Nous remercions Très sincèrement Mr. **RAMZI SAADI** notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions à grandement facilité ce travail.*

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département Génie électrique, qui ont encouragé à donner le meilleur d'eux même en Nous assurant une formation aussi meilleure que possible, et particulier

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

L. HABIB CHAOUKI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A celle qui a attendu avec impatience les fruits de

Sa bonne éducation ... ma chère mère.

A celui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant

Que la volonté fait toujours les grandes personnes

Mon cher père. رحمه الله

A mes sœurs

A mon frères

A mes amies

A mes amis(es) et camarades du primaire jusqu'à l'université

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

HABIB CHAOUIKI

Résumé

La pile à combustible est un système de production d'énergie, qui tire profit de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène pour produire de l'électricité et de la chaleur tout en ne rejetant que de l'eau. Généralement une pile à combustible a une faible tension de sortie et une réponse lente en raison de la dynamique de ses auxiliaires. Pour cette raison, un convertisseur basse tension DC / DC est nécessaire pour élever la faible tension de quelques centaines de volts pour alimenter la charge. Ce mémoire s'intéresse à l'étude de la modélisation et la commande d'un convertisseur basse tension DC / DC non-isolé avec un rapport de transformation élevé pour les applications pile à combustible. Le convertisseur proposé est un BOOST entrelacé (IBC). Le choix de convertisseur est basé sur deux critères : le taux de perte et le rendement du convertisseur avec une tension de sortie élevée et une faible ondulation du courant d'entrée. La commande de convertisseur est assurée par une commande à deux boucles qui contient initialement une boucle de tension avec un régulateur linéaire PI et une boucle rapide de courant avec un régulateur non linéaire par mode glissant pour le convertisseur (IBC).

MOTS CLES :

Convertisseur entrelacé, IBC, pile à combustible ondulation du courant, convertisseur DC-DC non isolé, boucle de tension, régulateur linéaire PI

Abstract

Fuel cell is an energy supply system, which takes advantage of the electro-chemical reaction between oxygen and hydrogen to produce electricity and heat, water as its by-product. Usually a fuel cell has low output voltage and slow response due to the dynamic of its auxiliaries. For this reason, a DC/DC converter is required to set up the low voltage to a few hundred volts to supply load. This thesis concerns the study, modelling and control of a non-insulated DC / DC low voltage converter with a high transformation ratio for fuel cell applications. The proposed converter is an interlaced boost (IBC). The converter choice is based on the least losses and the best efficiency of the converter with a high output voltage and low ripple of the input current. Converter control is provided by a two-loop control, which initially contains a voltage loop with a PI linear controller and a fast current loop with a non-linear sliding mode controller for the converter (IBC)

KEYWORDS :

Converter (IBC), sliding mode, non-insulated, DC / DC low voltage converter, PI linear controller.

LISTE DES FIGURES	pages
Figure I.1: principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.....	6
FigureI-2 : <i>Différents constituants d'une cellule</i>	7
Figure I-3 : Structure et exemples de stack.....	8
FigureI-4 : le principe fonctionnement.....	10
figureI-5 : consistant de pile (PEMFC).....	10
FigureI-6 : Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.....	11
FigureI-7 : unité de pile combustible.....	12
FigureI-8 : station hydrogène.....	13
FigureI-9 : Pile Ballard Mark 90véhicule Ford FC.....	13
Figure I-11 : Convertisseur isolé avec transformateur : Flayback.....	16
Figure I-12 : Convertisseur push-pull.....	17
Figure I-13 : Formes d'ondes de convertisseur de type push-pull.....	17
Figure I-14 : Convertisseur en demi-pont.....	18
Figure I-15 : Les formes d'ondes de ce convertisseur.....	18
Figure I-16 : Convertisseur Isolé avec Interrupteur Résonant.....	19
Figure I-17 : convertisseur boost.....	20
Figure I-18 : Formes d'ondes du convertisseur Boost (courants à gauche, tension à droite).....	20
Figure I-19 : Convertisseur Buck abaisseur.....	21
Figure I-20 : formes d'ondes du convertisseur Buck (courant à gauche, tension à droite)	21
FigureI-21 : Convertisseur BUCK-BOOST.....	22
Figure I-22 : formes d'ondes du convertisseur Buck-boost courant à gauche tension à droite.....	23
Figure I-23 : Convertisseur BOOST entrelacé à 2 branches.....	24
Figure I-24 : commande des transistore d'IBC.....	25
Figure. I-25 : Courants dans les inductances et dans la source.....	25
Figure : I-26 courant et tension ou bornes de transistor.....	25
Figure I-27 : Tension de sortie d'IBC.....	25
Figure I-28 : Courant et tension aux bornes de diode.....	25

Liste Des Figures et Liste des Tableaux

Figure II-1 : Structure du convertisseur étudié.....	30
Figure II-2 :L'architecture de la stratégie de commande.....	33
figure III-1 schéma bloc de simulation de 1 er teste (mode glissant).....	38
Figure III-2 : variation de courant de référence de 4 à 9(A).....	39
Figure III-3 : des courants de l'inductance L11 après variation de courant de référence de 4 à 9A.....	39
Figure III-5 : variation de courant de référence de 10 à 5(A) par inversement.....	40
Figure III-6 : les courant i_{L11} et i_{L12} de (ibc) après la variation de courant i_{ref}	40
Figure III-7 : schéma bloc de commande à deux boucles par variation de la charge.....	42
Figure III-8 : courant de charge i_{ch}	42
Figure III-9 : courant de l'inductance i_{L11} de (ibc) par variation de charge.....	43
Figure III-10 : courant de l'inductance i_{L12} (ibc) par variation de charge.....	43
Figure III-11 : tension de sortie de convertisseur (ibc) par variation de charge.....	44

Liste des Tableaux

Tableau I-2 Comparaison entre les piles combustible.....	9
Tableau I-1: Récapitulatif des prix en € au kW pour une PAC de type PEMFC.....	14
Tableau I-3 : Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé.....	27
Tableau III-1 Les paramètre de convertisseur proposé.....	37

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures et tableaux	
introduction générale.....	02
 chapitre I :Généralité sur la pile à combustible et les convertisseurs DC/DC isolé et non-isolé	
I.1 Introdition.....	05
I.2 Historique principe de fonctionnement.....	06
I.3principe de fonctionnement	06
I.4 LES COMPOSANTS DE LA PILE COMBUSTIBLE	07
I.4.1 Cellule unitaire	07
I.4.2 Stack (aussi appelé module en français)	08
I.5 Les différents types des piles a combustible	08
I.6 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)	10
I.7 Applications des piles à combustibles	11
I.7.1 Applications portables	11
I.7.2 Applications stationnaires	12
I.7.3 Applications dans le transport	12
I.8 Avantages et inconvénients des piles à combustible	13
I.9 Les convertisseurs dc-dc pour les application des piles a combustible	15
I.9.1Convertisseurs statiques basse tension continu-continu isolé	15
I.9.1.1Convertisseur Flyback	15
I.9.1.2Convertisseur push-pull	17
I.9.1.3 Convertisseur en demi pont :Onduleur alimenté en tension	18
I.9.1.4 Convertisseur Isolé avec Interrupteur Résonant	19
I.9.2 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé	19
I.9.2.1 Le convertisseur boost	19
I.9.2.2 Convertisseur Buck abaisseur	21

I.9.2.3 Convertisseur Buck-Boost.....	22
I.9.2.3 Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)	24
I.10 Contraintes sur les composants	26
I.10.1 Inductance en entrée.....	26
I.10.2 Ondulation du courant dans l'inductance.....	26
I.10.3 Semi conducteur	26
I.10.4 Capacité.....	27
I.11 le choix du convertisseur DC/DC boost entrelacé (IBC).....	27
I.12 conclusion.....	28
chapitre II: la modélisation et la commande de la convertisseur	
Introduction.....	30
II.2 Modélisation de convertisseur proposé(entrelacé IBC).....	30
II.3 Les équations différentielles du convertisseur IBC , en valeur moyenne	31
II.4 Stratégie de commande du convertisseur (ibc) proposé	32
II.5 La commande avec deux méthode.....	32
II.6 Régulateur de courant par mode glissant.....	33
II.7 Conclusion.....	35
chapitre III : résultat de simulation et interprétation	
III.1 Introduction	37
III.2 Tests des régulateurs de courant.....	37
III.3 Les paramètre de convertisseur proposé et le schéma bloc de simulation.....	37
III.4 teste avec la commande de boucle interne (mode glissant).....	38
III.5 résultat de simulation	39
III.6 Interprétation	41
III.6 teste avec la commande globale à deux boucle.....	41
III.7 résultats de simulation.....	42
III.8 Interprétation	44
III.9 Conclusion.....	45
conclusion générale.....	47
Références Bibliographique	

Introduction générale

Actuellement, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde. Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres doivent donc être considérées. Une nouvelle source possible est la pile à combustible (en Anglais : Fuel Cell, FC), dont le principe a été découvert par Sir William Grove en 1839.

Une pile à combustible utilise l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité, sans pollution. Les autres produits sont simplement de l'eau pure et de la chaleur. Les scientifiques ont déjà créé et continuent à développer différents types de piles à combustible, caractérisées par la nature des gaz et de l'électrolyte utilisé, déterminant ainsi ses caractéristiques de fonctionnement. Un type prometteur, léger et facile à construire, est la pile à membrane électrolyte polymère (PEMFC), cette dernière est employée dans plusieurs domaines en raison de sa longue durée de vie et de sa puissance considérable.

Pour les systèmes portables, une pile à combustible couplée à un réservoir de carburant peut offrir une densité de stockage d'énergie plus élevée et plus commode que les batteries conventionnelles. Pour les applications dans les transports, les piles à combustible offrent un meilleur rendement, que les moteurs thermiques conventionnels couplés à des générateurs électriques. Pour les applications stationnaires de forte puissance, les piles à combustibles peuvent être utilisées pour compléter le réseau électrique existant sans émettre, localement, de gaz polluants. De plus, les systèmes de pile à combustible peuvent être connectés directement à un bâtiment pour fournir la puissance électrique et thermique avec des efficacités de cogénération pouvant atteindre 80%.

Malgré le développement qu'ont connu les piles à combustible, la puissance électrique intrinsèquement délivrée sous forme d'une basse tension et d'un fort courant reste toujours l'un de ces points faibles. En fait, l'exploitation de sa charge bus DC constitue une véritable entrave, car elle exige le recours à plusieurs convertisseurs DC-DC, qui assurent l'adaptation de la tension de sortie de la pile à la tension d'utilisation du bus DC, comme ils prennent en charge le conditionnement de la tension de sortie de la pile qui varie fortement avec la charge et la réduction de l'ondulation du courant.

notre mémoire a un double objectif ; le premier est l'étude de la structure d'un convertisseur basse tension DC/DC servant à connecter une source de pile à combustible à un

DC charge. Le deuxième est d'expliquer comment on peut gérer et commander un tel type de convertisseur.

Ce mémoire se compose, en plus de l'introduction et de la conclusion générale, de trois chapitres :

Le premier chapitre est constitué de deux parties ; dans la première, nous présentons des généralités sur les piles à combustible et les différents types de « p à c » avec les conditions nécessaires à son fonctionnement. La deuxième partie est consacrée à la présentation des convertisseurs basse tension isolés et non-isolés pour les applications de pile à combustible. Nous nous sommes intéressé ensuite aux convertisseurs basse tension non-isolés permettant de réduire l'ondulation de courant d'entrée et la tension de sortie avec le choix du convertisseur convenable.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation et la stratégie de commande du convertisseur proposé. Concernant les stratégies de commande, on a présenté : une commande à deux boucles avec un régulateur de tension de type PI et un régulateur de courant par mode glissant pour les deux branches de convertisseur proposé.

Le dernier chapitre s'intéresse aux résultats de simulation et aux interprétations de courbes obtenues.

1.1 Introduction :

La pile à combustible connaît actuellement un regain d'intérêt tant au niveau industriel que recherche. Plusieurs secteurs industriels (électronique, téléphones cellulaires, ...) investissent dans le développement de cette technologie en raison de sa haute densité énergétique et de son faible taux d'émissions en gaz dangereux. [1]

Les cellules d'une pile à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique en électricité. Il existe différents types de cellules. L'une des technologies les plus prometteuses est la cellule à membrane échangeuse de protons (PEMFC) eu égard à ses faibles dimensions relatives, sa simplicité de mise en œuvre et son fonctionnement à basse température. [2]

Les piles à combustible sont une des technologies les plus propres et les plus efficaces pour produire de l'électricité. Comme il n'y a pas de combustion, il n'y a aucun des polluants couramment produits par les chaudières et les fours. Pour les systèmes conçus pour être alimentés directement avec de l'hydrogène, les seuls produits sortants sont l'électricité, l'eau et la chaleur. Elles sont considérées comme l'un des dispositifs les plus prometteurs pour les systèmes autonomes ou connecté au réseau de distribution en raison de sa propreté, de sa modularité et son grand potentiel énergétique. Les obstacles à l'utilisation généralisée des piles à combustible résident essentiellement aux faits que leurs propriétés dynamiques sont faibles (ce qui limite les dynamiques de variations des charge) et que le coût d'installation est plus élevé. [3]

Ce chapitre introductif sur les piles à combustible poursuit plusieurs objectifs. On effectue tout d'abord un rappel historique de l'évolution des piles à combustible depuis leur découverte jusqu'à nos jours. On explique leur principe de fonctionnement et les composants de p à c. On présente ensuite les différents types de p à c. On déduit alors les avantages et les et les inconvénients technologiques réalisés de la pile à combustible et les applications des piles à combustible et la dernière partie on présente la différente structure du convertisseur DC-DC pour l'application des piles combustible.

