



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Mansouri farouk
Hebilez houssem eddine

Le : mercredi 23 septembre 2020

Convertisseur DC/DC entrelacé pour les applications pile à combustible

Jury :

pr	Titaouine Abdennacer	Professeur	Université de Biskra	Président
Dr.	Saadi Ramzi	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	Mohammadi Messaoud	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 – 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Option : RESEAU ELECTRIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

***Convertisseur DC/DC entrelacé pour les applications
pile à combustible***

Présenté par :

Mansouri farouk

Hebilez houssem eddine

Avis favorable de l'encadreur :

Saadi Ramzi

Avis favorable du Président du Jury

Titaouine Abdennacer

Cachet et signature

REMERCIEMENTS

Avant tous je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur *Saadi Ramzi*, Professeur à l'Université de Biskra, pour son parfait encadrement, son soutien constant, son aide précieux et ses conseils pendant toute la période de préparation de cette mémoire.

Mes remerciements aux enseignants du département d'électrotechnique.

Enfin, je ne serai terminé sans exprimer mes remerciements à ma famille et mes amis

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à

ceux qui mon entourés d'amour et de tendresse, à:

Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifie tout au long de

mes études.

Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Au mes très chers frères

Au mes très chers sœurs

A toute ma famille

A mes très chers amis.

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des différentes technologies de piles à combustible.....8

Tableau 2-1 : Comparaison entre les structures Dc/Dc basse tension non-isolé.....37

Liste des figures

Figure1.1 : Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. Principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.....	5
Figure1.2 : Différents constituants d'une cellule	6
Figure 1.3 : Structure et exemples de stack.....	6
Figure 1.4 : Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.....	7
Figure1.5 : le principe fonctionnement.....	9
Figure1.6 : Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g	10
Figure1.7 : unité de pile combustible.....	11
Figure1.8 : station hydrogène	11
Figure1.9 : Pile Ballard Mark 90véhicule Ford.....	11
Figure 1.10 : Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie.....	14
Figure 2.1 : Convertisseur isolé avec transformateur asymétrique : (a) Flayback ; (b) Forward.....	18
Figure 2.2 : Convertisseurs continu-continu avec transformateur symétrique: (a) demi pont ; (b) pont complet ; (c) push pull.....	20
Figure2.3 : Convertisseur isolé avec transformateur : Flayback.....	21
Figure 2.4 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BOOST en CCM.	25
Figure 2.5 : Convertisseur BOOST entrelacé à 2 branche.....	27
Figure 2.6 : Commande des transistors d'IBC.....	27
Figure 2.7 : Courants dans les inductances de IBC.....	28
Figure 2.8 : Courant de la source de IBC.....	28
Figure 2.9 : Tension aux bornes d'un transistor de IBC.....	28

Figure 2.10 : Courant aux bornes d'un transistor de IBC.....	28	
Figure 2.11 : Tension aux bornes d'un diode de IBC.....	28	
Figure 2.12 : Courant aux bornes d'un diode de IBC.....	28	
Figure 2.13 : Commande des transistors de IBC.	29	
Figure 2.14 : Courants dans les inductances de IBC.....	29	
Figure 2.15 : Courant de la source de IBC.....	29	
Figure 2.16 : Tension aux bornes d'un transistor de IBC.....	29	
Figure 2.17 : Courant aux bornes d'un transistor de IBC.....	29	
Figure 2.18 : Tension aux bornes d'un diode de IBC.....	30	
Figure 2.19 : Courant aux bornes d'un diode de IBC.....	30	
Figure 2.21 : Convertisseur double BOOST dual entrelacé IDDB.....	32	Figure
2.22 : Commande des transistors de IDDB.....	33	
Figure 2.23 : Courant dans le IDDB.....	33	
Figure 2.24 : Courant de la source.....	33	
Figure 2.25 : Tension et Courant d'un transistor de IDDB.....	33	
Figure 2.26: Tension et Courant d'un diode de IDDB.....	33	
Figure 2.27 : Tension de sortie et tension aux bornes les capacités.....	34	
Figure 2.28 : Commande des transistors de IDDB.....	34	
Figure 2.29 : Tension et Courant d'un transistor de IDDB.	34	
Figure 2.30 : Tension et Courant d'un diode de IDDB.....	34	
Figure 2.31: Tension de sortie et tension aux bornes les capacités.	35	
Figure 3.1: Structure du convertisseur étudié.....	38	
Figure 3.2: L'architecture de la stratégie de command	41	
Figure 3. 3 : Variations de courant de charge.....	43	

Figure 3.4 : courant d'inductance IL21.....	43
Figure 3. 5 : courant d'inductance IL22	43
figure 3.6 : tension de capacité VC1	44
figure 3.7 : tension de capacité VC2.....	44
figure3.8 : tension de sortie VS	45

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
I. 1. Introduction :	3
I. 2. Historique :	3
I. 3. Principe de fonctionnement :	4
I. 4. Composants de la pile à combustible :	5
I. 4. 1. Cellule unitaire :	5
I. 5. Les différents types des piles à combustible :	6
I. 5. 1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC) :	8
I. 5. 2 Applications des piles à combustibles :	9
I. 5. 2. 1 Applications portables :	9
I. 5. 2. 2 Applications stationnaires :	9
I. 5. 2. 3 Applications dans le transport :	10
I. 6. Avantages et inconvénients des piles à combustible :	11
I. 7. Comparaison entre la pile à combustible et d'autres sources d'énergies	12
I. 8. Conclusion	14
II. 1. Introduction	16
II. 2. Convertisseurs statiques basse tension continu-continu isolé	16
II. 2. 1. Convertisseur isolé avec transformateur asymétrique	17
II. 2. 2. Convertisseur isolé avec transformateur symétrique	18
II. 2. 3. Convertisseur Flyback :	20
II. 3. Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé	21
II. 3. 1. Convertisseur élévateur BOOST	21
II. 3. 2. Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)	24
II. 3. 3. Convertisseur Double BOOST Dual entrelacé (IDDB)	30
II. 4. Conclusion	35
III. 1. Introduction	46
III. 2. Modélisation de convertisseur proposé	46
III. 3. Stratégie de commande du convertisseur proposé	48
III. 3. 1. La commande avec deux boucles	48
III. 3. 2. Régulateur de courant par mode glissant	49
III. 4. Résultats de simulation de la commande avec deux boucles	50

III. 5. Conclusion.....	53
<i>Conclusion générale</i>	54
<i>Bibliographiques</i>	47

RESUMES

Les piles à combustible sont des sources d'énergie intéressante dans les applications de véhicules électriques et la production décentralisée. Cependant, 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 DC / DC est nécessaire pour élever la faible tension de quelques centaines de volts pour alimenter la charge. Ce travail concerne l'étude, le dimensionnement 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 convertisseur double dual BOOST entrelacé.

ملخص

خلايا الوقود هي مصدر للطاقة مثير للاهتمام في تطبيقات السيارات الكهربائية ومحطات التوليد. ومع ذلك، خلايا الوقود لديها إنتاج جهد منخفض واستجابة بطيئة بسبب ديناميكية الدورات الخارجية المساعدة لها. لهذا السبب، لا بد من محول للجهد مستمر مستمر لرفع الجهد المنخفض من عدة مئات من الفولت لتشغيل الحمل. هذا العمل يهدف إلى دراسة وتصميم وكذلك السيطرة على نسبة تحويل عالية لتطبيقات double dual boost entrelacé محول جهد منخفض مستمر مستمر من النوع الغير معزول مع خلايا الوقود. المحول المقترح من نوع

Introduction générale

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 1er chapitre s'intéresse à Généralité sur la pile à combustible

Par contre le second a pour objectif la Convertisseur basse tension pour application pile à combustible

Enfin nous avons abordé à la Modélisation, commande du convertisseur

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur la pile à combustible

I. 1. Introduction :

Nous avons vu qu'un convertisseur de courant peut permettre à lui seul d'assurer la fluence d'énergie entre une source alternative et une source continue. Cependant, par la mise « en série » d'un convertisseur DC/DC (appelé également convertisseur de courant continu à pulsation) on tire parti de la caractéristique de ces derniers de fonctionner à fréquence de commutation élevée. Ceci représente un avantage indéniable dans le dimensionnement de tout filtre de lissage, ainsi que dans le comportement dynamique d'un tel système.

Dans le contexte actuel de l'évolution du système énergétique, il est pertinent de s'appuyer sur des technologies avancées utilisant l'hydrogène, en particulier la pile à combustible (PAC) dont il est question dans ce rapport.

Le principe de la pile à combustible repose sur la production d'électricité, de chaleur et d'eau en recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. Aujourd'hui, il existe trois grands domaines dans lesquels la PAC est développée : le portable, le transport et le stationnaire. C'est dans ce dernier secteur que les PAC présentent les potentiels de développement les plus intéressants ; en effet, elles pourront toucher, dans les années à venir, des publics très divers allant des particuliers aux distributeurs d'énergie, en passant par les entreprises.

C'est ainsi que le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer soutient leur développement au travers de l'ADEME dans le fond « Démonstrateurs et plateformes technologiques en énergies renouvelables et décarbonnées et chimie verte »

Aujourd'hui, en France, les PAC sont régies par une réglementation générale issue des directives européennes. Or, pour permettre et accompagner le développement de cette technologie, il peut être nécessaire de mettre en place une réglementation spécifique et évolutive. La première étape d'accompagnement serait d'établir un état des lieux :

I. 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].

I. 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].

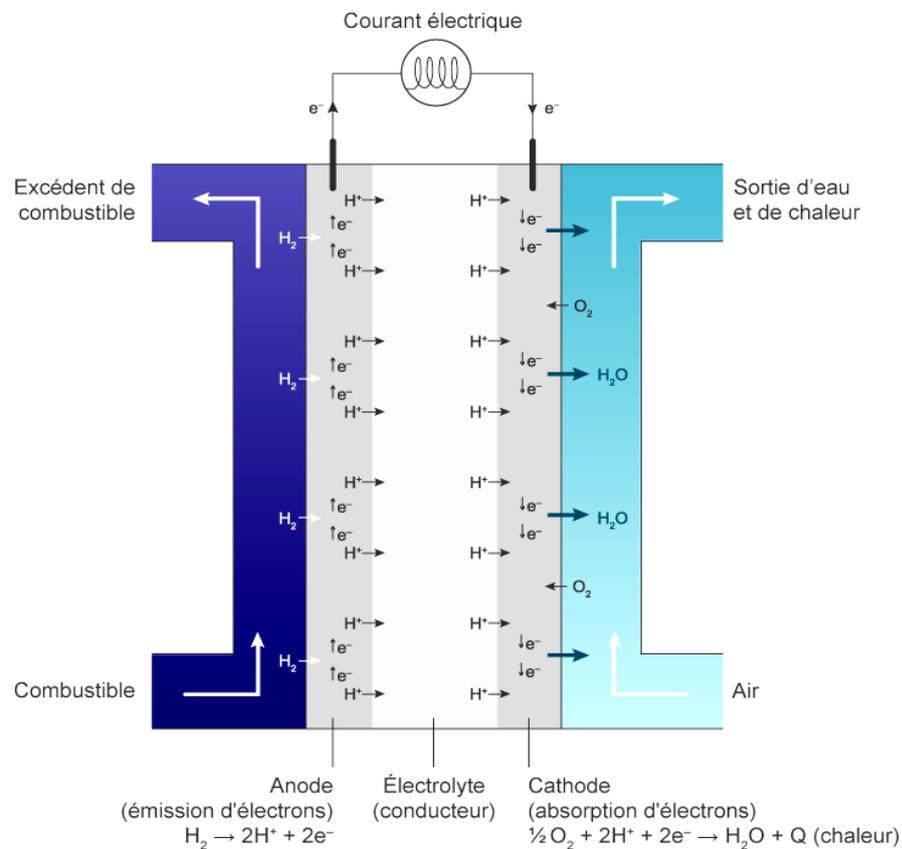


Figure1.1 : Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.