1.2 Historique :

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis

T.Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C, pression de gaz de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisations technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI, et, à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes de nickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK) [4]

1.3 Principe de fonctionnement :

Par définition, la PAC, Fuel Cell (FC) en anglais, produit de l'électricité à partir d'une réaction chimique. Cette dernière est due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène ou d'air à travers une cathode. Un électrolyte, présent entre l'anode et la cathode, permet l'échange de charges électriques portées par des ions. Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge [5]

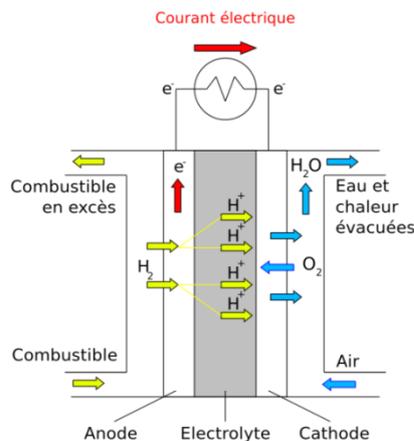
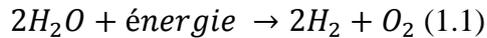
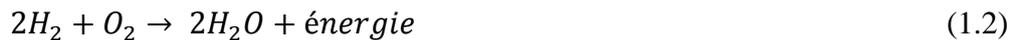


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-1 principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.**

Équation chimique de l'électrolyse :



Équation chimique de la pile à combustible :



1.4 LES COMPOSANTS DE LA PILE À COMBUSTIBLE

Les différents éléments, constituant le cœur de la pile à combustible, varient en fonction de la technologie. Mais avant cela, il est nécessaire de se familiariser avec le vocabulaire associé aux PAC. Pour cela, nous avons choisi de présenter la pile à membrane polymère (PEMFC) qui est actuellement l'une des PAC les plus commercialisées et sur laquelle s'axent,

1.4.1 Cellule unitaire :

- Chaque cellule d'une pile est constituée de plusieurs composants :
- la membrane qui permet le transport de protons et sépare le carburant de l'oxydant
- deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) et une cathode (collectrice d'électrons)
- deux couches de diffusion qui approvisionnent en gaz réactifs les électrodes
- deux plaques bipolaires qui alimentent en gaz et évacuent l'eau produite
- les joints d'étanchéité qui empêchent le carburant de l'anode et l'oxydant de la cathode de se mélanger mais également de fuir vers l'extérieur de la pile. Ils sont présentés dans le Figure et détaillés

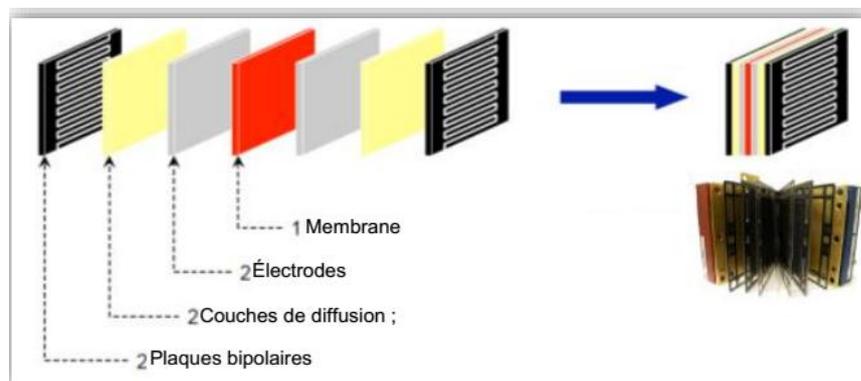


Figure1.2 : Différents constituants d'une cellule

1.4.2 Stack (aussi appelé module en français) :

Une cellule unitaire fournit une tension limitée. Pour obtenir une puissance suffisante, il est indispensable d'associer plusieurs cellules unitaires en série pour créer un assemblage appelé stack. En général, toutes les cellules sont empilées et connectées électriquement en série et fluidiquement en parallèle.

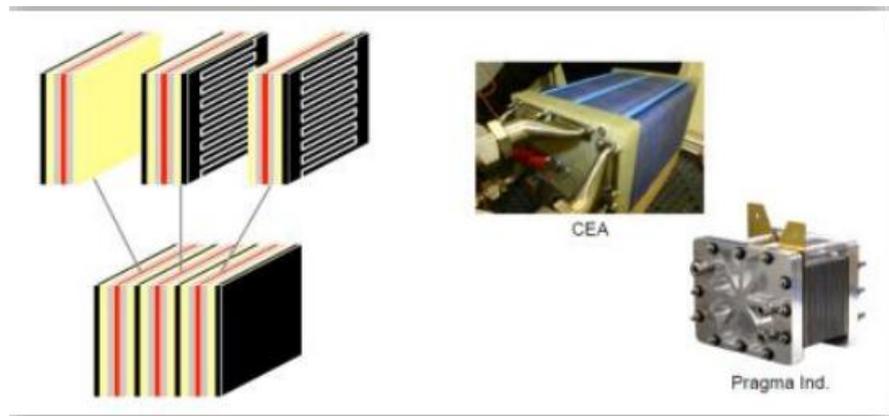


Figure 1.3 : Structure et exemples de stack

1.5 Les différents types des piles à combustible :

Cette partie a pour objectif de présenter succinctement tous les types de piles qui ont pu être répertoriés à l'heure actuelle. Le Tableau I-1 désigne les différents types de piles, les types de pile sont identifiés par la nature de leur électrolyte et par le niveau de leur température de fonctionnement et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé et leur carburant, Il existe six types de piles à combustible :

- les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC)
- les piles directes au méthanol (DMFC)
- les piles alcalines (AFC)
- les piles à oxyde solide (SOFC)
- les piles à carbonate fondu (MCFC)
- les piles à acide phosphorique (PAFC)

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membrane Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et K ₂ CO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydant	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU)
Niveau de développement	Utilisé	Utilisée	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau 1.1 Comparaison entre les piles combustible

1.6 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC) :

Les cellules associées à la pile à combustible (PAC) de type PEM (PEMFC) sont constituées de deux électrodes séparées par une membrane (figure 1-2). Les deux électrodes sont collées de part et d'autre de la membrane, et forment un Assemblage Membrane-Électrodes (MEA). Les protons (molécule H_3O^+) produits par l'oxydation de l'hydrogène migrent à la cathode à travers la membrane et participe à la réduction de l'oxygène à la cathode. Les piles à combustible sont caractérisées par le niveau de tension disponible en fonction du courant délivré. Le niveau de tension typique d'une cellule possédant une densité de courant de 0.4 à 0.8 A. cm^2 est de l'ordre de 0.6V. Un système P A C est en fait une association série parallèle de cellules, le nombre de cellules en série et le nombre de banches en parallèle dépendant des contraintes en tension/puissance du système. Ce type de pile à combustible est utilisé aussi bien pour des applications transport que stationnaire ou portable. Leurs caractéristiques distinctives sont une température de fonctionnement peu élevée (50 à 100 ° C), des entrants gazeux à basse pression et une membrane électrolyte polymère [6], [7], [[8]

Le principe de fonctionnement de pile (PEMFC) et les consistant d'une cellule. Peut-être résumé par le schéma suivant :

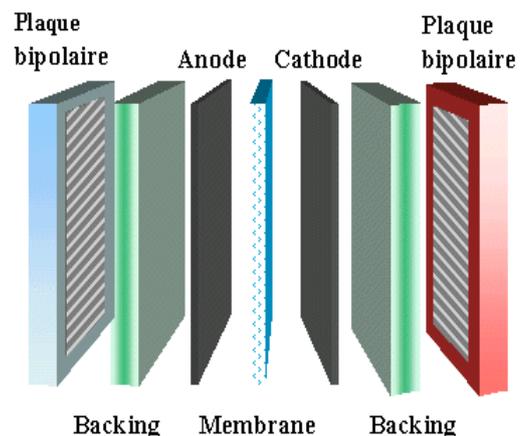
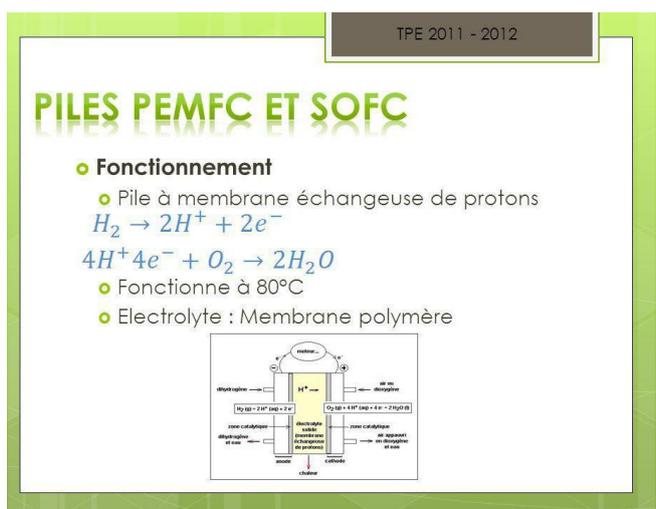


Figure1.4 : le principe fonctionnement figure1.5 : consistant de pile (PEMFC)

1.7 Applications des piles à combustibles :

On a trois types d'applications distinguées :

- portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts).
- stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt),
- transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts),

1.7.1 Applications portables : [9]

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C)[10]



Figure 1.6 : Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g

1.7.2 Applications stationnaires :

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

la méthode de production de l'électricité de l'avenir]. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PAC ne vise que des utilisations finales et non des grands systèmes pour la vente au réseau de distribution. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le coût reste encore élevé par rapport à d'autres moyens de production d'énergie électrique qui demandent souvent de grandes puissances.

D'autre part, elle devient beaucoup plus fiable à petite taille et sa possibilité de production conjointe d'électricité et de chaleur est bien adaptée aux besoins de l'habitant d'un petit quartier. Par conséquent, les principales applications stationnaires se trouvent dans les secteurs commercial, industriel et résidentiel. Les stations à puissances supérieures de quelques centaines de kilowatts sont très rares.



Figure1.7 : unité de pile combustible

1.7.3 Applications dans le transport :

Le secteur du transport est un marché à fort potentiel pour la PAC grâce à ses caractéristiques intéressantes et au développement rapide de la technologie hybride dans les véhicules. En utilisant l'hydrogène comme combustible, le rendement du moteur électrique à PAC est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la PAC lui apporte une position très concurrente alors que la pollution de l'air est devenue un problème important, surtout dans les grandes villes. De plus, les moteurs silencieux sont un argument supplémentaire pour le transport urbain. D'après les experts de l'industrie automobile, on espère qu'un million de voitures à PAC seront commercialisées en 2025 [11].



Figure1.8 : station hydrogène Figure1.9 : Pile Ballard Mark 90véhicule Ford FCV

1.8 Avantages et inconvénients des piles à combustible :

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, SOFC ou MCFC par exemple, mais aussi du type d'application visé, portable ou stationnaire par exemple. Toutefois, des avantages et inconvénients généraux ressortent souvent

Les avantages sont les suivants

- Rendement de la conversion énergétique important Grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées.
- Propre Les piles à combustible rejettent moins de gaz nocifs (CO₂, NO_x).
- **Flexibilité.** : Les piles à combustible pouvant avoir différentes tailles, elles peuvent aussi par conséquent être disposées en différents endroits avec un minimum de place. Ne comportant pas de parties mobiles, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores. De ce fait, les piles à combustible peuvent très bien être à Proximité de quartiers résidentiels.
- Utilisées en production décentralisée d'électricité les piles à combustible présentent un double avantage :
- une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport à des solutions plus traditionnelles
- des rendements énergétiques élevés même à charge partielle : de 40 à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur)

- pas de parties rotatives (donc pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile).
- **Modulable** Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile.

Cependant il y a aussi des inconvénients qui sont les suivants :

- **Coûts importants liés aux matériaux** Les piles à combustible hautes températures sont schématiquement de deux types, cylindrique ou planaire. Pour les cylindriques, les coûts de fabrication sont élevés mais il y a moins de problèmes pour les systèmes car les empilements se font avec des cellules indépendantes mécaniquement les unes des autres, et parce que l'étanchéité se fait en zone froide. Pour les piles planaires, les coûts de fabrication sont moins importants, mais les problèmes apparaissent pour la réalisation des systèmes car les empilements se font en reliant mécaniquement les cellules et les étanchéités se font en zone chaude.

Eléments/ Matériau	Prix /kW
EME (0,6 m ² /kW)	3840 €/kW
• Electrodes	3200 €/kW
• Membrane	540 €/kW
Catalyseur Platiné (6g/kW)	100 €/kW
Plaques bipolaires gravées	3000 €/kW
Eléments structuraux	90 €/kW
Total Stack	7000 €/kW

Tableau 1.10 : Récapitulatif des prix en € au kW pour une PAC de type PEMFC

- le carburant : idéalement, le meilleur carburant est l'hydrogène, mais comme aucune infrastructure adéquate (production, transport, distribution et stockage) n'existe actuellement, on pense à d'autres carburants pour obtenir ensuite l'hydrogène par reformage.
- la durée de vie : elles doivent durer plus de 40000h dans les applications stationnaires, et quelques milliers d'heures pour les applications automobiles

1.9 Les convertisseurs dc-dc pour l'application des piles à combustible :

De façon générale, les piles à combustible présentent en tant que générateur d'électricité plusieurs points faibles : elles ne permettent pas de récupérer de l'énergie, leur temps de Réponse est limité par les alimentations en carburant (la plupart du temps des gaz), leur tension dépend du courant délivré et diminue avec le temps et leur démarrage à froid est difficile[12] De plus, les variations rapides du courant délivré ou même les ondulations de ce courant peuvent réduire sa durée de vie[13], [14]la pile à combustible est un dispositif basse tension qui nécessite souvent un convertisseur DC-DC entre la pile et la charge alimentée[15] Toutes ces contraintes conduisent à utiliser dans un système pile à combustible des sources auxiliaires (batteries, super condensateurs) nécessitant la présence d'un ou plusieurs convertisseurs statiques. Basse tension DC_DC.

Dans ce partie nous présentons Les principales structures de convertisseurs statiques continu-continu isolé pour les applications piles à combustible et détaillées.

On va avoir une bibliographie sur les convertisseurs continu- continu non isolés. On présent les différentes convertisseurs continu- continu non isolés pouvant utiliser dans les systèmes pile à Combustible .

On s'intéresse plus particulièrement l'ondulation du courant d'entrée de ces Convertisseurs, ce courant correspondant au courant délivré par la pile.

1.9.1 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu isolé :

Les convertisseurs basse tension isolés continu-continu isolés sont utilisés lorsqu'une isolation galvanique est nécessaire entre la source et la charge que ce soit pour des raisons de protection ou de monter en tension. La structure de ces convertisseurs est généralement dérivée de la structure des montages classiques Buck, Boost et Buck-Boost auxquels on a ajouté un transformateur.

1.9.1.1 Convertisseur Flyback : C'est un convertisseur simple, dérivé du Buck-Boost comportant un transformateur de gain $m = \frac{n_2}{n_1}$, un interrupteur commandé K et une diode D. La capacité de sortie est connectée à la charge représentée par la résistance R Figure (1.11)

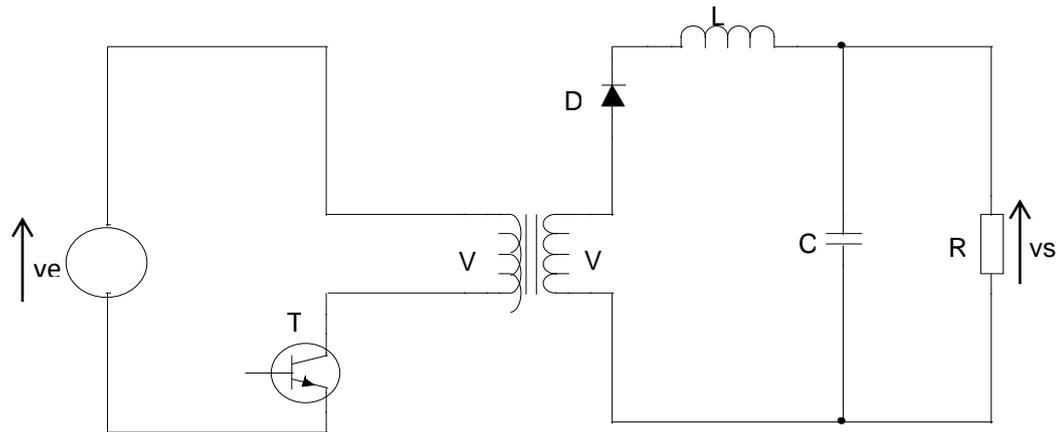


Figure1.11 : Convertisseur isolé avec transformateur : Flyback

En grandeurs réduites le rapport de transformation du convertisseur s'écrit sous la forme :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} * m \quad (1.3)$$

Où α est le rapport cyclique

L'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de sortie sont :

$$\Delta i = \alpha * V_e / L_1 \quad (1.4)$$

$$\Delta v_e = \frac{\alpha * I_s}{C * f} \quad (1.5)$$

F Etant la fréquence de fonctionnement du convertisseur ;

L_1 l'inductance primaire et C la capacité de sortie.

Ce convertisseur présente de nombreux avantages :

- Le nombre de composants est réduit comparé à d'autres convertisseurs isolés
- Le convertisseur est de taille réduite en particulier en mode de fonctionnement discontinu
- Plusieurs sorties peuvent être placées sur le même circuit magnétique
- Il n'est pas indispensable d'ajouter une inductance de filtrage en sortie

Il comporte aussi des inconvénients et des limitations :

- Une ondulation importante du courant en entrée et en sortie ;
- La puissance de sortie est limitée à cause du mode de transfert discontinu d'énergie ;
- L'inductance magnétisante est importante si l'on veut fonctionner en mode de conduction continue ;
- Le flux est unidirectionnel (on utilise seulement la moitié de la courbe B-H du matériau magnétique) ;

- Les inductances de fuite du transformateur génèrent des stress en tension lors du blocage de l'interrupteur [16]

Comme ce convertisseur présente un courant d'entrée très fluctuant, dans des applications de type pile à combustible il est souvent associé à d'autres types de convertisseur (Forward)

1.9.1.2 Convertisseur push-pull : Ce convertisseur utilise un transformateur à point milieu qui permet de transférer à tout instant l'énergie au secondaire (Figure1.12)

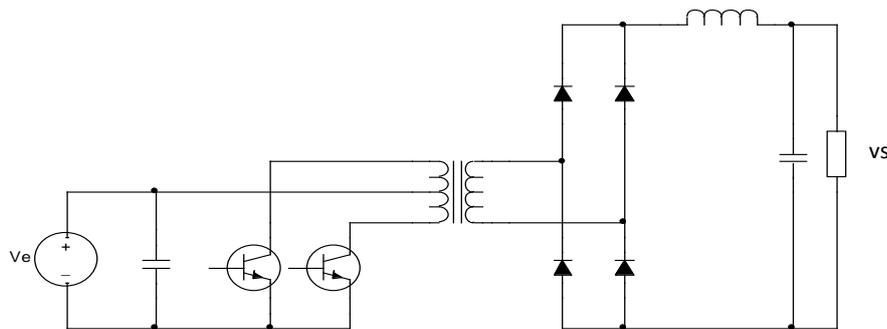


Figure1.12 : Convertisseur push-pull

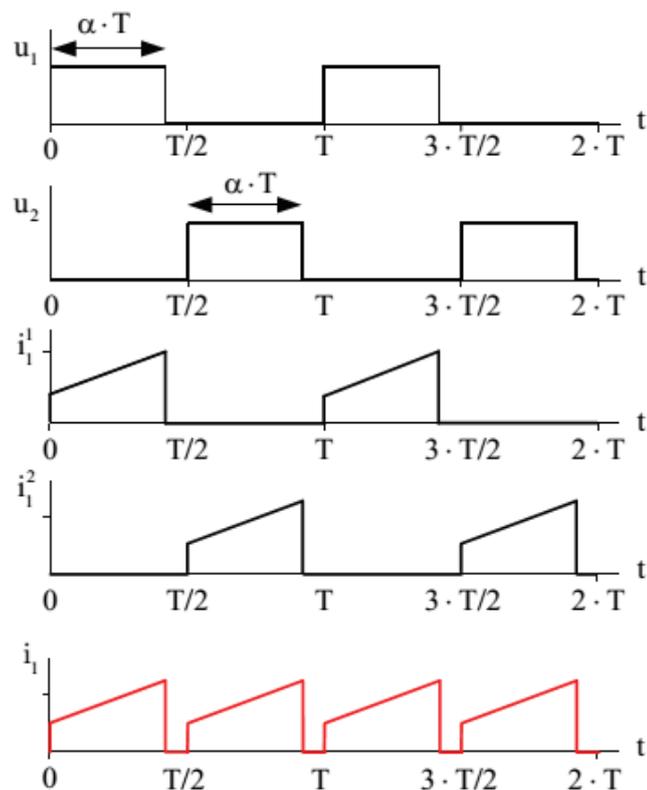


Figure1.13 : Formes d'ondes de convertisseur de type push-pull

Le convertisseur push-pull. Est caractérisée par l'utilisation un transformateur a prise centrale et seulement deux interrupteurs dans l'étage primaire.

Le principal inconvénient de cette structure est plus de contraintes de tension existent sur les interrupteurs.

Ces interrupteurs doivent soutenir un niveau de tension deux fois plus élevée que la tension de sortie de la pile.

1.9.1.3 Convertisseur en demi-pont : Onduleur alimenté en tension :

Dans ce convertisseur (Figure1.14), la tension d'entrée est divisée par deux à l'aide de deux condensateurs pour avoir deux sources de tension. Par conséquent, on utilise un seul bras d'interrupteur pour transférer l'énergie du côté primaire au secondaire. Les formes d'ondes de ce convertisseur sont données sur la (figure 1.15) [17]

L'une des limitations de ce convertisseur est que la totalité du courant traverse les capacités, ce qui limite son utilisation dans des applications de forte puissance.

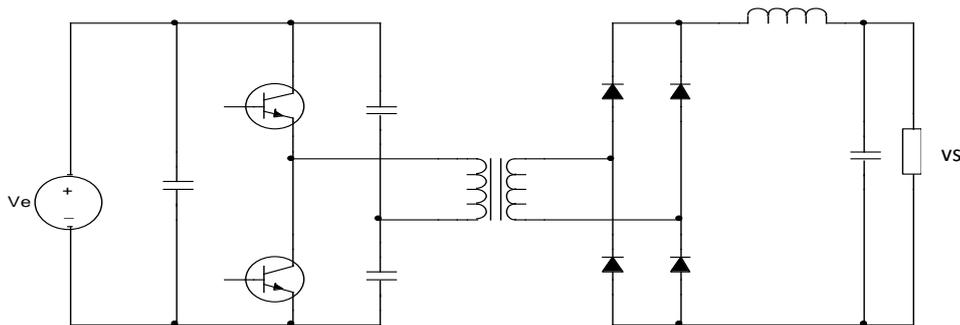


Figure1.14 : Convertisseur en demi-pont

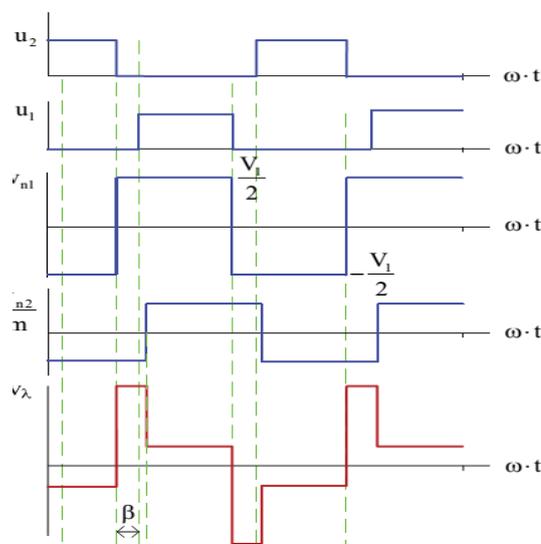


Figure 1.15 : Les formes d'ondes de ce convertisseur

Le convertisseur DC/DC à demi pont (figure1.14) est une autre structure qui peut être intéressante pour être couplée à une PAC. Dans cette structure, deux interrupteurs sont utilisés. Le transformateur isolé à l'étage primaire et secondaire ; il ne voit que la moitié de la tension de la PAC, et il doit être capable de supporter deux fois le courant délivré par la pile à combustible. Le principal inconvénient de cette structure réside dans la difficulté d'équilibrer le pont.

1.9.1.4 Convertisseur Isolé avec Interrupteur Résonant :

Le convertisseur Flyback est l'un des convertisseurs isolés les plus attractifs dans les applications de petite puissance en raison de sa structure simple.

Cependant, il souffre d'un stress élevé de l'interrupteur de puissance et d'un circuit magnétique assez volumineux, le flux étant unipolaire dans le matériau magnétique. Pour pallier à ces inconvénients, il est possible de remplacer l'interrupteur principal par un interrupteur résonnant qui intègre l'inductance de fuite du système permettant d'obtenir des commutations douces et de rajouter un circuit de clamping. Bien que ces techniques permettent d'améliorer le rendement du dispositif de conversion, son domaine d'utilisation reste la basse puissance.

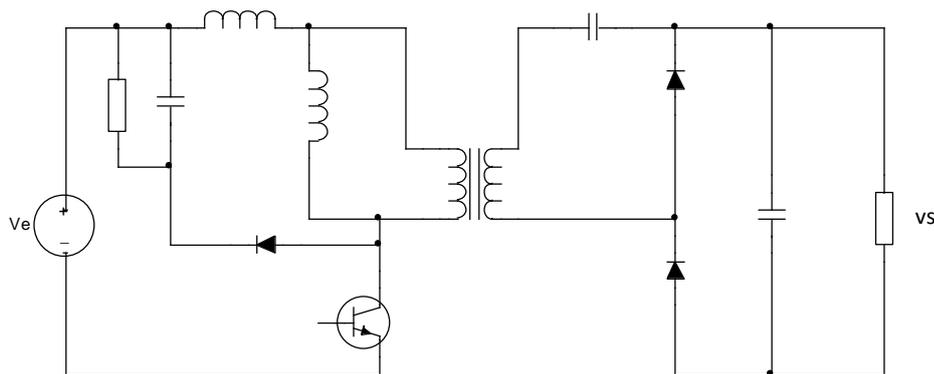


Figure1.16 : Convertisseur Isolé avec Interrupteur Résonant

1.9.2 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé :

Nous allons nous intéresser dans cette section aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de BOOST. Plusieurs variantes existent : le BOOST classique, le BUCK- BOOST, le BOOST entrelacé, BUCK...etc. Ces structures, quant à elles, répondent bien aux contraintes de gamme de puissance de PAC.