Équation chimique de l'électrolyse :



Équation chimique de la pile à combustible :



I. 4. Composants de la pile à combustible :

Les différents éléments, constituant le coeur 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,

I. 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

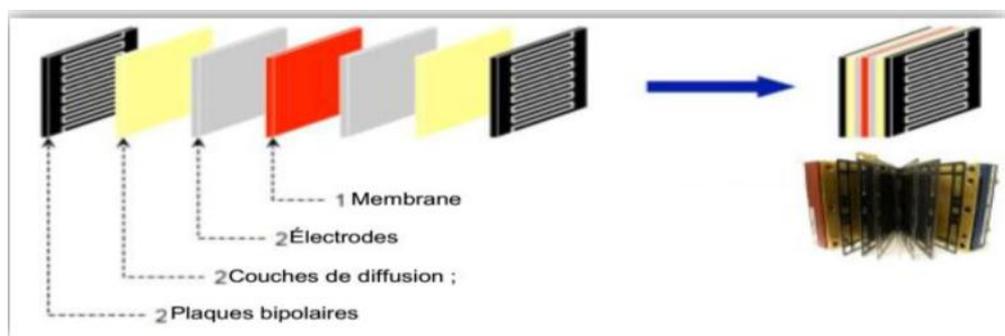


Figure1.2 : Différents constituants d'une cellule

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.

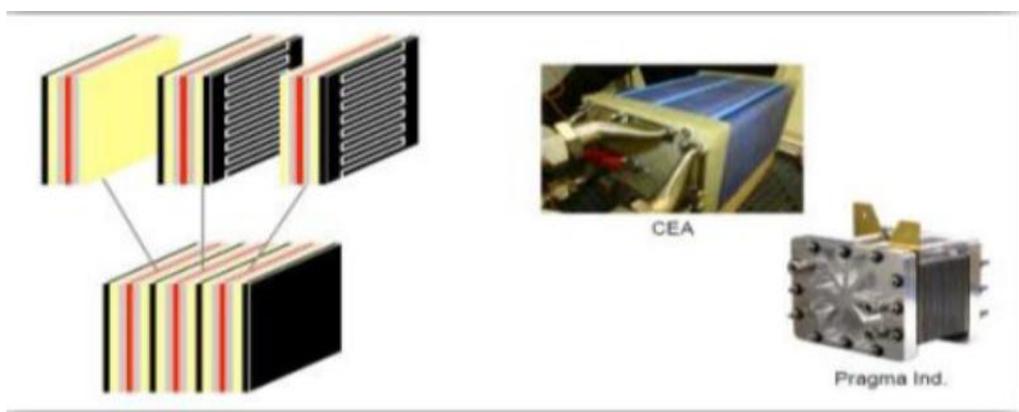


Figure 1.3 : Structure et exemples de stack

I. 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 soient 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)

La figure 1.4 représente une classification des différents types de pile à combustible en fonction de la température ; le tableau 1.1 récapitule les différents types de piles et leurs caractéristiques respectives.

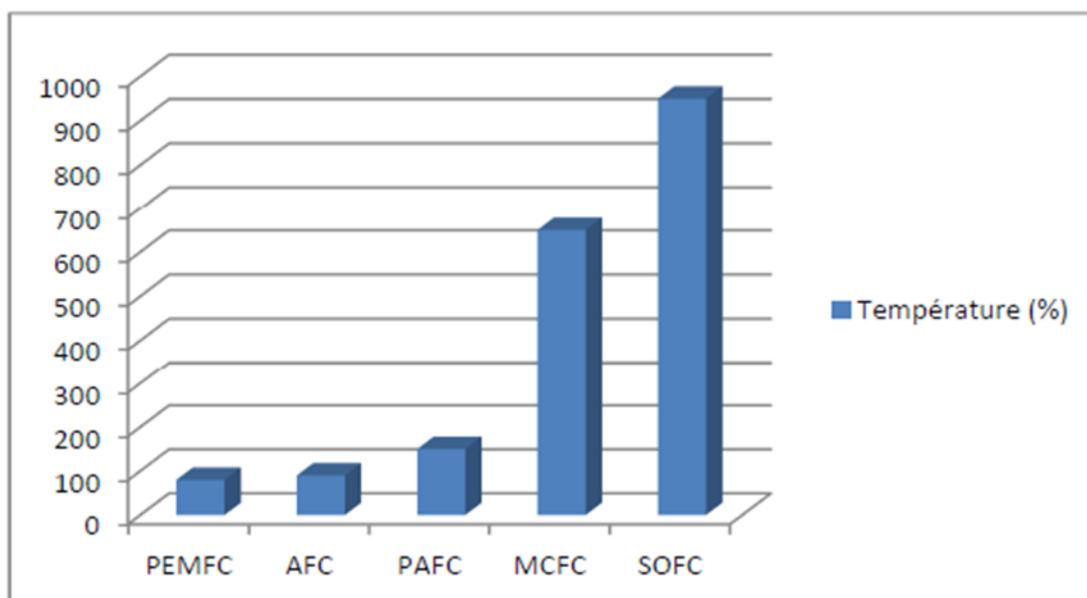


Figure 1.4 : Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alcalin Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxyd Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO 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	Utilisée	Utilisée	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau 1 : Comparaison des différentes technologies de piles à combustible

I. 5. 1 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 0.8A. cm² 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 :

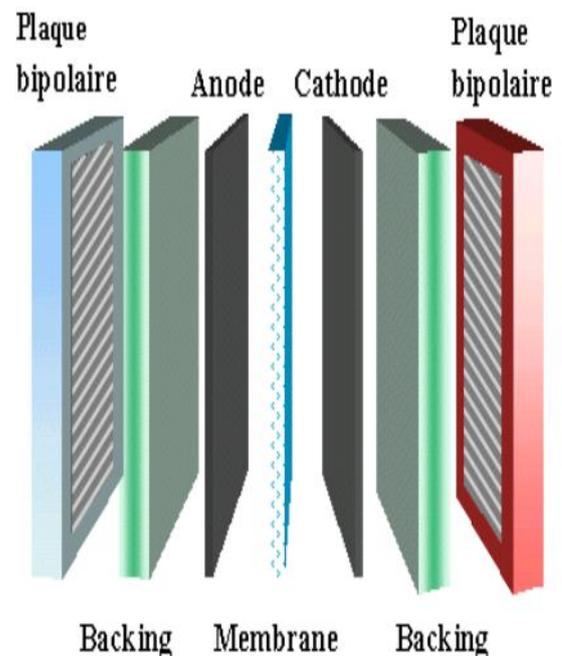
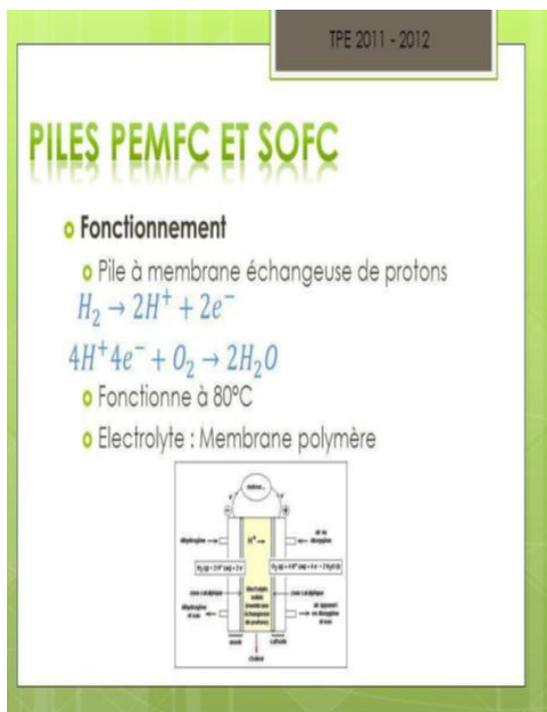


Figure1.5 : le principe fonctionnement figure1.5 : consistant de pile (PEMFC)

I. 5. 2 Applications des piles à combustibles :

On a trois types d'applications distingue :

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

I. 5. 2. 1 Applications portables :

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], [9].



Figure1.6 : Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g

I. 5. 2. 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

I. 5. 2. 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].



Figure 1.8 : station hydrogène



Figure 1.9 : Pile Ballard Mark 90 véhicule Ford

1. 6. 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) FCV
- 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 1.2 : 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. 7. Comparaison entre la pile à combustible et d'autres sources d'énergies

Les piles à combustible, batteries, condensateurs et les super condensateurs sont tous des dispositifs d'énergie. Les piles à combustible et les batteries reposent sur la

conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. La différence entre les deux est qu'une pile nécessite des réactifs externes pour fournir l'énergie, contrairement à une batterie. De ce fait, alors qu'une batterie peut être déchargée, une pile à combustible n'a jamais à faire face à une telle situation. Les Condensateurs reposent sur la séparation physique de la charge électrique à travers un diélectrique au milieu, tel qu'un film de polymère ou une couche d'oxyde. Chaque type de dispositif offre une combinaison différente de la densité de puissance et la densité d'énergie. Les super condensateurs reposent sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un super condensateurs, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte [12]. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Les comparaisons habituelles des dispositifs d'énergies utilisent la représentation du diagramme de Ragone (figure 1.10). Il s'agit d'un moyen de comparaison surtout intéressant pour les applications dans lesquelles la masse est un critère très important, mais dans le contexte de traitement de l'énergie électrique, la durée de vie et le coût total (investissement, énergie perdue et vieillissement en recyclage) constituent des critères encore plus importants.

Sur le diagramme de Ragone, les différents dispositifs d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique-énergie spécifique sont représentés. Ce diagramme montre que les piles à combustibles présentent les énergies spécifiques les plus élevées par rapport aux autres dispositifs. Néanmoins, leur puissance spécifique reste très limitée (quelques dizaines de W.Kg⁻¹), et leur irréversibilité en courant interdit la récupération d'énergie.