1.9.2.1 Le convertisseur boost [18] : C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus grande que celle de l'entrée. La structure du convertisseur élévateur est présentée sur la (Figure1.17)

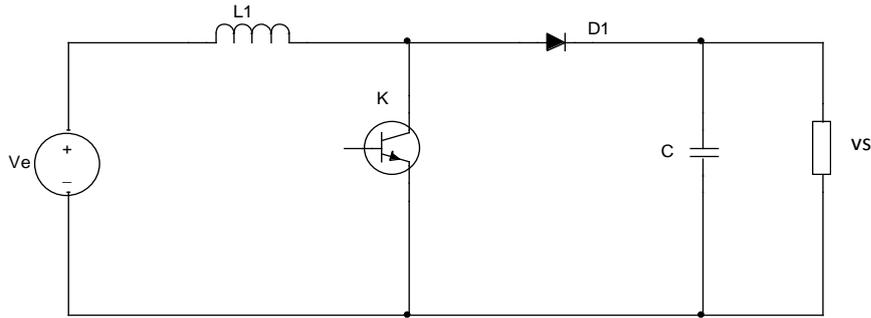


Figure1.17 : convertisseur boost

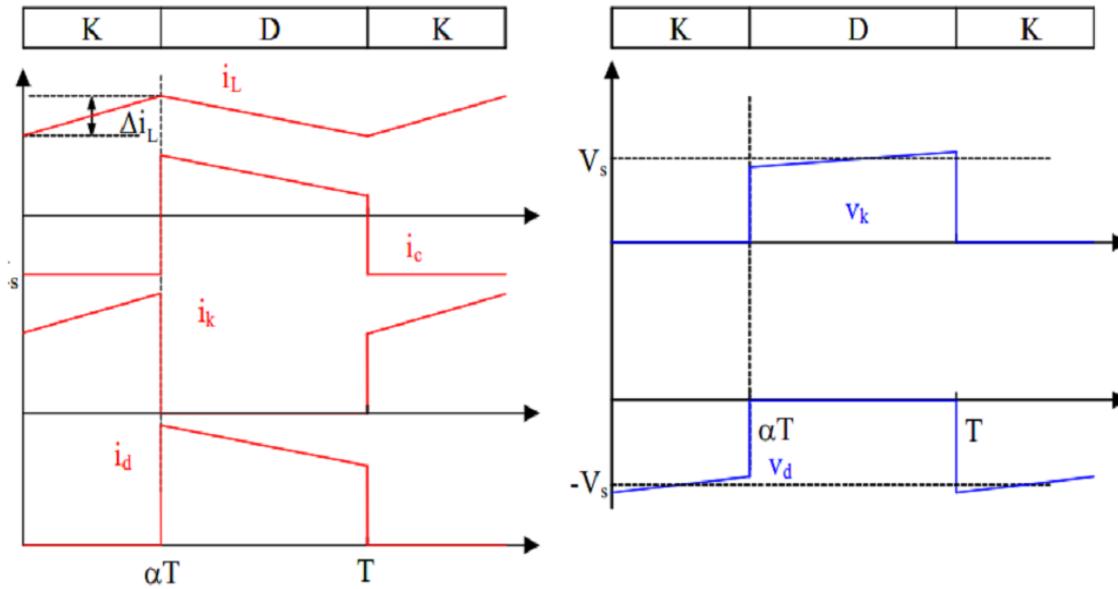


Figure1.18 : Formes d’ondes du convertisseur Boost (courants à gauche, tension à droite

A le rapport cyclique du signal de commande, et f la fréquence de découpage, on en déduit la tension de sortie en valeur moyenne :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} * V_e \quad (1.6)$$

L’ondulation de courant dans l’inductance et l’ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha * V_e}{L * F} \quad (1.7)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha * V_e}{(1-\alpha) * R * C * F} \quad (1.8)$$

Par définition, α est compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_s est toujours supérieure à la tension d’entrée V_e , le montage est élévateur en tension. Le courant dans l’inductance est fonction de la puissance débitée par la source. [19]

On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (1.9)$$

Les formules qui utilise pour calculer la valeur maximal de tension et de courant de l'interrupteur K commandé et la diode D sont les mêmes

. En tension, on a :

$$V_{K_{MAX}} = V_{D_{MAX}} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (1.10)$$

En courant :

$$I_{K_{MAX}} = I_{D_{MAX}} = \frac{I_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (1.11)$$

1.9.2.2 Convertisseur Buck abaisseur : est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur **k** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée. La structure du convertisseur abaisseur est présentée sur la figure (1.19)

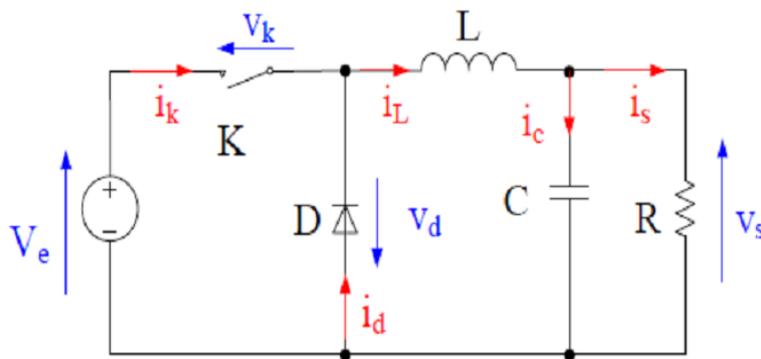


Figure 1.19 : Convertisseur Buck abaisseur

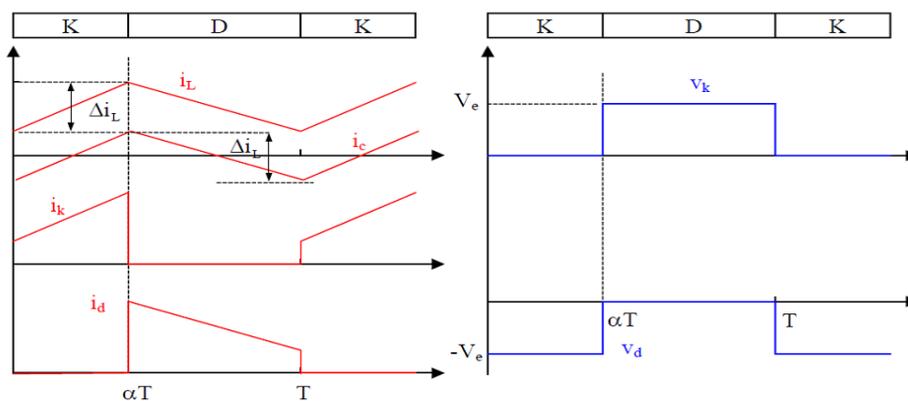


Figure 1.20 : formes d'ondes du convertisseur Buck (courant à gauche, tension à droite)

La tension de sortie en valeur moyenne et l'ondulation de courant dans l'inductance peuvent être déduite :

$$V_s = \alpha * V_e \quad (1.12)$$

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)*V_e}{L*F} \quad (1.13)$$

$$\Delta V_S = \frac{\Delta I_L}{8*C*F} = \frac{\alpha(1-\alpha)*V_e}{8*C*F^2} \quad (1.14)$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge

En tension :

$$V_{K_{moy}} = |V_{D_{MOY}}| = V_e \quad (1.15)$$

En courant :

$$I_{K_{MOY}} = I_{D_{MOY}} = I_{L_{MOY}} = I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (1.16)$$

1.9.2.3 Convertisseur Buck-Boost [20] : est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive) C'est un convertisseur qui peut donner à sa sortie une tension supérieur ou inférieur à celle de l'entrée suivant la valeur du rapport cyclique qui appelle Convertisseur abaisseur-élevateur BUCK-BOOST

Le circuit du convertisseur DC/DC PWM Buck-boost est montré sur le schéma figure

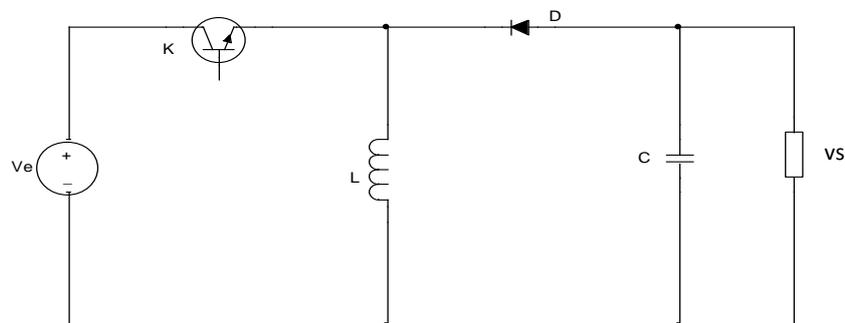


Figure1.21 : Convertisseur BUCK-BOOST

.En conduction continue, les formes d'ondes de courant et de tension de ce convertisseur sont présentées dans la Figure I-7.

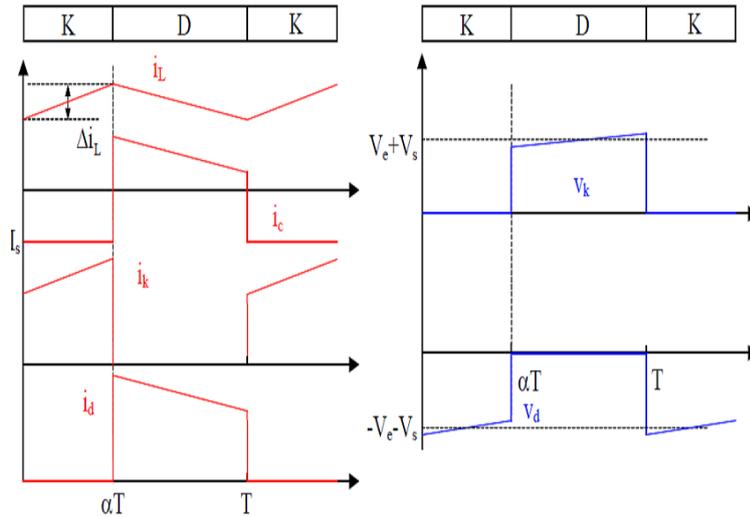


Figure 1.22 : formes d'ondes du convertisseur Buck-boost courant à gauche tension à droite
 La tension de sortie moyenne en déduit par la relation suivant :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} * V_e \quad (1.17)$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha * I_s}{C * F} = \frac{\alpha^2 * V_e}{(1-\alpha) * R * C * F} \quad (1.18)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha * V_e}{L * F} \quad (1.19)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élévateur-inverseur en tension.

Le courant moyen de l'inductance a pour valeur :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (1.20)$$

Le courant d'interrupteur commandé ET le courant de diode sont égaux :

$$I_{K_{MAX}} = | I_{D_{MAX}} | = I_{L_{MAX}} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (1.21)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

En tension

$$V_{K_{MAX}} = | V_{D_{MAX}} | = V_{s_{MAX}} + V_e = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (1.22)$$

1.9.2.3 Convertisseur BOOST entrelacé (IBC) : Le BOOST entrelacé se compose classiquement de deux branches L – T – D (inductance – transistor – diode) et d'un condensateur de filtrage à la sortie (fig1.23) le convertisseurs boost entrelacé a deux branche est une structure qui permet de partager le courant entre plusieurs cellules élémentaires. Le courant traversant chaque cellule est alors moins important. On diminue ainsi les contraintes en courant des composants.

Un convertisseur continu-continu, constitué de deux Boost élémentaires identiques mis en parallèle. Chaque cellule fournit la moitié de la puissance totale. Cette structure est utilisée pour réduire l'ondulation du courant d'entrée, le poids et le volume du convertisseur D'ailleurs, la mise en parallèle de plus de deux convertisseurs est également utilisée.

Dans la structure de convertisseur de la (Figure 1.23), chaque Boost élémentaire est commandé avec le même rapport cyclique α et les commandes sont décalées entre elle d'une demi-période. Le courant moyen passant dans chaque cellule correspond à la moitié du courant d'entrée. La tension de sortie à la même valeur que celle du Boost classique pour un rapport cyclique donné. Mais l'ondulation du courant délivré par la source est plus faible que celle du courant dans chaque convertisseur élémentaire. La fréquence du courant d'entrée est doublée par rapport à celle du découpage. Les formes d'ondes des signaux de commande, des courants et des tensions sont présentées dans les Figures (1.24) et (Fig : 1.25), (Fig : 1.26), (Fig : 1.27),

Et (Fig : 1.28) Le rapport cyclique α et le gain en tension y sont : $\alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s}$, $y = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha}$

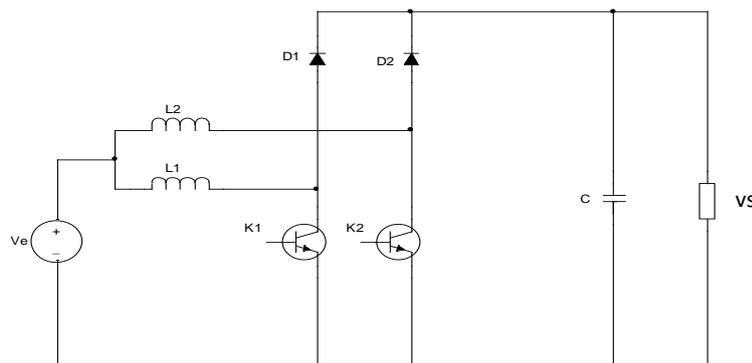


Figure (1.23) : Convertisseur BOOST entrelacé à 2 branches.

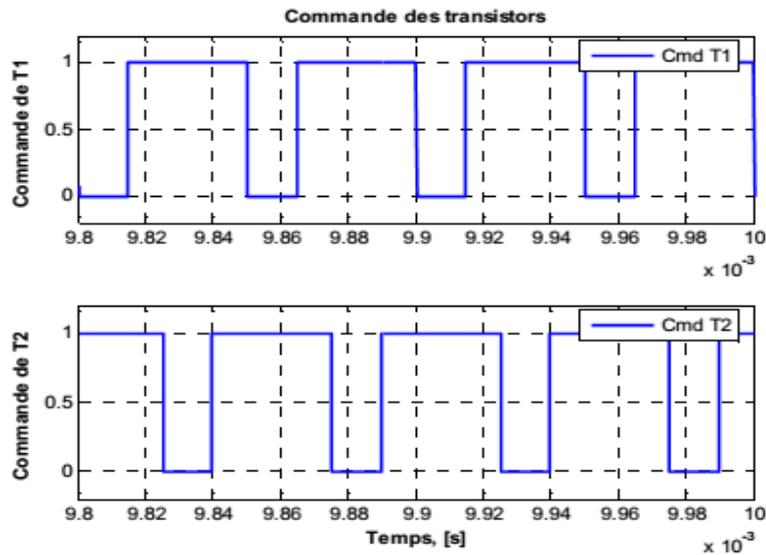


Fig (1.24) : commande du transistor d'IBC [27]

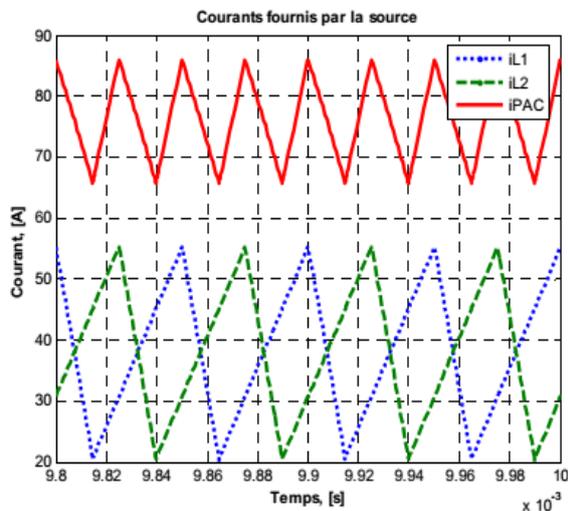


Fig. 1.25. Courants dans les inductances et dans la source De transistor [27]

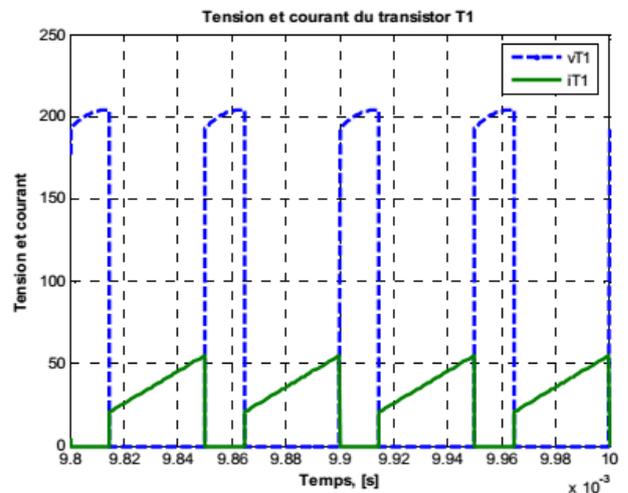


Fig : 1.26 courant et tension ou bornes [27]

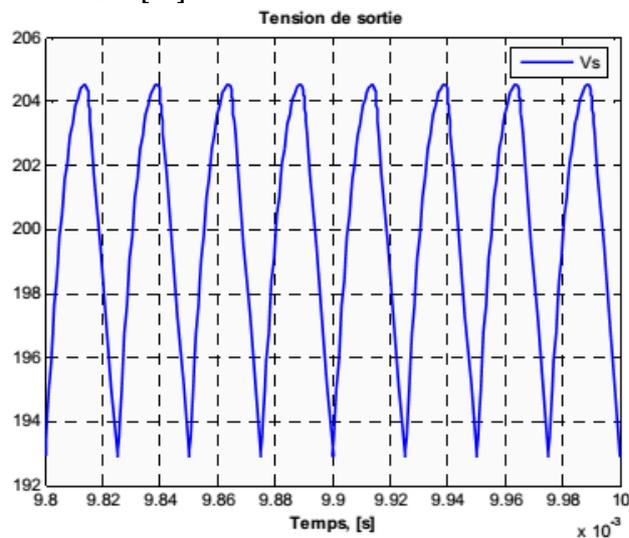


Fig1.27 : Tension de sortie de IBC [27]

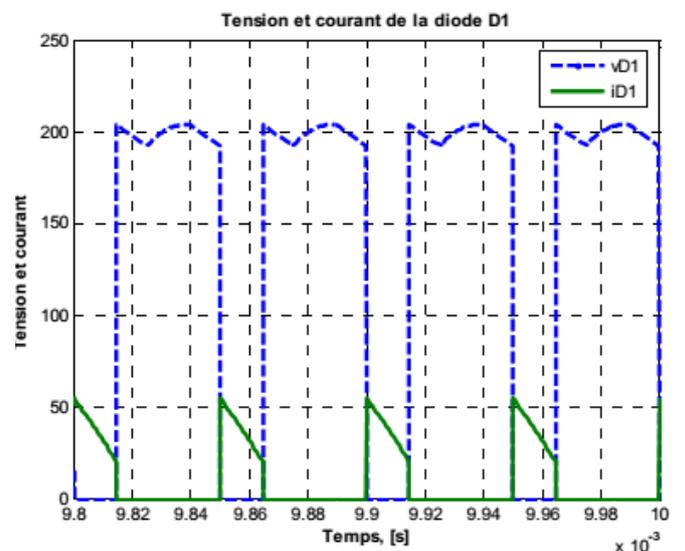


Fig1.28 : Courant et tension aux bornes de diode

Les principales caractéristiques intéressantes de cette structure sont :

- la nature source de courant de l'entrée,
- les intérêts de la technique de l'entrelacement.

1.10 Contraintes sur les composants :

Le courant moyen qui traverse les interrupteurs et les diodes est :

1.10.1 Inductance en entrée : I_{PAC} OU I_e (le courant de source)

Courant moyen d'inductance :

$$I_{L1MOY} = I_{L2MOY} = \frac{I_{PAC}}{2} \quad (1.22)$$

1.10.2 Ondulation du courant dans l'inductance :

: Tant que la valeur des inductances des deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les inductances sont de même forme, mais ils sont décalés d'une demi période entre eux. Les ondulations de courant dans chaque inductance sont toujours égales à :

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \alpha * \frac{V_e}{L * F} \quad (1.23)$$

Ondulation du courant fourni par la source (le courant d'entrée) et l'ondulation de la tension de sortie : Nous distinguons deux cas de fonctionnement correspondant avec $\alpha > 0,5$ et $\alpha < 0,5$.

- 1) pour un rapport cyclique α supérieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\Delta I_{PAC} = \frac{2 * \alpha - 1}{\alpha} * \frac{\alpha * V_e}{L * F} = \frac{(2\alpha - 1) * V_e}{L * F} \quad (1.24)$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (\alpha - 0.5)}{C * F} = \frac{V_e * (\alpha - 0.5)}{(1 - \alpha) * R * C * F} \quad (1.25)$$

- 2) Pour un rapport cyclique α inférieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

On a

$$\Delta I_{PAC} = \frac{\alpha(1 - 2\alpha)}{1 - \alpha} * \frac{V_e}{L * F} \quad (1.26)$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (0.5 - \alpha)}{C * F} = \frac{V_e * (0.5 - \alpha)}{(1 - \alpha) * R * C * F} \quad (1.27)$$

1.10.3 Semi-conducteur :

Les courants moyens de semi-conducteur :

$$I_{KMOY} = \alpha * \frac{I_{pac}}{2} \quad (1.28)$$

$$I_{DMOY} = (1 - \alpha) * \frac{I_{PAC}}{2} \quad (1.29)$$

1.10.4 Capacité :

La fréquence de l'ondulation du courant de sortie est doublée donc la capacité de sortie peut être divisée par deux par rapport au cas du hacheur (boost) à une branche :

$$C_s = \frac{\alpha * V_e}{2(1-\alpha) * R * \Delta V_s * F} = \frac{\alpha * V_s}{2 * R * \Delta V_s * F} \quad (1.30)$$

Cette structure entrelacée est une solution efficace pour augmenter le niveau de puissance, car elle permet le partage du courant entre les phases. Cette structure permet de minimiser l'ondulation du courant et la taille des composants passifs

Le tableau suivant représente une comparaison entre les différentes topologies des convertisseurs DC/DC basse tension non-isolé :

Structures	Complexité	Taille	Ondulation de courant	Gain en tension
BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Bas
BUCK BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Bas
BUCK	Moyenne	Moyenne	Elevée	Haut
IBC	Moyenne	Moyenne	Bas	Bas

Tableau (1.2) Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé.

1.11 Lechoix du convertisseur DC/DC boost entrelacé (IBC) *Interleaved Boost Convertte* :

Un convertisseur DC/DC boost est généralement connecté à une PàC en raison de la faible tension produite par cette dernière. Toutefois, cette topologie présente de nombreux inconvénients : forte masse, grand volume, ondulation de courant élevée, et manque de fiabilité (intolérance aux défauts). Par conséquent, en utilise dans travaille pratique en parallèle un convertisseur DC/DC boost avec la technique d'entrelacement (IBC), pour évités inconvénients précédent. Cette structure entrelacé proposé qui a moins de perte et meilleur rendement

1.12 Conclusion :

Ce chapitre s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement. Ainsi que leurs avantages et inconvénients et dans le 2^{ème} partie. Nous avons présenté différents types de convertisseurs continu-continu, destinés à relier une source de type pile à combustible et une charge. et leur fonctionnement et donner la comparaison entre les convertisseurs non isolés.

Les convertisseurs basse tension dc-dc isolés sont recommandés pour toutes les applications où l'isolation électrique est nécessaire pour des raisons de sécurité.

Le convertisseur basse tension dc-dc non isolé généralement recommandés pour l'application moyenne puissance comme le véhicule électrique.

2.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent on a présenté les différentes structures des convertisseurs DC/DC isolé et non isolé pour les applications piles à combustible .nous avons concentré notre intérêt sur les convertisseurs non isolés.

Nous présentons dans ce chapitre la modélisation et la commande d' un convertisseur IBC proposé , la modélisation moyenne en petits signaux, bien connue sous le nom small-signal averaged model [21], a été appliquée pour chaque branche afin de prendre en considération leurs non-linéarités dues aux interrupteurs de puissance, inductances, etc... Ce modèle moyen en petits signaux a été évalué en écrivant les équations d' un convertisseur IBC proposé dans les périodes de fonctionnement $\alpha.T$ et $(1-\alpha).T$. Pour la commande de notre structure, on présentera une commande base sur une deux boucle de régulation composé par une boucle de tension avec un régulateur linéaire PI et boucle de courant basé sur un régulateur par mode glissant de type non linéaire pour les deux branches d' un convertisseur.

2.2 Modélisation d' un convertisseur proposé (entrelacé IBC) :

Il existe différents types de modélisation électrique des convertisseurs, types que l'on peut classer par ordre décroissant de complexité comme suit : les modèles instantanés, les modèles moyens, et les modèles moyens en petits signaux [22],[23]. Parmi ces modèles, le modèles moyens en petits signaux est le plus largement utilisé pour modéliser les convertisseurs continu-continu a été appliquée pour notre convertisseur proposé.

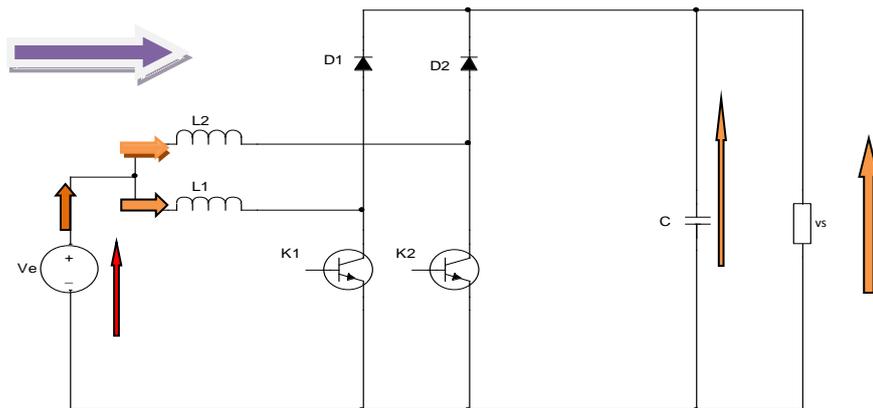


Figure 2.1 : Structure du convertisseur étudié.

2.3 Les équations différentielles d' un convertisseur IBC, en valeur moyenne :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11} \cdot \frac{d\tilde{i}_{L11}(t)}{dt} = \tilde{v}_e(t) - (1 - \alpha_1) \cdot \tilde{v}_1(t) - V_1 \cdot \tilde{d}_1(t) - R_{L11}(t) \cdot \tilde{i}_{L11}(t) \\ L_{12} \cdot \frac{d\tilde{i}_{L12}(t)}{dt} = \tilde{v}_e(t) - (1 - \alpha_2) \cdot \tilde{v}_1(t) - V_1 \cdot \tilde{d}_2(t) - R_{L12}(t) \cdot \tilde{i}_{L12}(t) \\ C_1 \cdot \frac{d\tilde{v}_1(t)}{dt} = -\tilde{i}_2(t) + (1 - \alpha_1) \cdot \tilde{i}_{L11}(t) + (1 - \alpha_2) \cdot \tilde{i}_{L12}(t) + I_{L11} \cdot \tilde{d}_1(t) + I_{L12} \cdot \tilde{d}_2(t) \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Où $\tilde{v}_e, \tilde{v}_1, \tilde{i}_{L11}, \tilde{i}_{L12}, \tilde{d}_1$ et \tilde{d}_2 sont des petites perturbations autour de leurs points de fonctionnements.

Les fonctions de transferts en boucle ouverte dans le domaine de Laplace du convertisseur IBC ont été obtenues à partir du modèle moyen en petits signaux sont

$$G_{V_1 d}(s) = \frac{\tilde{v}_1(s)}{d'} = G_{1,dv} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zv1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{\omega_{zv2}}\right)}{\Delta(s)} \quad (2.2)$$

$$G_{i_1 d}(s) = \frac{\tilde{i}_{L1X}(s)}{d'} = G_{1,di} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zi1}}\right)}{\Delta(s)} \quad (2.3)$$

Avec :

$$G_{1,dv} = \frac{V_1}{(1-\alpha)} \left(\frac{2(1-\alpha)^2 R - R_{L1X}}{2(1-\alpha)^2 R + R_{L1X}} \right) \cong \frac{V_1}{(1-\alpha)} \quad (2.4)$$

$$\omega_{ZV1} = \frac{1}{C_1 R_C} \quad (2.5)$$

$$\omega_{ZV2} = \frac{2R(1-\alpha)^2 - R_{L1X}}{L_{1X}} \quad (2.6)$$

$$\Delta(s) = \frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{s}{Q\omega_0} + 1 \quad (2.7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2(1-\alpha)^2 R + R_{L1X}}{L_{1X} C_1 (R + R_{C1})}} \quad (2.8)$$

$$\xi = \frac{L_{1X} + C_1 (R_{L1X} (R + R_{C1}) + 2(1-\alpha)^2 R \cdot R_{C1})}{2\sqrt{L_{1X} \cdot C_1 (R + R_{C1})} [2(1-\alpha)^2 R + R_{L1X}]} \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{1}{2\xi}; \quad G_{1,di} = \frac{2V_1}{2(1-\alpha)^2 R + R_{L1X}} \quad (2.10)$$

$$\omega_{zi1} = \frac{1}{C_1 (R/2 + R_{C1})} \quad (2.11)$$

Les fonctions de transfert (4-2) et (4-3) sont des systèmes d'ordre deux avec une deux pole a pulsation de coupure (4-8), et un zéro dans la partie droite de l'axes imaginaires RHPZ (Right Half Plan Zéro) (4-6) et un zéro dans la partie gauche de l'axe des imaginaires LHPZ (4-5). La fréquence de coupure et la RHPZ sont en fonctions de Rapport cyclique nominal α_1 . Dans un

système en boucle fermée, les paramètres du système vont changer quand le rapport cyclique change, ce qui signifie que la fonction de transfert va changer en conséquence. Cela rend la conception de contrôleur pour l'IBC beaucoup plus difficile du point de vue de la stabilité et de la bande passante.