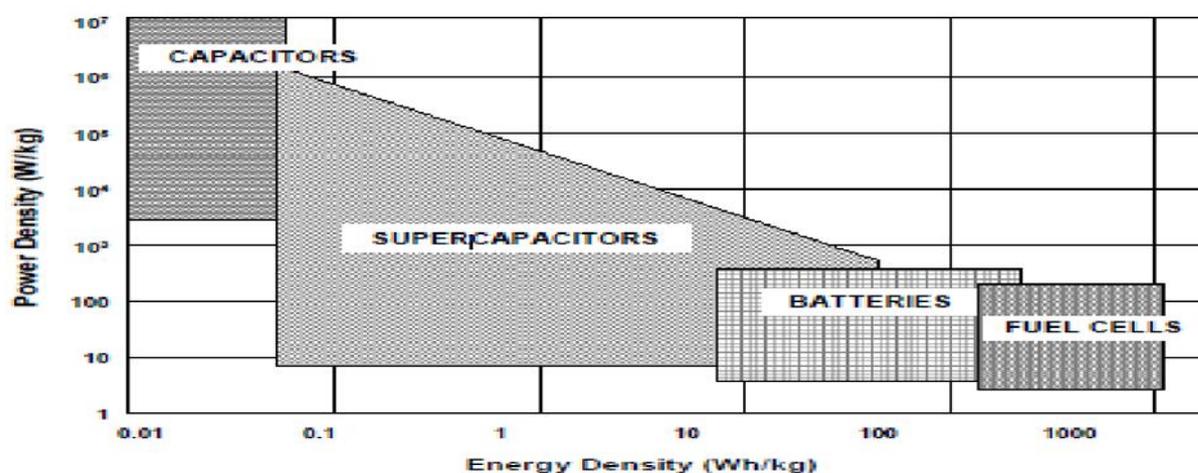


Figure 1.10 : Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie [13].

1. 8. Conclusion

Dans le premier chapitre, on a présenté un état de l'art de la pile à combustible, puis son principe de fonctionnement et les différents types existants, suivit d'une comparaison entre elles. Un bref aperçu a été mentionné sur les auxiliaires des piles, qui contribuent au bon fonctionnement de ces dernières. La pile PEMFC, à été choisie pour notre travail, vu qu'elle répond aux exigences du cahier de charge, à savoir son faible poids et sa température de fonctionnement.

Le chapitre suivant est totalement consacré aux convertisseurs statiques basse tension, associé à la pile à combustible, qui peuvent être utilisés comme interface entre cette pile et une charge électrique.

Chapitre II

Convertisseur basse tension pour application pile à combustible

II. 1. Introduction

Le présent chapitre traite de la conversion DC/DC, qui a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu.

La mise en œuvre de tels convertisseurs se justifie dans les cas suivants :

- on doit alimenter une source continue, et l'on dispose d'emblée d'une alimentation continue, de type batterie par exemple. Il est important dans ce cas de disposer d'un convertisseur direct qui permette d'assurer la fluence d'énergie entre de telles sources,
- on doit alimenter une source continue, mais l'on dispose d'une source d'alimentation alternative.

La conversion d'énergie peut se réaliser alors en deux étapes :

- conversion alternative continue - continue par un convertisseur de courant
- conversion continue pour ajuster les valeurs des grandeurs de sortie continues

II. 2. Convertisseurs statiques basse tension continu-continu isolé

Certaines applications nécessitent une isolation électrique entre l'entrée et la sortie de convertisseur. Ces convertisseurs utilisent un circuit à haute fréquence avec un transformateur pour l'isolation galvanique. L'opération de dizaines à des centaines de haute fréquence kilohertz permet la réduction de la taille de transformateur. Néanmoins, le fonctionnement à haute fréquence peut être pénalisé par l'augmentation des effets courants de Foucault [15]. Cela peut être un facteur limitant pour un système de grande puissance. Cependant, il peut être résolu par une opération multi phase comme illustré à [16, 17].

Le transformateur permet d'élever ou abaisser le rapport de conversion sans compromis le rendement de convertisseur. Par un choix approprié du nombre de spires de transformateur, les contraintes de courant et de tension imposées sur les transistors et les diodes peuvent être réduites au minimum et peuvent conduire à un rendement amélioré et un moindre coût.

Dans ce paragraphe, on présente quelque structures de convertisseurs basse tension continu-continu isolé souvent rencontrées dans la littérature pour les systèmes à piles à combustible. La simplicité de la plupart de ces structures est justifiée par la recherche de la commodité de réalisation ou le faible coût. Cependant, certaines structures plus complexes conduisent à des performances plus élevée.

II. 2. 1. Convertisseur isolé avec transformateur asymétrique

La **Figure 2.1** montre deux types de convertisseur DC-DC isolé, le premier est connu comme Flyback et le second comme Forward. Le convertisseur Flyback a un faible nombre de composants et une structure simple. Les principaux inconvénients de cette topologie sont ondulation de courant d'entrée élevés, les contraintes de courant et de tension sur les dispositifs électroniques de puissance et une source de courant discontinu. Donc, Ce derniers ne sont pas recommandés dans les applications basse tension - fort courant comme.

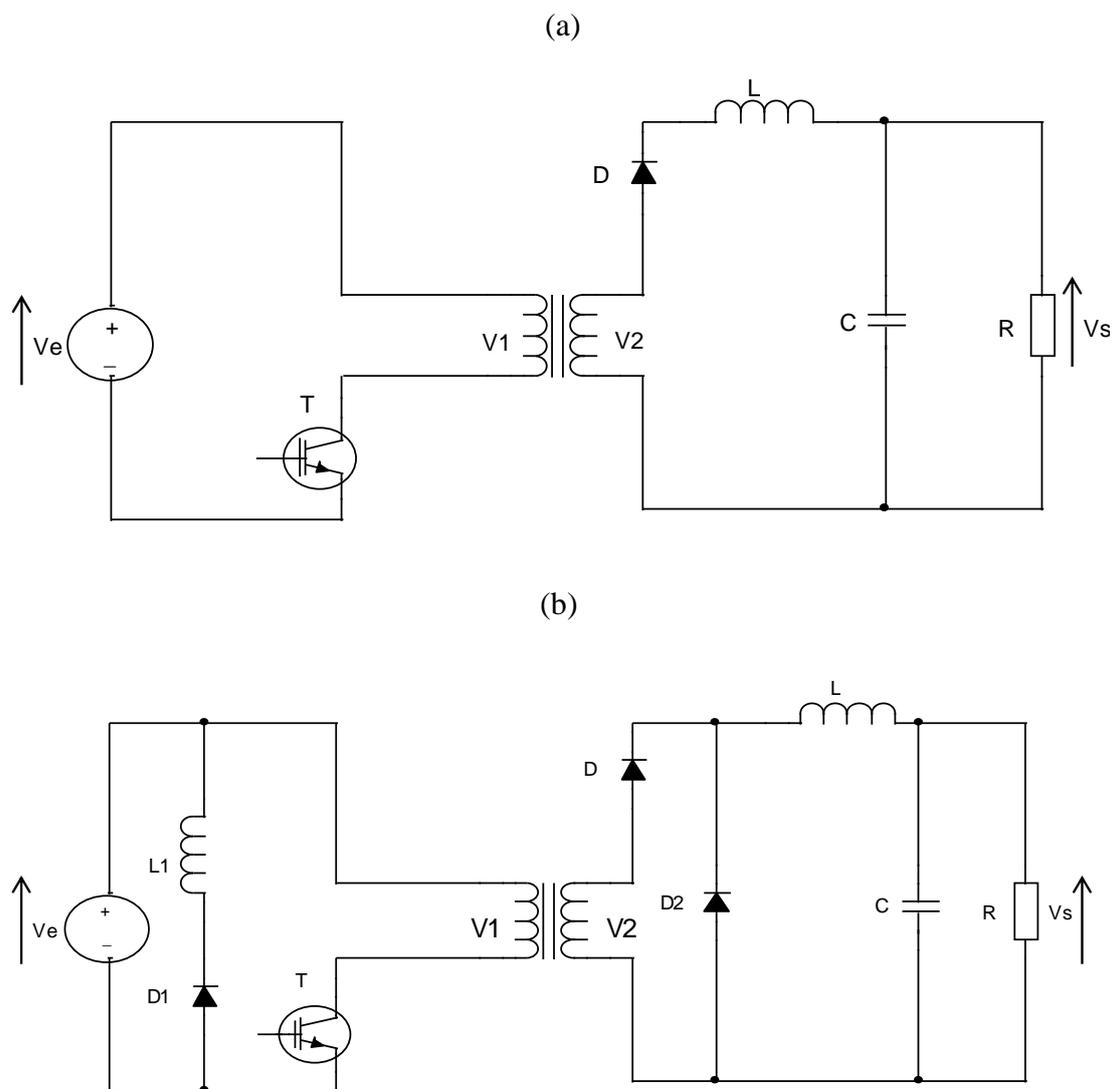
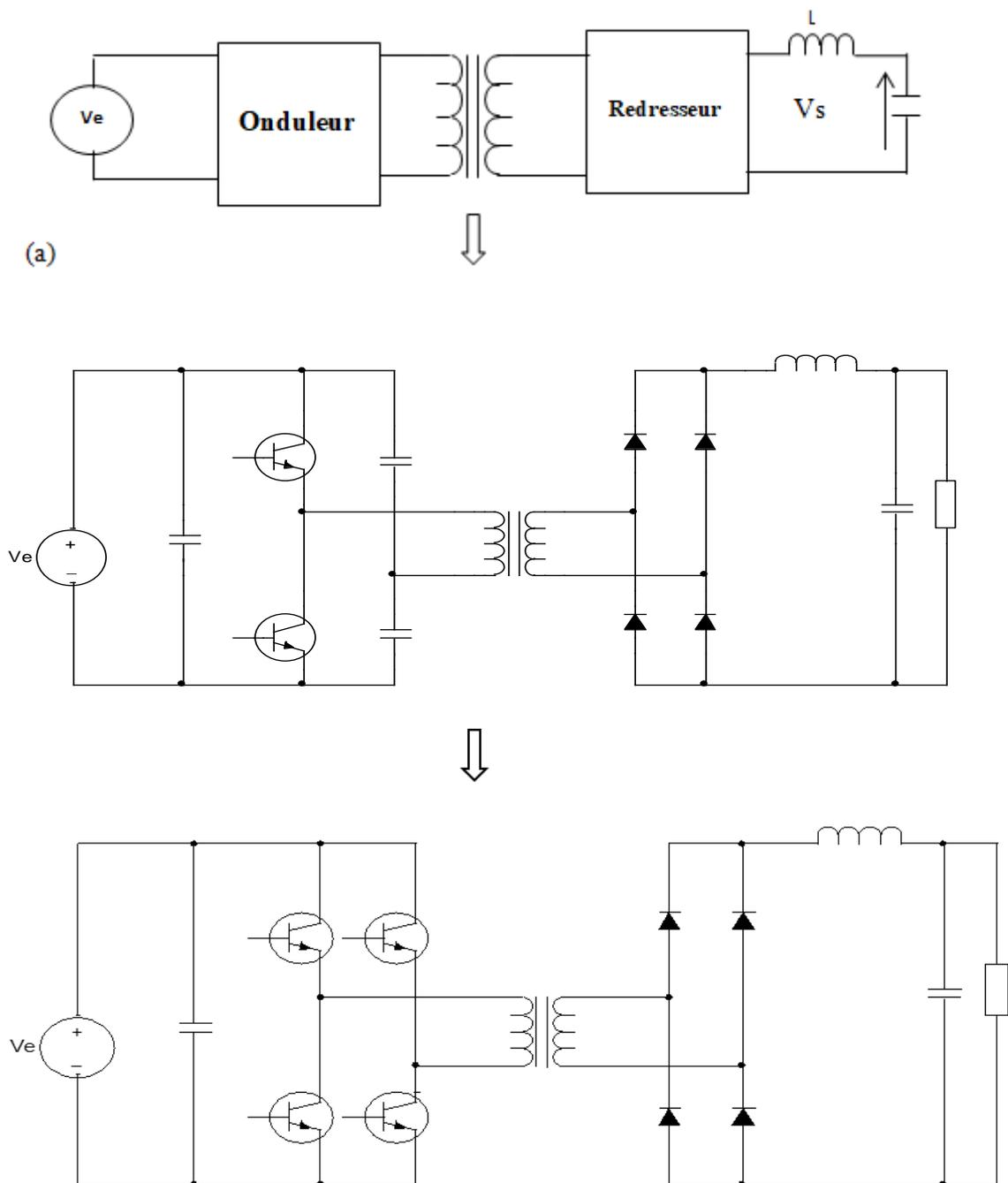


Figure 2.1 : Convertisseur isolé avec transformateur asymétrique : (a) Flyback ; (b) Forward.

II. 2. 2. Convertisseur isolé avec transformateur symétrique

Ces types de convertisseur composé à coté primaire d'un étage de conversion à sortie alternative (onduleur) peut être en demi-pont ou en pont complet ou montage push pull et au milieu de convertisseur un transformateur fonctionnant de préférence à haute fréquence pour réduire son volume et à coté secondaire un redresseur non commandé être simple alternance avec deux diodes ou double alternance avec quatre diodes en pont ou deux diodes et un transformateur à point milieu (figure 2.2)[18].



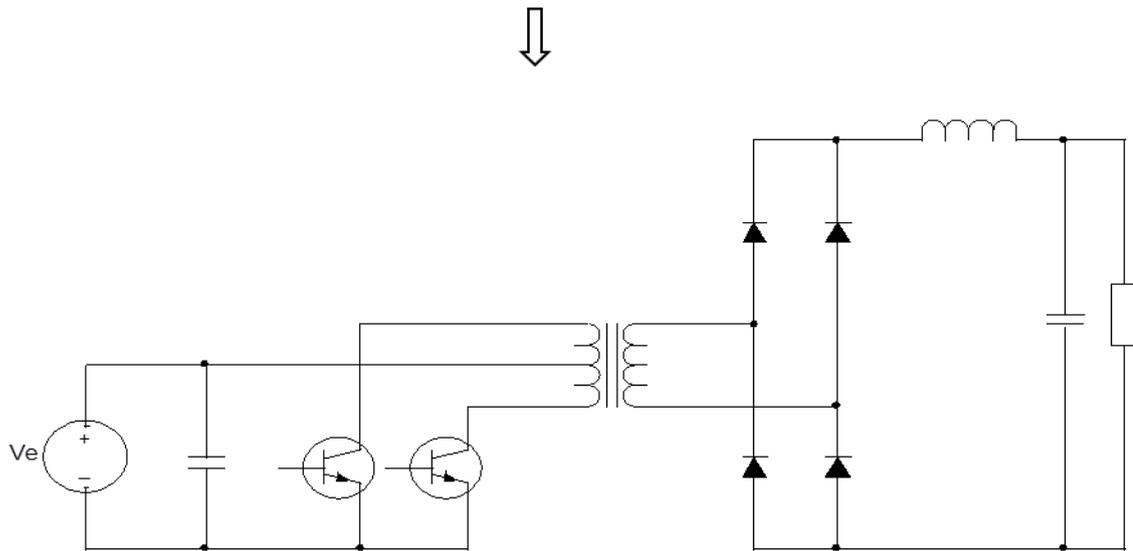


Figure 2.2 : Convertisseurs continu-continu avec transformateur symétrique: (a) demi pont ; (b) pont complet ; (c) push pull.

Le convertisseur DC/DC a demi pont (figure 2.2 a) est une autre structure qui peut être intéressante pour être couplée à une PAC. Dans cette structure, deux interrupteurs sont utilisés. Le transformateur isole 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.

Cette structure présente les principaux avantages suivants :

- Pas d'inductance à courant élevé est nécessaire au primaire du convertisseur.
- Les contraintes de commutation sont réduites.
- Les deux étages sont isolés.

Le principal inconvénient de cette structure est les pertes de commutation élevées.

Une autre structure isolée intéressante est le convertisseur push-pull. Ce convertisseur est présenté dans la Figure 2.2.c. Cette structure est caractérisée par l'utilisation d'un transformateur à prise centrale et seulement deux interrupteurs dans l'étage primaire. Le principal inconvénient de cette structure est que plus de contraintes de tension existent sur les interrupteurs.

Ces interrupteurs doivent soutenir un niveau de tension deux fois plus élevé que la tension de sortie de la pile [20].

II. 2. 3. Convertisseur Flyback :

C'est un convertisseur simple, dérivé du Buck-Boost comportant un transformateur de gain $m = n_2 / n_1$, 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)

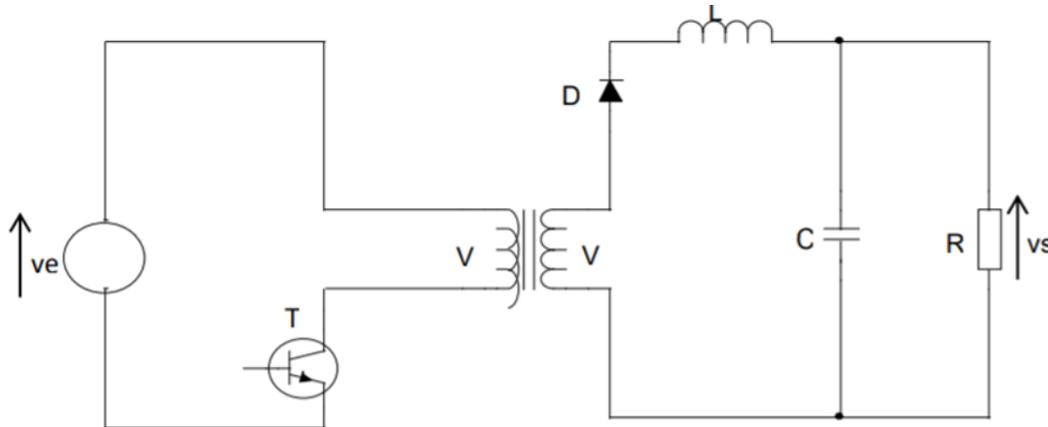


Figure2.3 : Convertisseur isolé avec transformateur : Flyback

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

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} * m$$

Ou α est le rapport cyclique

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

$$\Delta i = \alpha * V_e / L_1$$

$$\Delta v_e = \frac{\alpha * I_s}{C * f}$$

F Etant la fréquence de fonctionnement du convertisseur ;

L_1 l inductance primaire et C LA CAPACIT2 DESORTIE.

A- 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

B- 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 [21]

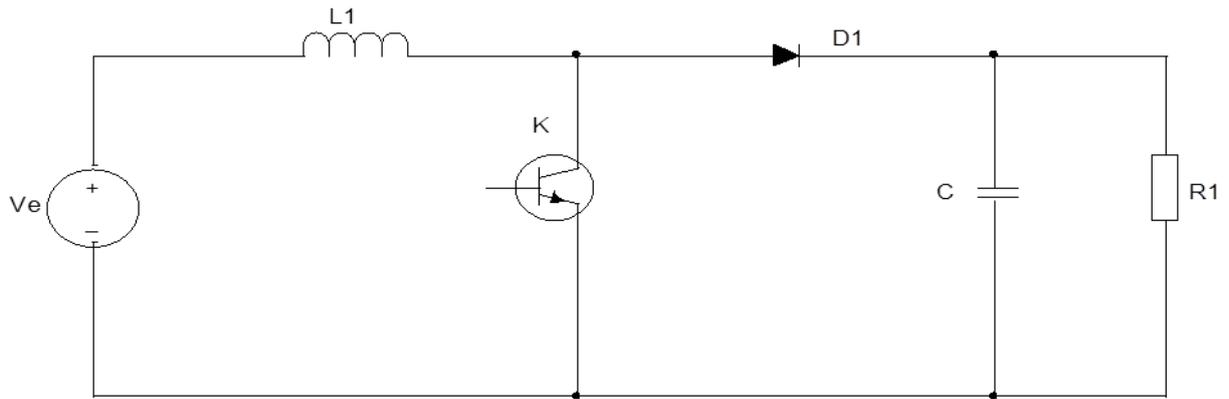
En raison de contraintes non négligeant de poids, le volume et les pertes dans le transformateur de puissance dans les convertisseurs isolés, nous avons concentré notre intérêt sur les convertisseurs non isolés comme une alternative solution pour surmonter les contraintes précédentes et les convertisseurs DC-DC non isolés semblent répondre à ces exigences.