2.4 Stratégie de commande d' un convertisseur(IBC) proposé :

La conception optimale d'un correcteur est une tâche difficile étant donné que, selon les équations (4-2), les paramètres des fonctions de transfert varient fortement avec la charge R. Pour choisir et de concevoir correctement les correcteurs, il est essentiel d'établir les objectifs de contrôle[36], qui peuvent être formulés comme suit :

- La tension du sortie d' un convertisseur proposé doit être régulée à chaque instant lors des variations de charge et des conditions de fonctionnements de la pile à combustible influant la tension délivrée
- Le courant d'entrée pour chaque branche d' un convertisseur proposé doit être réparti équitablement entre les différentes phases des convertisseurs afin d'éviter une surcharge sur l'une des phases, particulièrement pour des valeurs de charge élevées. En outre, les courants de phase doivent être correctement décalés les uns par rapports aux autres afin de minimiser l'ondulation de courant d'entrée.
- Garanties la stabilité et les performances dynamiques quand le système fonctionne en boucle fermée.

2.5 La commande avec deux méthodes :

Le convertisseur proposé sont commandés par deux boucle qui contient un boucle externe utilisant un régulateur linéaire de type proportionnelle intégrateur PI (ou boucle de tension)qui compare la référence de tension de sortie avec la tension de sortie mesurée de chaque branche du convertisseur proposé. Par conséquent, la référence de courant totale est obtenue à partir d'un régulateur PI, et ensuite cette référence est partagée équitablement entre chaque phase des deux branches d'un convertisseur proposé.

Pour convertisseur IBC entrelacé a deux branches , le courant total est divisé par 2 (nombre de chaque branche de topologie).Ensuite, la boucle interne (boucle de courant) permet d'obtenir les rapports cycliques(α_1, α_2), à partir des régulateur non linéaire de type mode glissant Enfin, les rapports cycliques sont comparées à des signaux PWM à la fréquence de commutation f et ensuite les signaux sont décalés les uns par rapport aux autres afin de constituer les signaux de

commande des interrupteurs de puissance (K_1, K_2, \dots). L'architecture de la stratégie de contrôle à deux boucles de convertisseurs proposé est représentée sur la Figure suivantes :

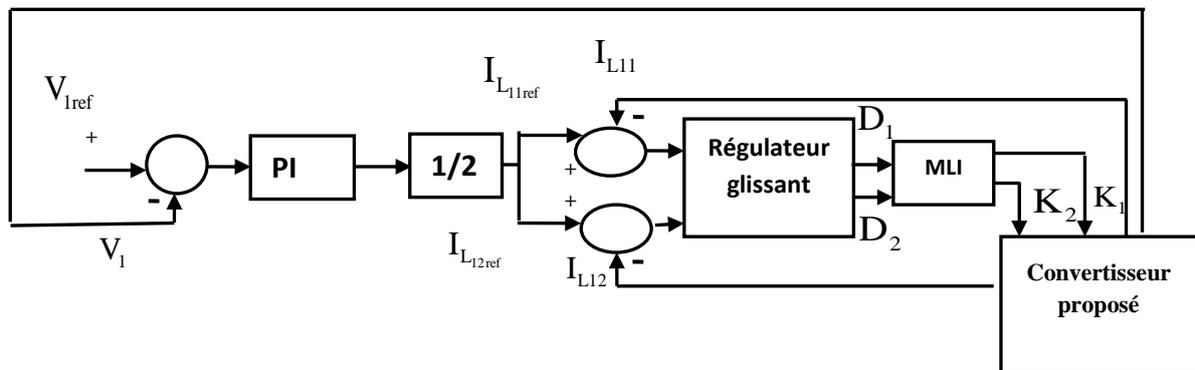


Figure2.2 :L'architecture de la stratégie de commande.

Les régulateur PI sont définis par suit :

$$PI = K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s} \right) \quad (2.13)$$

Les paramètres des correcteurs que nous avons déterminés :

- Boucle de tension pour le IBC : $K_1 = 60$ et $T_1 = 0.5$

2.6 Régulateur de courant par mode glissant :

Le mode glissant et dépend la commande de courant traverse les inductances (i_{L1}, i_{L2}) de chaque branche de convertisseur proposé. Un régulateur par mode glissant est conçu sur le modèle moyen du convertisseur est utilisé. Le commande glissant est un mode de commande bien adapté aux convertisseurs statiques [24],[25]. En effet, il permet de garantir stabilité et robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques. Les équations suivantes définissent respectivement le Modèle moyen de l'IBC [26] :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11} = \frac{dI_{L11}}{dt} = V_e - (1 - \alpha_1) \cdot V_1 - r_{L11} \cdot I_{L11} \\ L_{12} = \frac{dI_{L12}}{dt} = V_e - (1 - \alpha_2) \cdot V_1 - r_{L12} \cdot I_{L12} \\ C_1 \cdot \frac{dV_1}{dt} = -I_2 + (1 - \alpha_1) \cdot I_{L11} + (1 - \alpha_2) \cdot I_{L12} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Les surfaces de glissement de IBC est défini par les expressions suivantes :

$$S_{IL11} = (I_{L11} - I_{L11ref}) + K_{IL1} \int_0^t (I_{L11} - I_{L11ref}) dt \quad (2.15)$$

$$S_{IL12} = (I_{L12} - I_{L12ref}) + K_{IL2} \int_0^t (I_{L12} - I_{L12ref}) dt \quad (2.16)$$

- le terme intégral permet de compenser les variations paramétriques
- le coefficient K_{iL} permet de fixer la dynamique avec laquelle l'erreur converge vers zéro.

$$\begin{aligned} \dot{S}_{IL_{11}} &= -\lambda_{IL_1} S_{IL_{11}} \\ \dot{S}_{IL_{12}} &= -\lambda_{IL_1} S_{IL_{12}} \end{aligned} \quad (2 ; 18) \quad (2.17)$$

- λ_{iL_1} permet fixer la dynamique de ralliement des composantes de la surface de glissement vers zéro.
- A noter que les surfaces tendent vers zéro uniquement lorsqu'on connaît les paramètres exacts du système.

À l'aide des relations (4-24), (4-26) et (4-28) pour le IBC on peut exprimer le rapport cyclique (α_1, α_2) comme suit :

Avec $i = [1, 2]$.

$$\alpha_{1,2} = 1 - \frac{V_e - r_{1i} \cdot I_{L_{1i}} + L_{1i} (\lambda_{iL_1} \cdot S_{iL_1} - \dot{I}_{L_{1i,ref}} + K_{iL_1} \cdot (I_{L_{1i}} - I_{L_{1i,ref}}))}{V_1} \quad (2.19)$$

L'équation (4-30) montre que :

- les commandes ne dépendent pas avec la valeur de la résistance de charge R.
- le régulateur ne sera pas perturbé par les variations de la charge.

En injectant les valeurs des rapports cycliques dans le modèle moyen on peut définir la dynamique de l'erreur de courant :

$$\dot{Z}_{1i} + (\lambda_{iL_1} + K_{iL_1}) \cdot Z_{1i} + \lambda_{iL_1} K_{iL_1} \cdot \int Z_{1i} \cdot d\tau = 0 \quad (2.20)$$

Avec

$$Z_{1i} = I_{L_{1i}} - I_{L_{1i,ref}} \quad (2.21)$$

Le système d'équation précédent peut se mettre après dérivation sous la forme :

$$\ddot{Z}_{1i} + (\lambda_{iL_1} + K_{iL_1}) \cdot \dot{Z}_{1i} + \lambda_{iL_1} \cdot K_{iL_1} \cdot Z_{1i} = 0 \quad (2.22)$$

- Cette équation est utilisée pour définir les coefficients et les facteurs de convergence pour assurer les performances souhaitées.
- Les coefficients sont positifs Cela signifie que toutes les racines du système ont strictement une partie réelle négative. Il s'agissait de la stabilité du régulateur.

2.7 Conclusion :

ce chapitre, constitue deux parties la première partie présente Le modèle moyen en petits signaux de convertisseur de chaque branche d'un convertisseur proposé (ibc) a été utilisé pour aider à la conception optimale de la commande de notre système. et la deuxième partie Nous avons présenté stratégies de commande a deux boucle qui est basée sur une structure de contrôle avec une boucle externe de tension et une boucle interne de courant pour les deux branche de convertisseur. Cette commande présente des résultats intéressants mais avec dépassement non négligeable de tension intermédiaire lors de variation de la charge.

3.1 Introduction :

Les simulations ont été réalisées sous l'environnement MTLAB/SIMULINK, pour vérifier les performances de la commande deux boucle et l'influence du régulateur PI adaptatif et la commande de mode glissant sur les performances du convertisseur proposé

En départ, tester la commande de mode glissant en présence de l'influence des variations de courant de référence et deuxièmement tester les deux commande avec en présence de l'influence des variations de la charge pour vérifier le bon fonctionnement de système

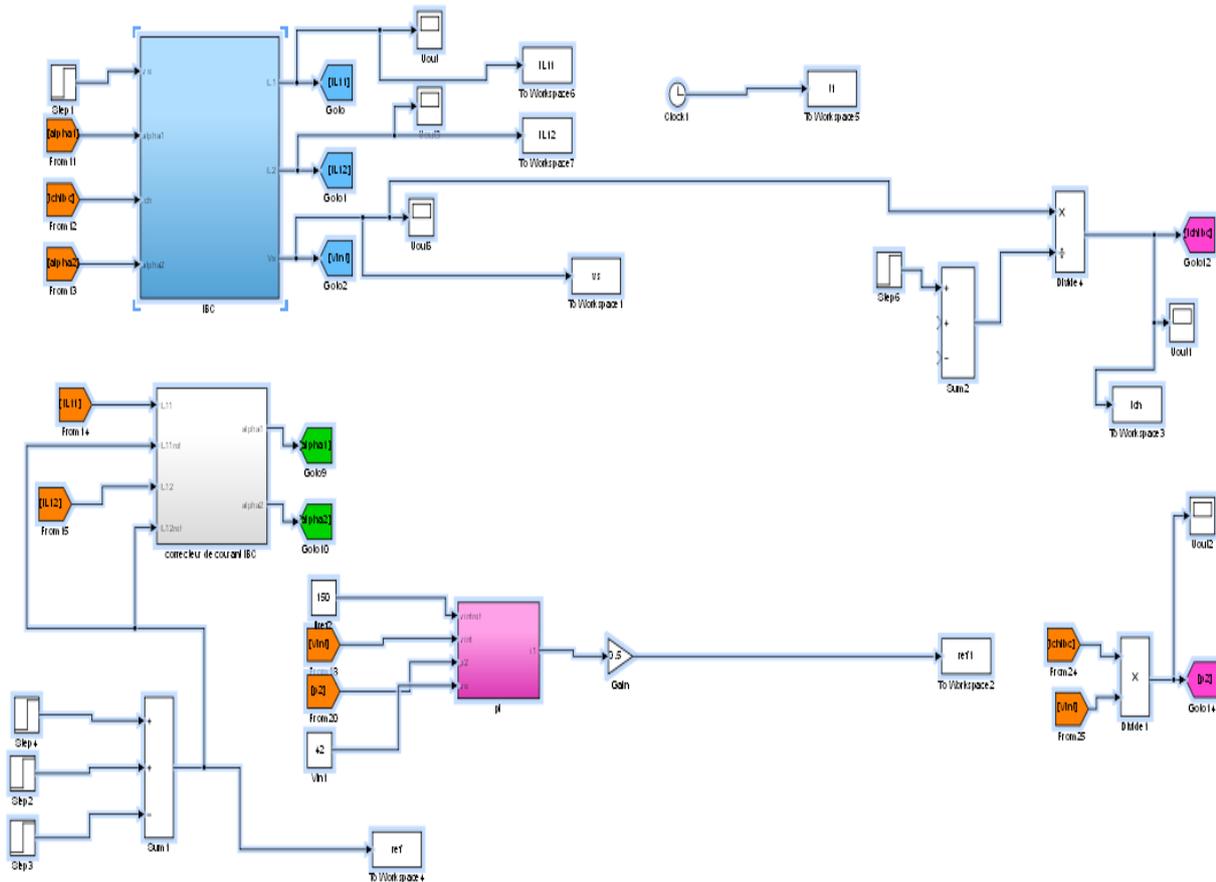
3.2 Tests des régulateurs de courant :(mode glissant)

Pour tester les régulateur de courant par mode glissant de convertisseur proposé(boost entrelacé a deux branches) on fait varier le courant de référence et en observant le comportement des courants de chaque phase d'un convertisseur de chaque branche.