II. 3. Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé

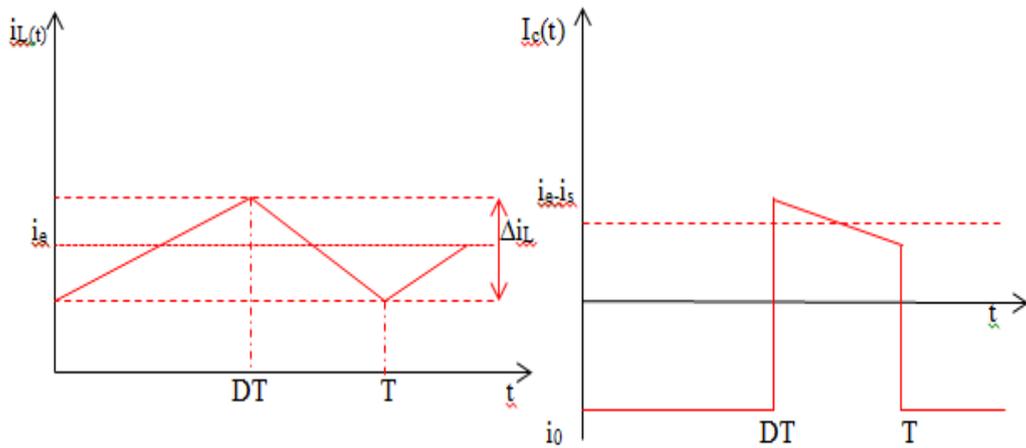
Nous allons intéresser dans cette section aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de BOOST. Plusieurs variantes existent: le BOOST classique, le BUCK- BOOST, le BOOST entrelacé, le BOOST à trois niveaux et le double BOOST dual entrelacé...etc. Ces structures, quant à elles,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

II. 3. 1. Convertisseur élévateur BOOST

La première topologie est un convertisseur élévateur de tension Boost, la tension de sortie est supérieure à sa tension d'entrée. Le convertisseur élévateur conventionnel sont largement employés dans la correction du facteur de puissance (PFC) en raison de la structure de circuit simple. La figure 2.9 montre le convertisseur élévateur, son taux de conversion et les formes d'onde de l'état d'équilibre en mode de conduction continue (CCM).

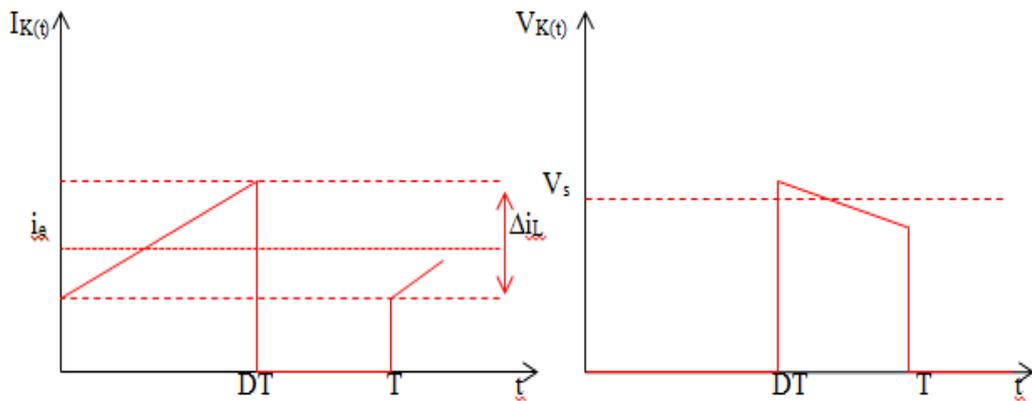


(a) Convertisseur BOOST.



(b) Courant d'inductance.

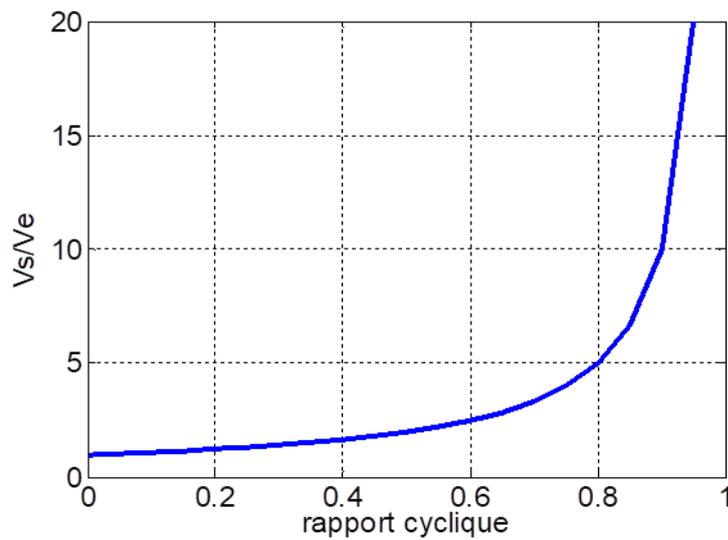
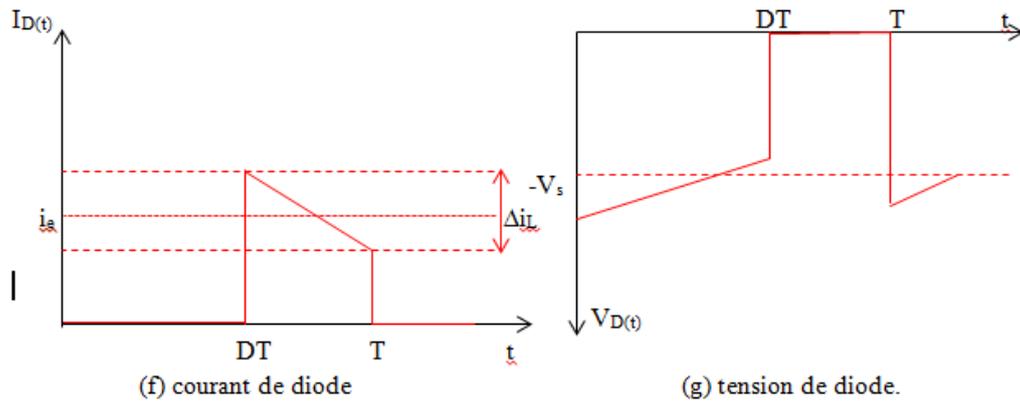
(c) Courant de capacité.



(d) courant d'interrupteur.

(e) tension d'interrupteur.

AC
Acc



(h) rapport de tension.

Figure 2.4 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BOOST en CCM.

Le gain en tension de convertisseur élévateur, l'ondulation de courant d'inductance et l'ondulation de tension de sortie sont définis par les relations suivant :

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

$$\Delta i_L = \frac{D \cdot V_e}{L \cdot f} \tag{II.2}$$

$$\Delta V_s = \frac{D.I_s}{C.f} = \frac{D.V_e}{(1-D).R.C.f} \quad (\text{II.3})$$

D'où D est le rapport cyclique, f est la fréquence de découpage et R est la charge équivalente. Par définition, D est compris entre 0 et 1, la tension de sortie 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. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_s}{1-D} \quad (\text{II.4})$$

Les contraintes de courant et de tension des interrupteurs et diode de puissance ont pu être calculées comme suit:

$$I_{D_{\max}} = I_{K_{\max}} = \frac{I_s}{1-D} + \frac{D.(1-D).V_s}{2.L.f} \quad (\text{II.5})$$

$$V_{D_{\max}} = V_{K_{\max}} = \frac{V_e}{1-D} + \frac{D.V_e}{2.(1-D).R.C.f} \quad (\text{II.6})$$

II. 3. 2. Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)

L'entrelacement permet de résoudre le problème lié au fort courant des convertisseurs basse tension. Il consiste en la mise en parallèle de cellules BOOST dont les commandes sont régulièrement décalées entre elles. Ainsi, ce principe permet, outre la réduction du courant dans chaque branche, d'augmenter la fréquence apparente en entrée et en sortie [22-23]. L'analyse sera faite sur le BOOST entrelacé à 2 branches mais les résultats sont valables pour les autres structures entrelacées.

La technique de l'entrelacement est réalisée par « 2 » branches L (inductance) – T (transistor) – D (diode) identiques (Figure 2.12 : Hacheur entrelacé à 2 branches). Les commandes des transistors de chaque branche sont décalées de $T/2$ de façon régulière avec un même rapport cyclique pour chaque branche.

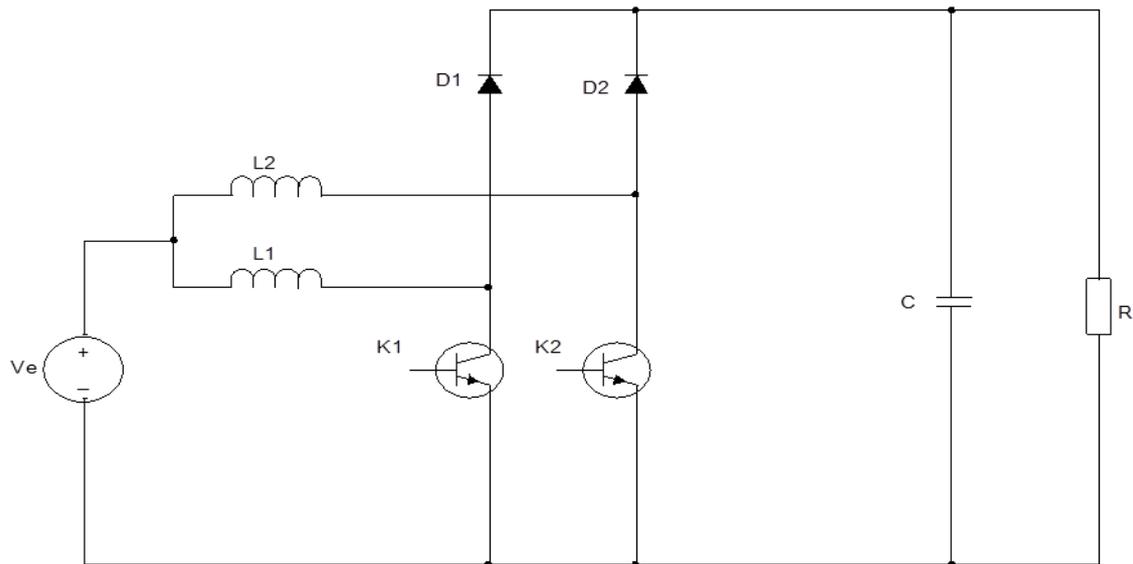


Figure 2.5 : Convertisseur BOOST entrelacé à 2 branches.

Nous distinguons deux cas de fonctionnement correspondant avec $D > 0,5$ et $D < 0,5$.

Lorsque le rapport cyclique D est inférieur à $0,5$, les formes d'onde simulé des tensions et courants de cette structure sont représentant dans les figures suivantes :

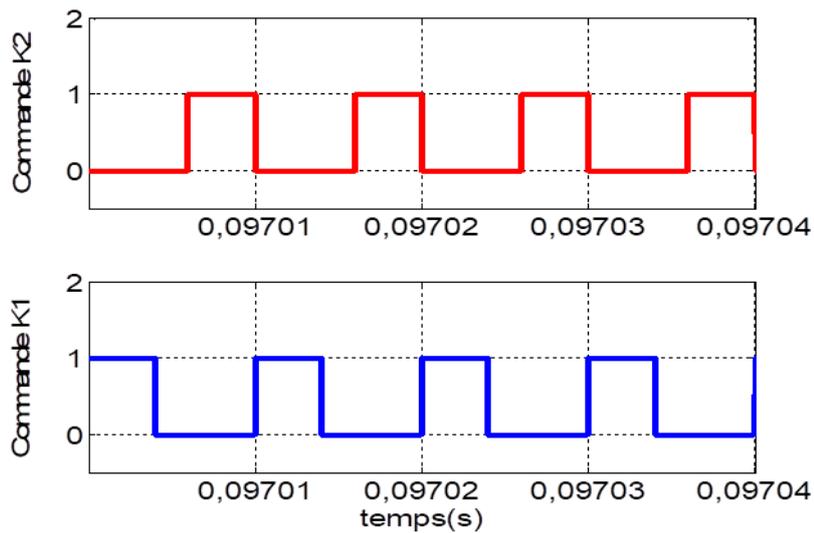


Figure 2.6 : Commande des transistors d'IBC.

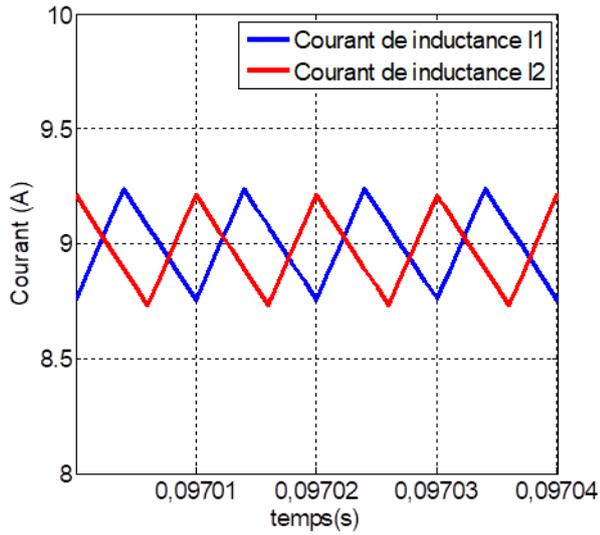


Figure 2.7 : Courants dans les inductances de IBC.

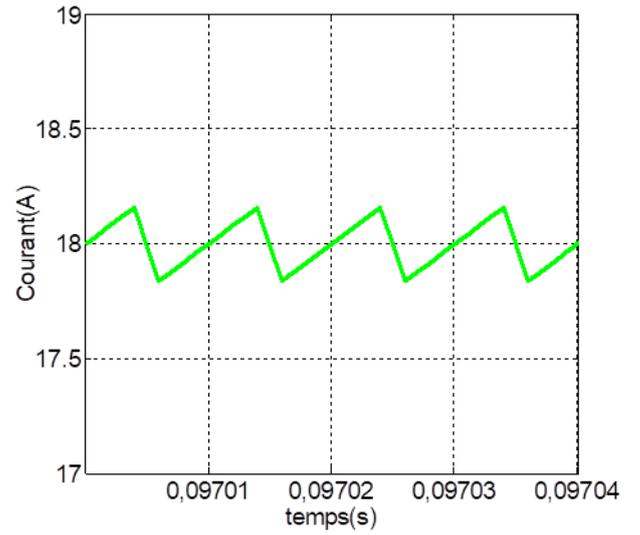


Figure 2.8 : Courant de la source de IBC.

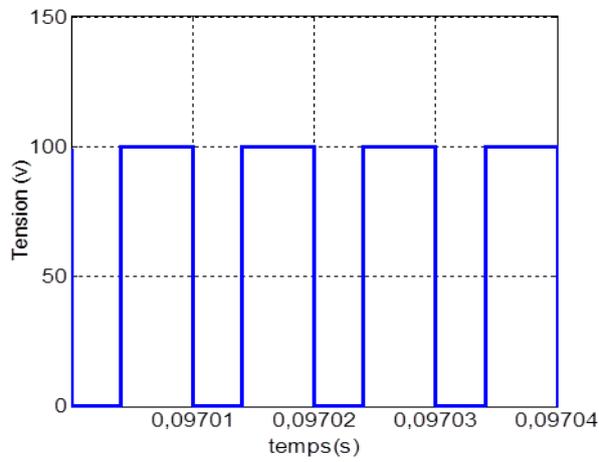


Figure 2.9 : Tension aux bornes d'un transistor de IBC.

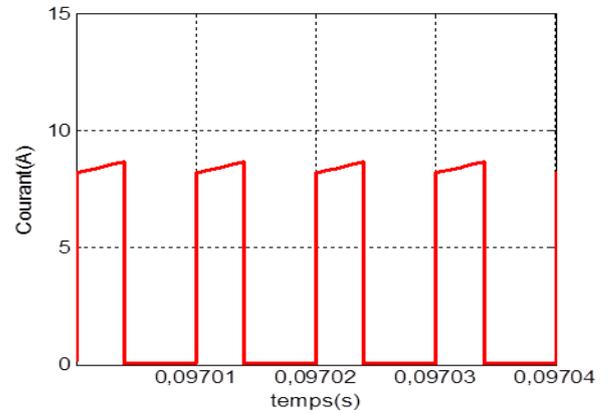


Figure 2.10 : Courant aux bornes d'un transistor de IBC.

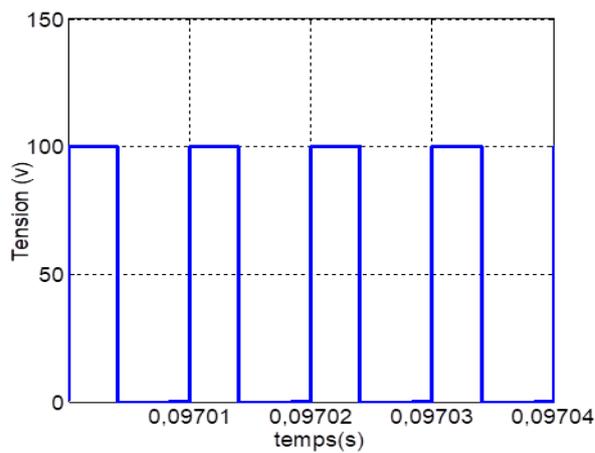


Figure 2.11 : Tension aux bornes d'un diode de IBC.

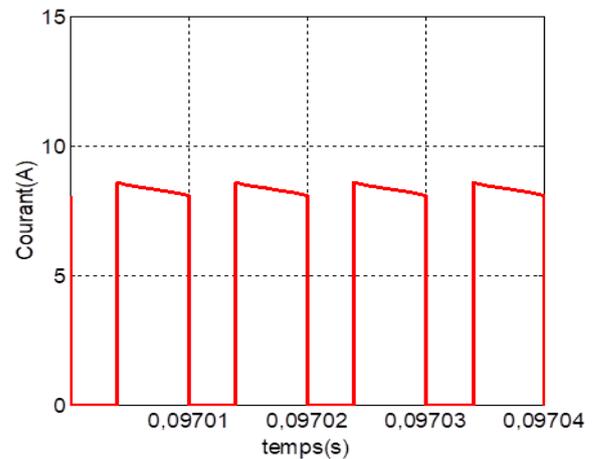


Figure 2.12 : Courant aux bornes d'un diode de IBC.

Pour D supérieur à 0.5 :

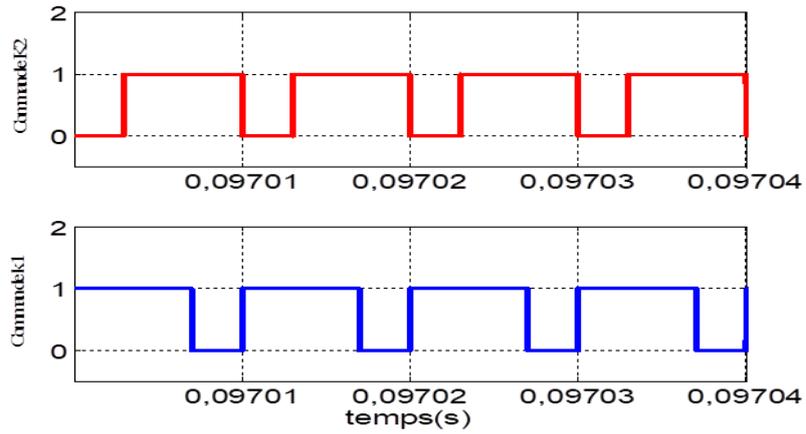


Figure 2.13 : Commande des transistors de IBC.

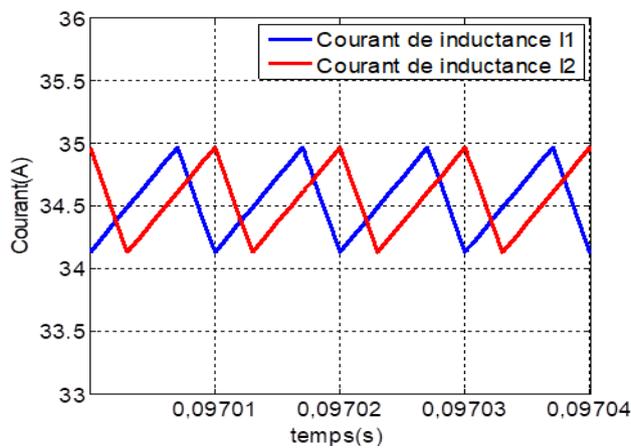


Figure 2.14 : Courants dans les inductances de IBC.

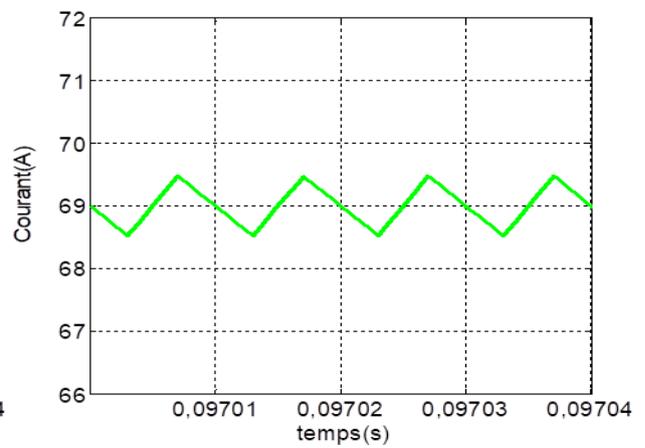


Figure 2.15 : Courant de la source de IBC.

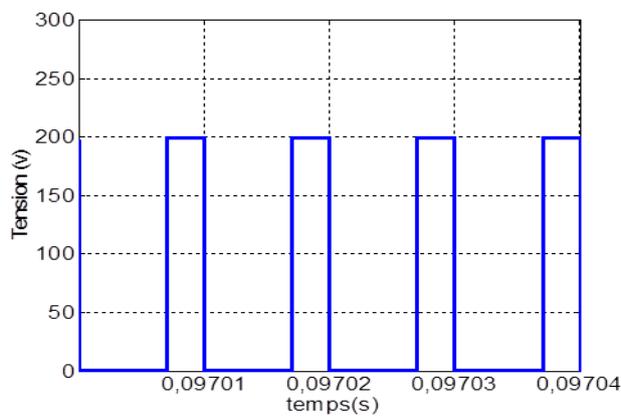


Figure 2.16 : Tension aux bornes d'un transistor de IBC.