3.3 Les paramètre de convertisseur proposé et le schéma bloc de simulation de 1 er teste :

Tension entrée	$V_e = 42 \text{ (v)}$
L'inductance de première branche	$L_{11} = 5.08 * 10^{-4} \text{ (H)}$
L'inductance de deuxième branche	$L_{12} = 5.08 * 10^{-4} \text{ (H)}$
Résistance de première branche	$R_{11} = 7.1 * 10^{-3} \text{ (ohm)}$
Résistance de deuxième branche	$R_{12} = 7.1 * 10^{-3} \text{ (ohm)}$
Capacitance de sortie	$C_1 = 4.84 * 10^{-4} \text{ (f)}$
Fréquence de découpage	20(kHz)

Tableau (3.1) Les paramètre de convertisseur proposé



figure(3.1) schéma bloc de simulation de 1 er teste (mode glissant) :

3.4teste avec la commande de boucle interne (mode glissant) :

Nous changeons le courant de référence (iref) de 4 (A) à 9(A) et de 10(A) à 5 (A) et observons les changements de courant des inductances iL11et iL12 du convertisseur (ibc) a de chaque branche .

les figures(3.2),fig(3.3),fig(3.4),fig(3.5) et fig(3.6) qui représente l'évolution de courant des inductance iL11et iL12 et le courant de référence du convertisseur proposé

3.5 résultat de simulation :

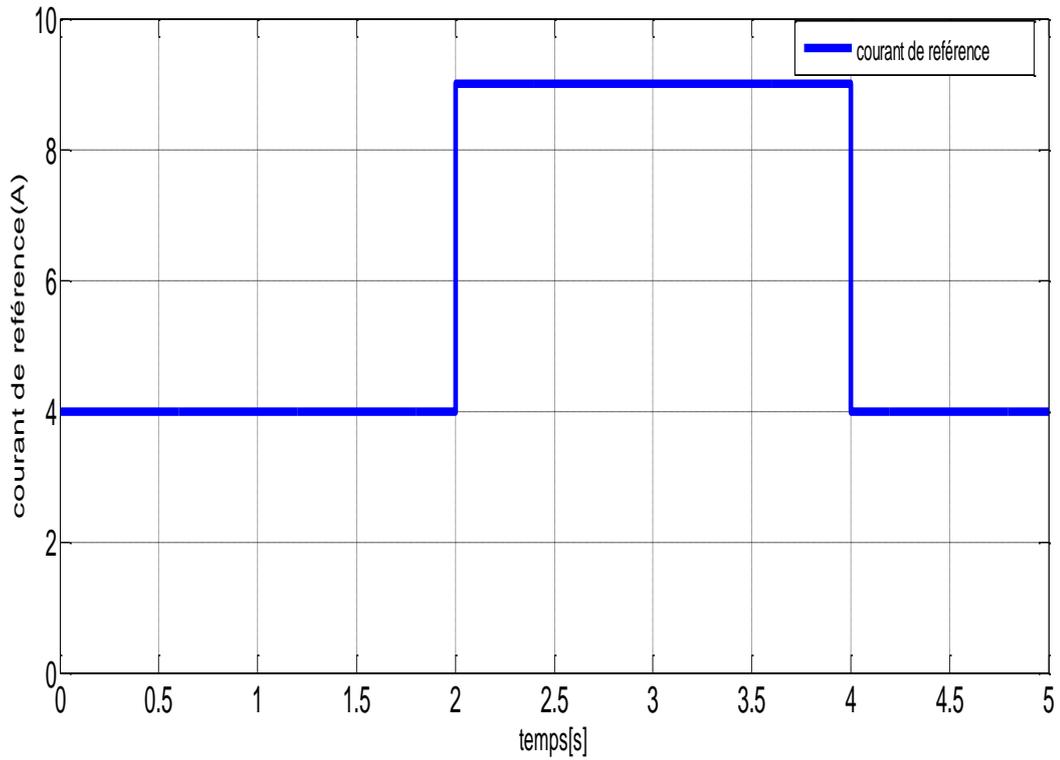


Figure (3.2) : variation de courant de référence de 4 à 9(A)

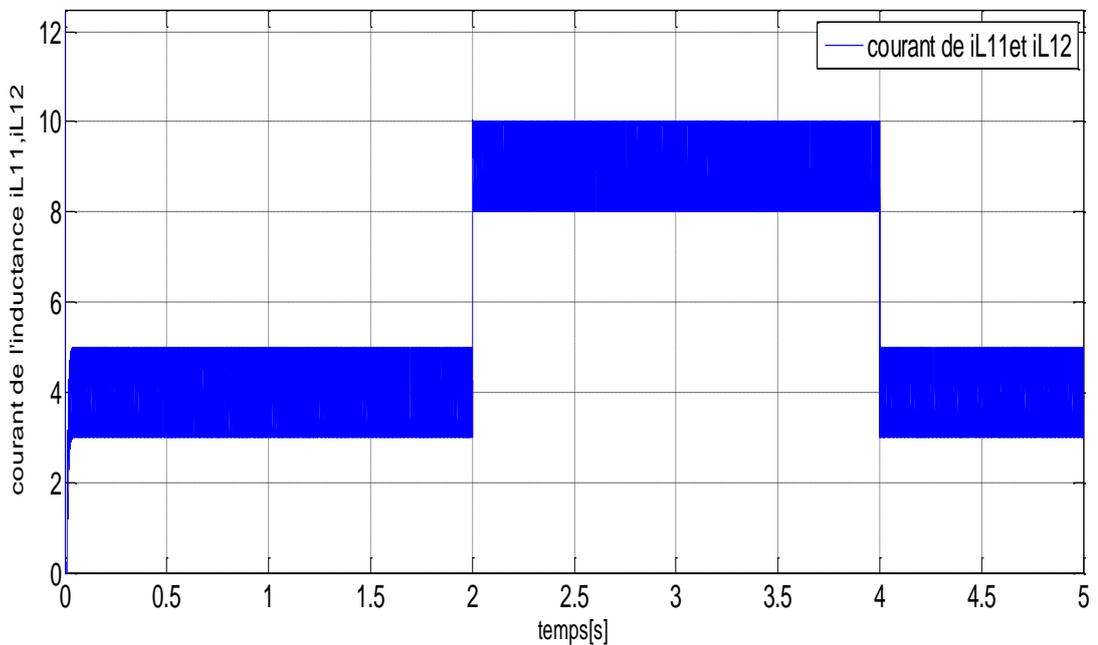


Figure (3.3) des courants de l'inductance L11 après variation de courant de référence de 4 à 9A

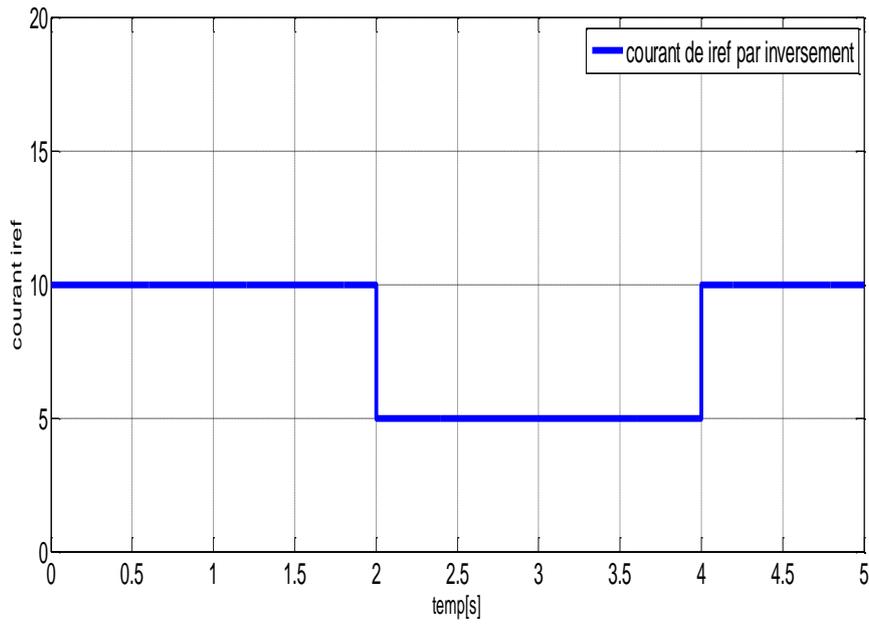


Figure (3.5) : variation de courant de référence de 10 à 5(A) par inversement

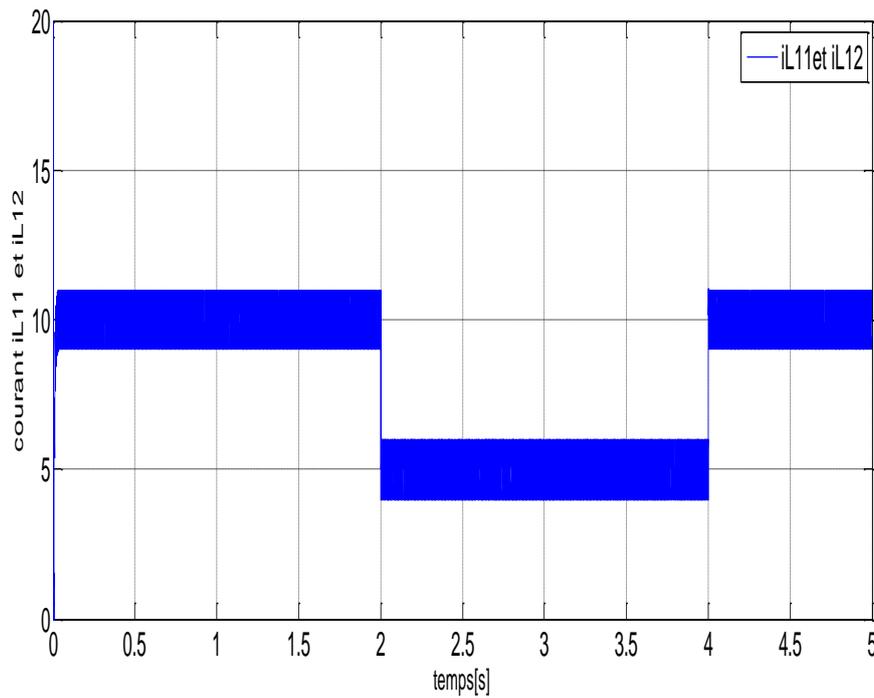


Figure (3.6) : le courant i_{L1} et i_{L12} de (ibc) après la variation de courant iref

3.6 Interprétation :

-La figure (3.2) représente la variation de courant de référence en remarque que a $t=2(S)$ le

Courant de référence augment instantanément à valeur 10(A) et a $t=4(s)$ arrive le même niveau de départ cette variation pour étudié la réponse de système

-Les figure (3.3) représente les courants dans inductances i_{L11} et i_{L12} du convertisseur entrelacé a deux branches après variation de courant de référence de 4 à 9 A respectivement, on observe que les courant suit parfaitement leur courant de référence sans dépassement et temps de réponse rapide ce qui prouve l'efficacité de régulateur glissant utilisé.

-Les figure (3,6) représente l'évolution les courant dans les inductances du convertisseur après variation de courant de référence de 10 à 5 respectivement, on observe que les courantdans les inductance i_{L11} et i_{L12} suivi le courant de référence avec réponse instantanément donc le régulateur par mode glissant est parfaitement contrôlées.

3.6 teste avec la commande globale à deux boucles (régulateur PI et régulateur mode glissant) :

Nous changeons la charge à $t=0.5(s)$ et à $t=2(s)$ et observons les changements des courant de inductance i_{L11} et i_{L12} et la tension de sorite et le courant de charge de convertisseur propose

Le schéma bloc de simulation de commande à deux boucles est représentédans la figure (3.7)