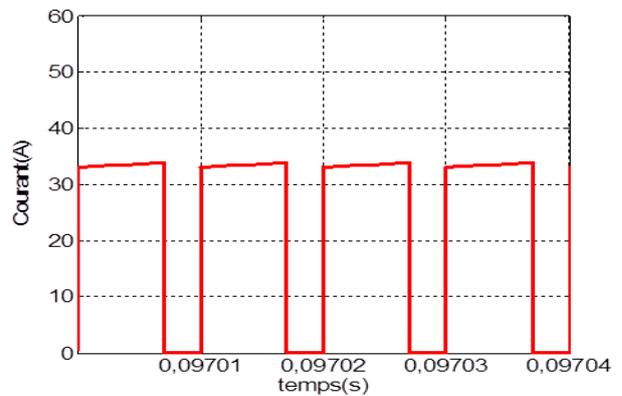


Figure 2.17 : Courant aux bornes d'un transistor de IBC.

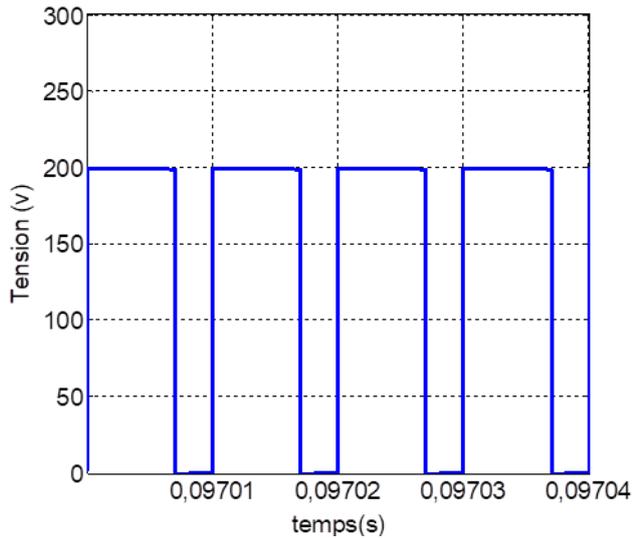


Figure 2.18 : Tension aux bornes d'un diode de IBC.

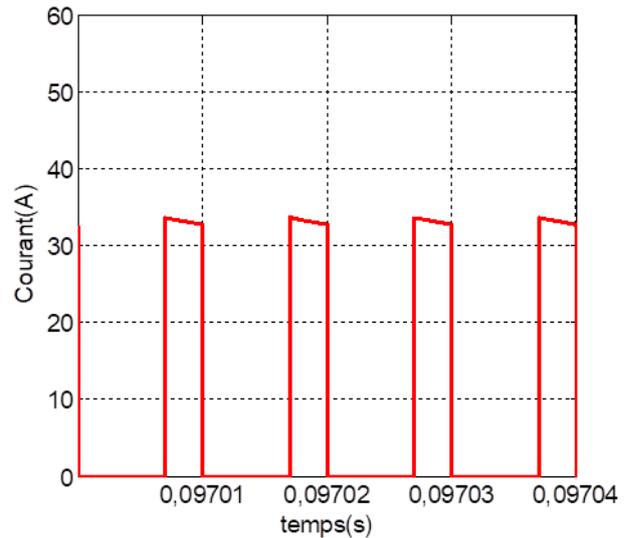


Figure 2.19 : Courant aux bornes d'un diode de IBC.

Le rapport cyclique D et le gain en tension sont :

$$D = 1 - \frac{V_e}{V_s} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - D} \quad (\text{II.8})$$

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 :

$$\Delta i_L = \Delta i_1 = \Delta i_2 = \frac{D \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II.9})$$

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

$$\Delta i_{pac} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \Delta i_L$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (0.5-D)}{C.f} = \frac{V_e \cdot (0.5-D)}{(1-D) \cdot R.C.f}$$

(II.10)

Et pour un rapport cyclique D supérieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\Delta i_{pac} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \Delta i_L$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (D-0.5)}{C.f} = \frac{V_e \cdot (D-0.5)}{(1-D) \cdot R.C.f}$$

(II.11)

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

$$I_{K_{moy}} = D \cdot \frac{I_{pac}}{2} \tag{II.12}$$

$$I_{D_{moy}} = (1-D) \cdot \frac{I_{pac}}{2} \tag{II.13}$$

On observant que les courants dans les interrupteurs et les diodes sont divisés par deux.

Pour la 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 BOOST à une branche :

$$C_s = \frac{D.V_e}{2 \cdot (1-D) \cdot R \cdot \Delta V_s \cdot f} = \frac{D.V_s}{2 \cdot R \cdot \Delta V_s \cdot f} \tag{II.14}$$

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 [24]. Mais, les contraintes de tension sur l'interrupteur et diodes sont encore importantes, ce qui conduit à l'efficacité limitée en raison de pertes de commutation dans des applications à haute puissance. De plus, le convertisseur entrelacé souffre du gain en tension limité, ce qui est identique à celui de BOOST conventionnel convertisseur.

II. 3. 3. Convertisseur Double BOOST Dual entrelacé (IDDB)

Le schéma électrique de principe de ce convertisseur est présenté sur la figure 2.40. Il est nommé aussi BOOST flottant entrelacé [25-26]. Il se compose de deux BOOST dont les entrées sont communes mais dont les sorties sont séparées par la charge. Les commandes des interrupteurs sont retardées d'une demi-période de commutation l'une de l'autre.

Pour étudier les formes d'ondes, comme dans le BOOST entrelacé et à trois niveaux, nous distinguons deux cas pour le rapport cyclique $D < 0,5$ et $D > 0,5$.

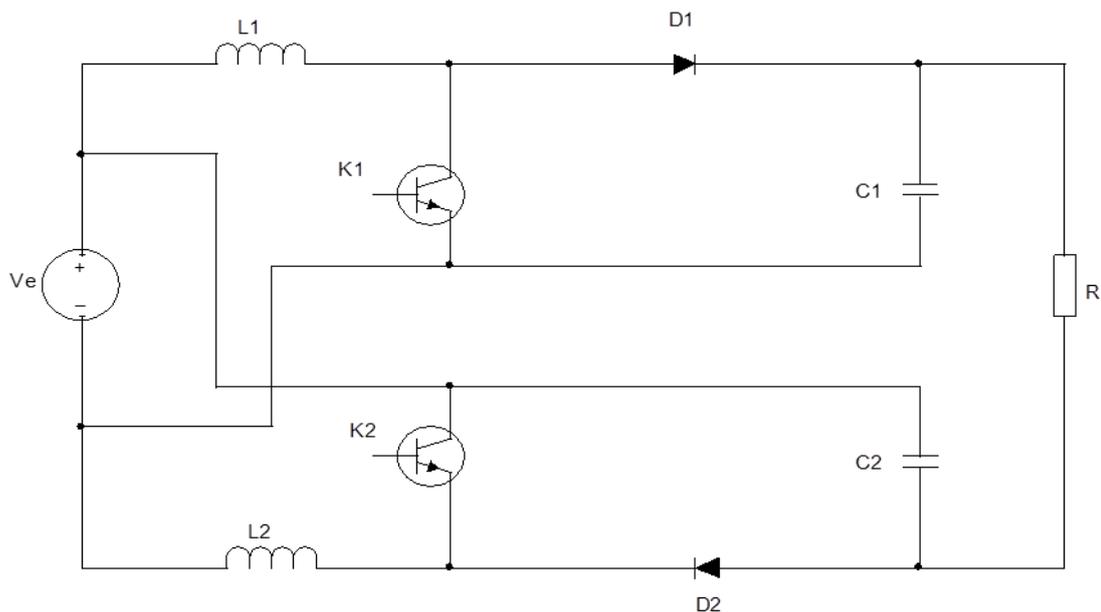


Figure 2.21 : Convertisseur double BOOST dual entrelacé IDDB.

Pour $D < 0,5$:

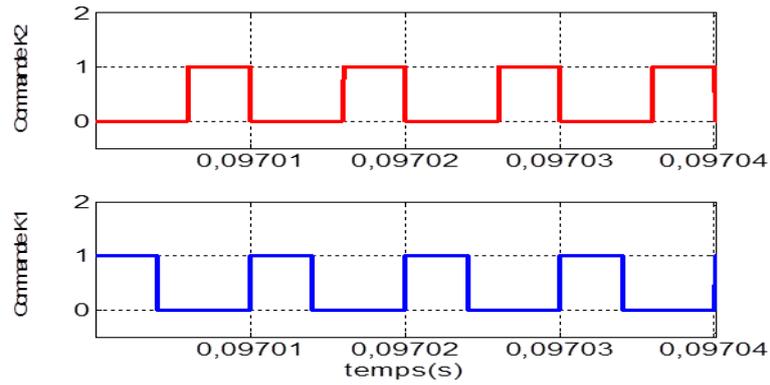


Figure 2.22 : Commande des transistors de IDDB.

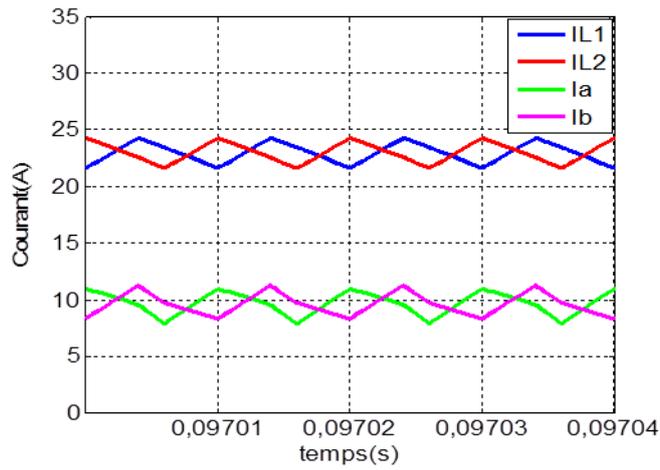


Figure 2.23 : Courant dans le IDDB.

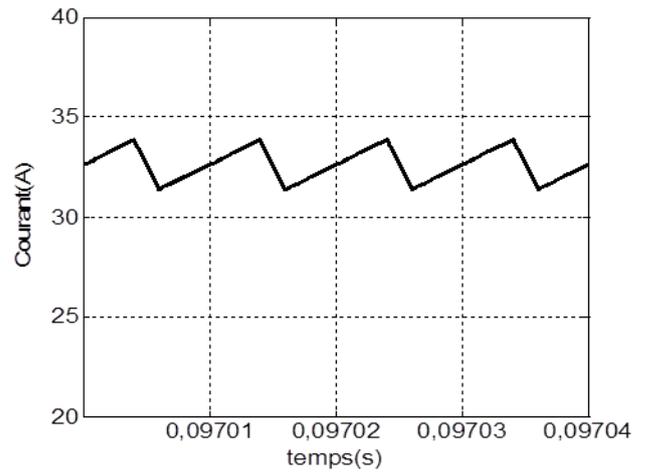


Figure 2.24 : Courant de la source.