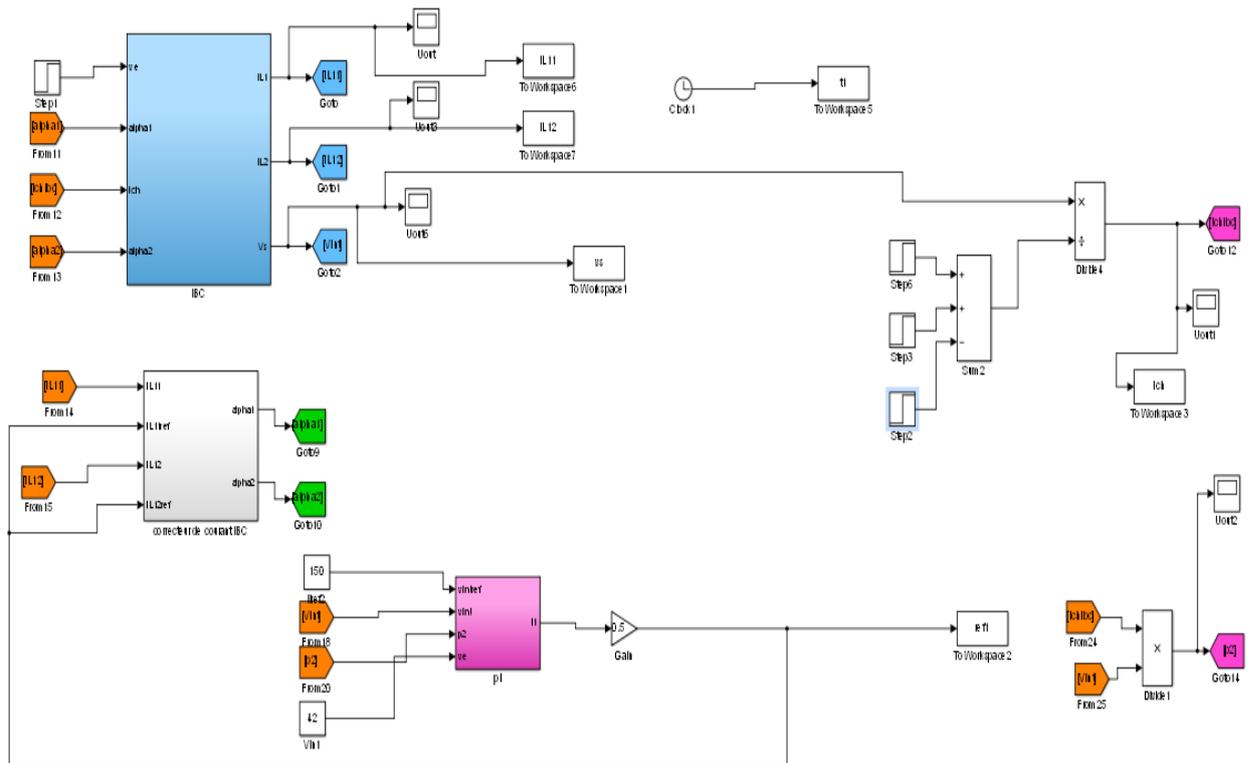


Figure (3.7) : schéma bloc de commande à deux boucles par variation de la charge

3.7 Résultats de simulation :

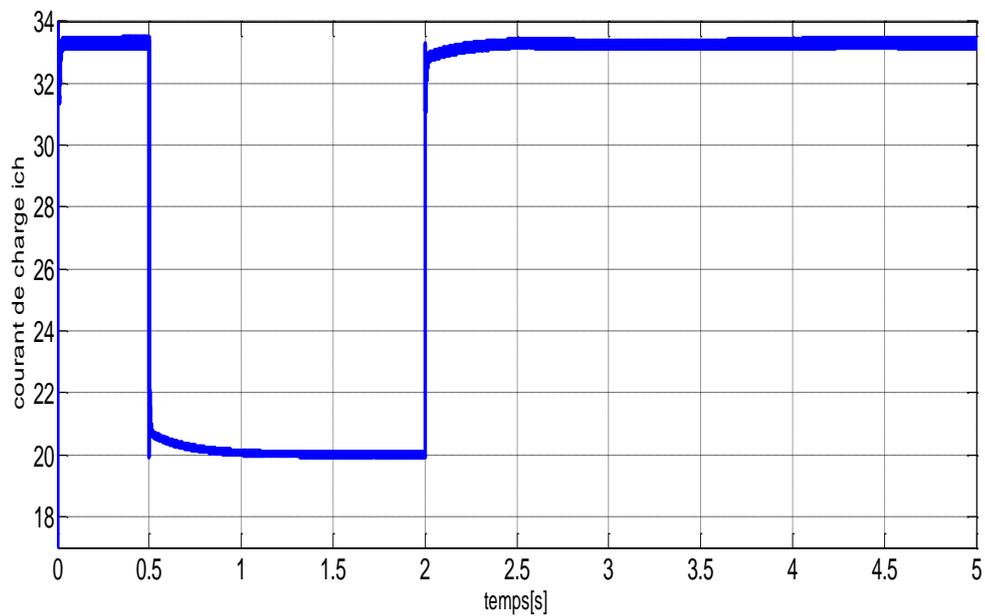


Figure (3.8) : courant de charge ich

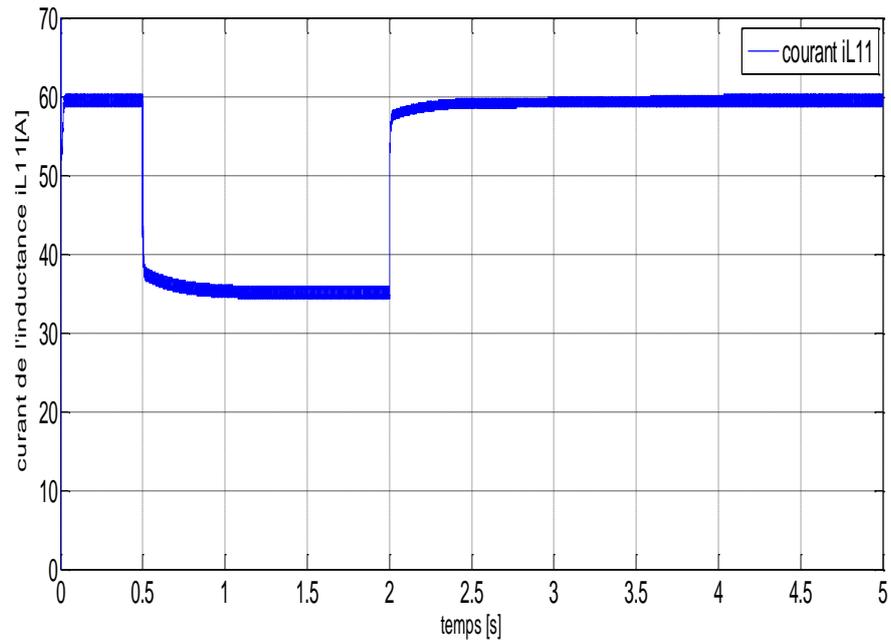


Figure (3.9) : courant de l'inductance i_{L11} (ibc) par variation de charge

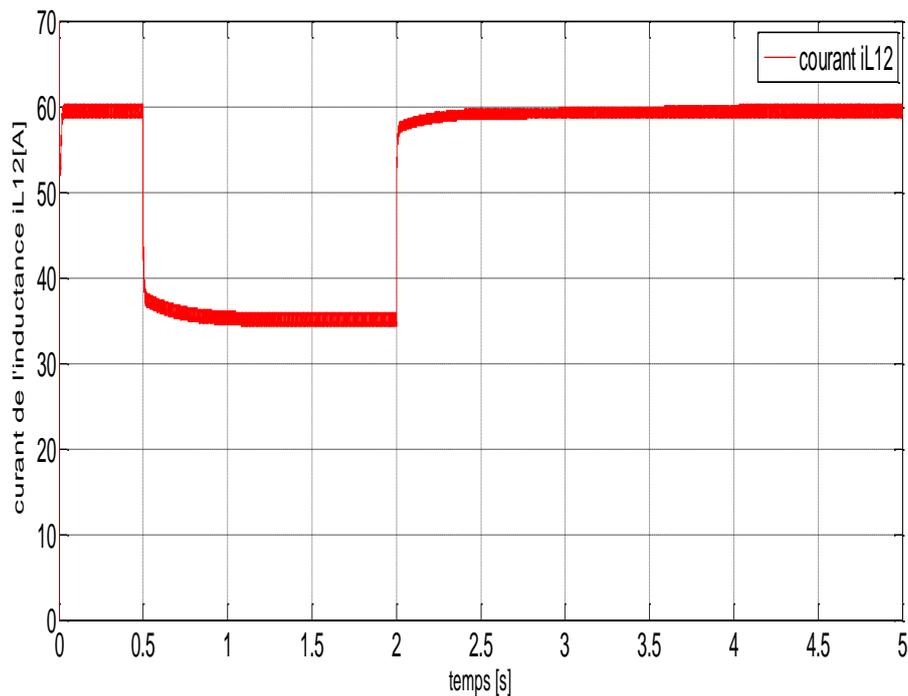


Figure (3.10) : courant de l'inductance i_{L12} (ibc) par variation de charge

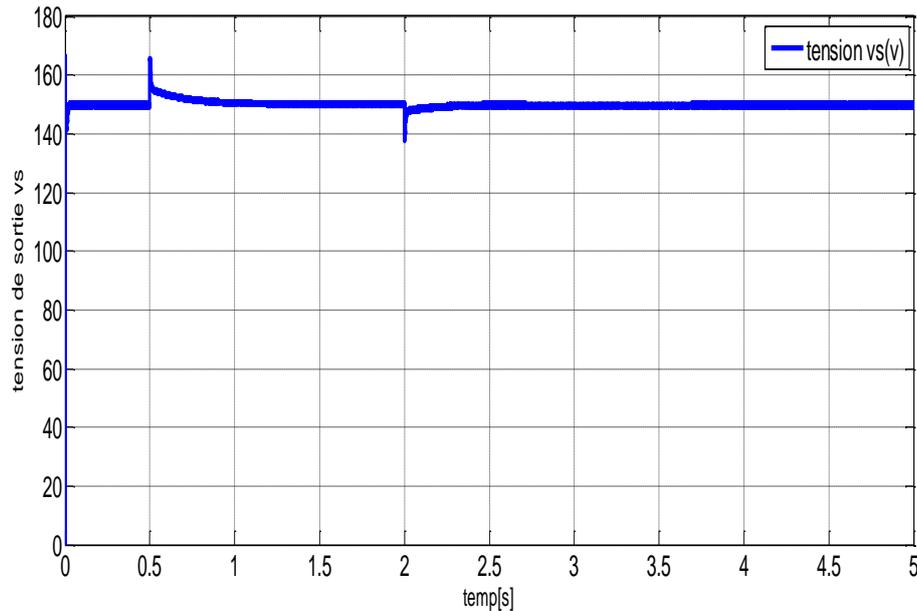


Figure (3.11) : tension de sortie de convertisseur (ibc) par variation de charge

3.8 Interprétation :

La figure (3.8) le courant de charge i_{ch} est réponde rapide avec le temps de variation de charge (reponse dynamique) mais avec un petit dépassement et faible ondulation.

La figure (3.9) et figure (3.10) on observe que de courant des inductances i_{L11} et i_{L12} par suit le courant de charge mais avec petite retard et sans dépassement

La figure (3.11) on observe que la tension de sortie de convertisseur (ibc) il ya un temps de repense instantanément à $t=0.5(s)$ et à $t=2(s)$ mais avec dépassement important.

Donc la commande avec deux boucles présente des bonnes performances dynamiques lors de variation de la charge mais avec de petite dépassement et oscillations de la tension de sortie et de courant de charge. et réponse dynamique du régulateur non linéaire de courant mode glissant

3.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la stratégie de commande qui a été appliquées à des convertisseurs de type basse tension élévateur (ibc). La stratégie est basée sur une structure de contrôle à deux boucle avec une boucle externe de tension et une boucle interne de courant pour de convertisseur propose. Cette commande présente des résultats intéressants et des performances (la repense dynamique) mais avec dépassement non négligeable de tension donc Cette stratégie est ni robuste ni efficace des variations paramétriques ou de charge

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons proposé un état de lieu sur les convertisseurs basse tension DC-DC d'interface permettant l'interconnexion d'une source tension non linéaire et d'un bus DC moyenne tension. L'échantillon choisie, pour l'étude, est une pile à combustible de type PEM

Après avoir rappelé les généralités sur les piles à combustibles dans le premier chapitre, une étude sur le convertisseur basse tension isolé et non-isolé pour les applications pile à combustible a été présentée. Nous avons concentré notre intérêt sur les convertisseurs non isolés. Et le choix entre les structures non isolés est basé sur le calcul des pertes et le rendement de chaque structure pour différentes gammes des tensions de sortie avec la même tension d'entrée.

Pour ce faire, notre choix s'est porté sur un convertisseur BOOST entrelacé à deux branches ayant moins de perte de joules et un meilleur rendement.

La modélisation moyenne en petits signaux, bien connue sous le nom Small-signal aéragé model a été appliquée pour du convertisseur proposé afin de soutenir la conception optimale du contrôle de convertisseur. Nous avons proposé la stratégie de contrôle appliqué au convertisseur BOOST entrelacé. La stratégie est basée sur une structure de contrôle à deux boucles ; une boucle externe de tension avec correcteur linéaire de type PI, et une boucle interne de courant basé sur un correcteur non linéaire par mode glissant pour le convertisseur proposé . La simulation sous Matlab-simulink présente des résultats intéressants avec des performances dynamiques de cette stratégie de commande.

Donc, afin d'avoir du dynamisme, de l'efficacité et de la haute performance, nous estimons qu'il convient mieux d'appliquer une stratégie de commande développée comme celle de la régulation d'énergie.

Références Bibliographiques

- [1] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, “A Hybrid Fuel Cell Power System”, IEEE Transaction Industrial Electronics, vol. 56, no.4, pp. 1212–1222, Avril. 2009.
- [2] A. Kirubakaran, S. Jain, R. K. Nema, “A review on fuel cell technologies power électronique interface”, Renewable and sustainable energy reviews, vol.13, no. 9, pp. 2430–2440, Dec. 2009
- [3] [Lee, 2006] J. Lee, J. Jo, S. Choi, and S. B. Han, “A 10-kW SOFC Low-Voltage Battery Hybrid Power Conditioning System for Residential Use”, IEEE Transaction Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 575–585, Juin 2006.
- [4] H. Maker, « optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateur ». doctorat de l'université de technologie belfort montabéliard ,4.novembre, 2008.
- [5] Wikipédia
- [6] G.-Y. Choe, J.-S. Kim, H.-S. Kang, B.-K. Lee and W.-Y. Lee, “Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)”, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS, pp. 271-276, 8-11 Octobre 2007.
- [7] A.M. Ebesui, C.V. Boccuzzi, G. Ett, G. Janolio, G.Y. Saiki, J.A. Jardini, M. Ellern and V. Ett, “Development and Tests of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) for Stationary Generation”, Transmission and Distribution Conference and Exposition : Latin America, 2004 IEEE/PES, pp. 605- 610, 8-11 Novembre 2004.
- [8] P. Buasri and Z.M. Salameh, “An Electrical Circuit Model for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ”, IEEE-Power Engineering Society General Meeting, 18-22, Juin 2006
- [9] A. LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible ». Doctorat de l'Université de Franche-Comté, 24 novembre 2005.
- [10] G. LEFEVRE, « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible ». doctorat d'Université Joseph Fourier, 26 Novembre 2004.
- [11] Electric & Hybrid : Vehicle technology international Annual review 2005.
- [12] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, M. Xu, “Power management for fuel-cell power system cold start”, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 24, no. 10, pp.2391–2395, Oct. 2009.
- [13] P. Thounthong, P. Sethakul, S. Raël, B. Davat, “Modeling and control of a fuel cell current control loop of a 4-phase interleaved step-up converter for dc
-

- distributed system”, IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 230–236, 15-19 Jun. 2008.
- [14] S. V. G. Oliveira, I. Barbi, “A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high-frequency transformer for DC renewable power source applications”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 58, no. 8, pp.3567–3580, Aug
- [15] B. Huang, A. Shahin, J.P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, “High voltage ratio non-isolated dc-dc converter for fuel cell power source applications”, IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 1277–1283, 15-19 Jun.2008.
- [16] R.W. Erickson, D. Maksimovic, Fundamentals of power electronics, 2ed. : Kluwer academic publishers, 2001.
- [17] T. Haimin, J. L. Duarte, M. A. M. Hendrix, “Three-port triple-half-bridge bidirectional converter with zero-voltage switching”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.23, no. 2, pp.782–792, Mar. 2008.
- [18] Ph .THOUNTHONG « CONCEPTION D’UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS ». DOCTORAT, L’Institut National Polytechnique de Lorraine, 9 décembre 2005.
- [19] O .DELEAGE, « Conception, réalisation et mise en œuvre d’un micro-convertisseur intégré pour la conversion DC/DC ». doctorat, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER, 5.novembre .2009.
- [20] S. Djamel « Contribution à l’étude et au Contrôle d’un Convertisseur DC-DC Utilisé dans les Système Photovoltaïque ».thèse Magister, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 20 15 / 20 16
- [21] N. Mohan and T. M. Undeland, Power electronics: converters, applications, and design: John Wiley & Sons, 2007.
- [22] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [23] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, and G. C. Verghese, Principles of power electronics: Addison-Wesley Reading, USA, 1991.
- [24] R. Saadi, M. Bahri, M. Ayad, M. Becherif, O. Kraa, and A. Aboubou, "Dual Loop Control of Fuel Cell Source Using Non-isolated IBC-IDDB Converter for Hybrid Vehicle Applications," Energy Procedia, vol. 50, pp. 155-162, 2014.
- [25] M.-Y. Ayad, M. Becherif, and A. Miraoui, "Sliding Mode Control of DC Bus Voltage of a Hybrid Sources using Fuel Cell and Supercapacitors for Traction System," in Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, 2007, pp. 383-388.
-

- [26] M. Kabalo, D. Paire, B. Blunier, D. Bouquain, M. G. Simões, and A. Miraoui, "Experimental evaluation of four-phase floating interleaved boost converter design and control for fuel cell applications," IET power electronics, vol. 6, pp. 215-226, 2013.
- [27] R.Saadi, "convertisseurs Basse tension (42v,450v) ; application source hybride utilisant une pile à combustible" doctorat, université mohamed khider biskra.