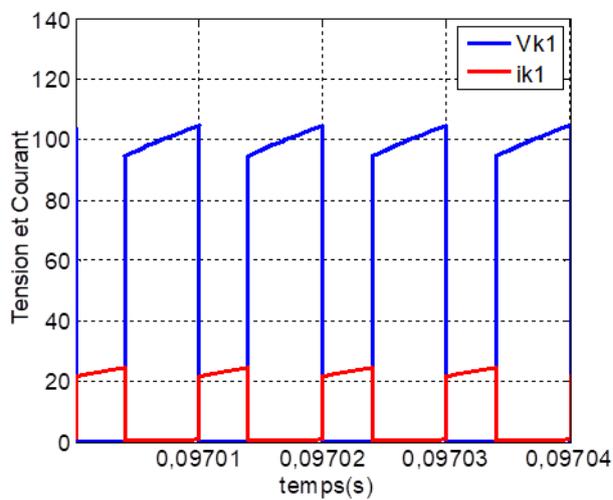


Figure 2.25 : Tension et Courant d'un transistor de IDDB.

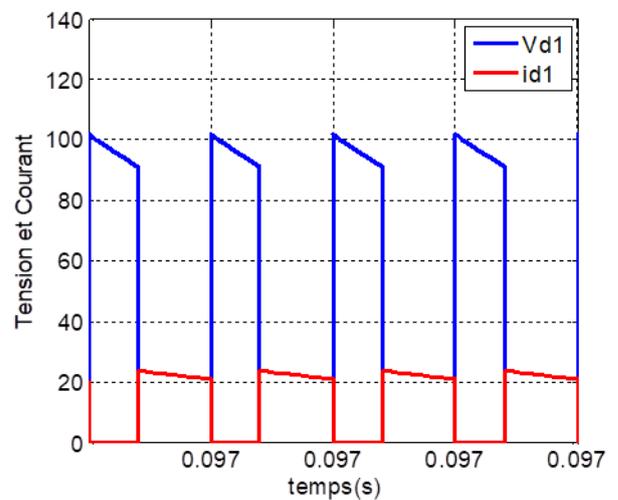


Figure 2.26: Tension et Courant d'un diode de IDDB.

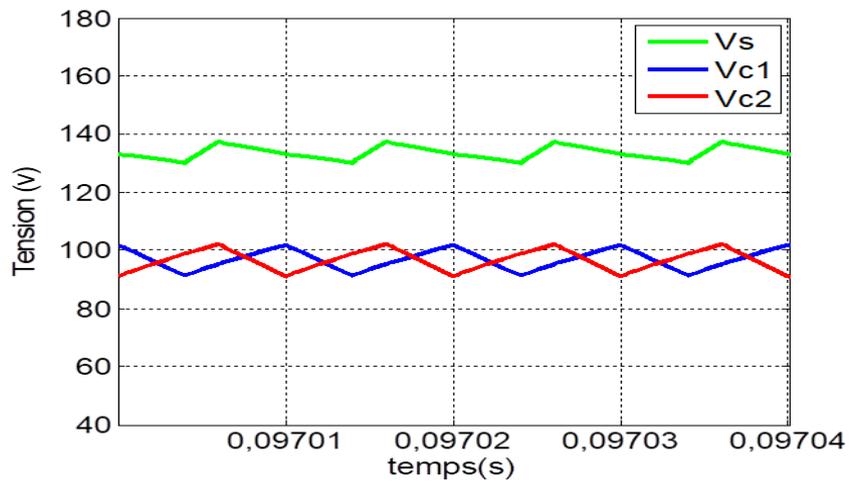


Figure 2.27 : Tension de sortie et tension aux bornes les capacités.

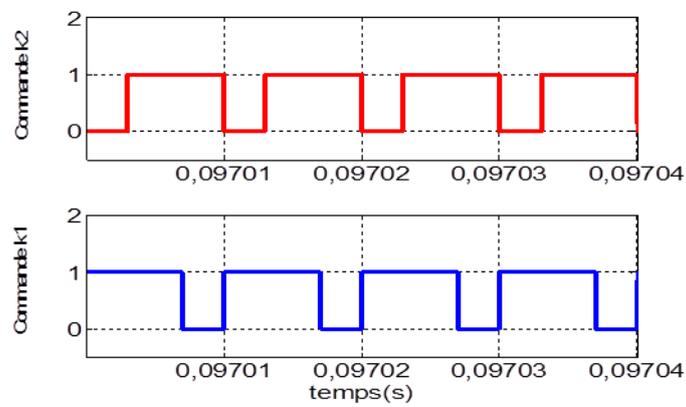


Figure 2.28 : Commande des transistors de IDDB.

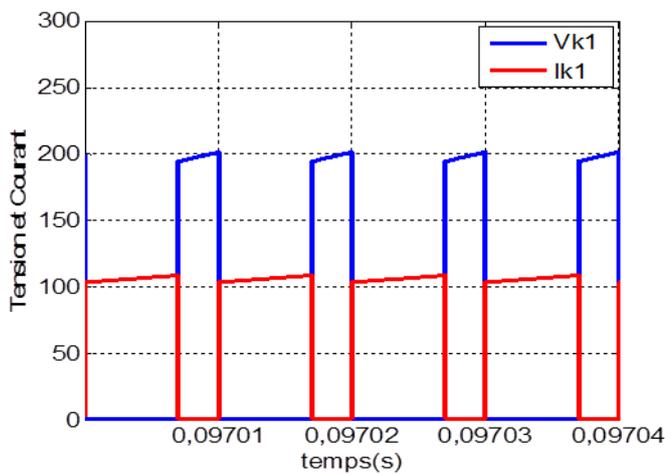


Figure 2.29 : Tension et Courant d'un transistor de IDDB.

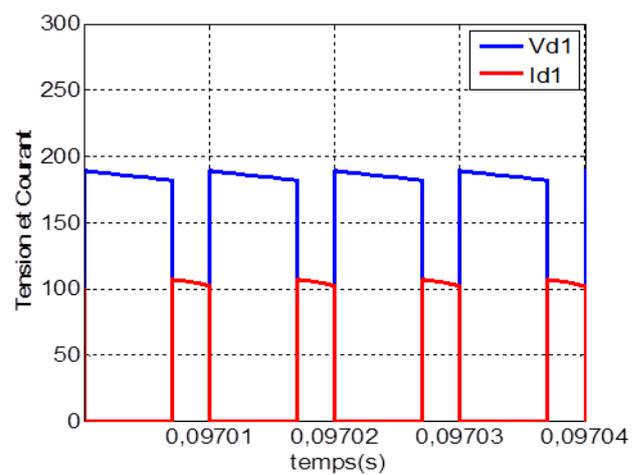


Figure 2.30 : Tension et Courant d'un diode de IDDB.

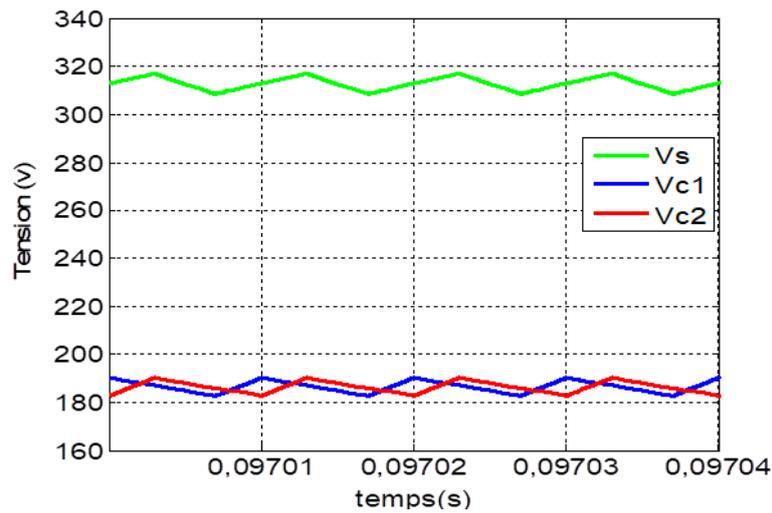


Figure 2.31: Tension de sortie et tension aux bornes les capacités.

La tension de sortie de chaque branche de IDDB peut être déterminée avec la relation suivante :

$$V_{C1} = V_{C2} = \frac{V_s + V_e}{2} = \frac{V_e}{1-D} \quad (\text{II.15})$$

Donc la tension de sortie est :

$$V_s = V_{C1} + V_{C2} - V_e = -V_e + 2 \cdot \frac{V_e}{1-D} \quad (\text{II.16})$$

En utilisant les deux relations précédentes, le rapport cyclique D et le gain en tension sont :

$$D = \frac{V_s - V_e}{V_s + V_e} \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1+D}{1-D} \quad (\text{II.18})$$

Le courant moyen fourni par la source est :

$$I_{pac} = \frac{V_s}{V_e} \cdot I_s = \frac{1+D}{1-D} \cdot I_s$$

(II.19)

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

$$\Delta i_{pac} = \frac{D \cdot (1 - 2 \cdot D)}{1 + D} \cdot \frac{V_s}{L \cdot f}$$

$$\Delta V_s = \frac{V_s \cdot (1 - 2 \cdot D)}{(1 - D) \cdot R \cdot C \cdot f}$$

(II.20)

Et pour un rapport cyclique D supérieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\Delta i_{pac} = \frac{(2 \cdot D - 1) \cdot (1 - D)}{(1 + D)} \cdot \frac{V_s}{L \cdot f}$$

$$\Delta V_s = \frac{V_s \cdot (2 \cdot D - 1)}{R \cdot C \cdot f} \quad (\text{II.21})$$

Avec $C = C_1 = C_2$

Le courant moyenne et la tension qui traverse les interrupteurs et les diodes est :

$$I_{K\text{moy}} = \frac{D \cdot I_{pac}}{1 + D} \quad (\text{II.22})$$

$$I_{dmoy} = \frac{(1 - D) \cdot I_{pac}}{1 + D} \quad (\text{II.23})$$

$$V_K = V_D = V_{C1} = V_{C2} = \frac{V_s + V_e}{2} \quad (\text{II.24})$$

La capacité est calculée en fonction d'ondulation de sortie par la relation suivante :

$$C_1 = C_2 = \frac{2 \cdot D \cdot V_s}{R \cdot \Delta V_s \cdot f} \quad (\text{II.25})$$

Ce BOOST possède des caractéristiques meilleures par rapport aux structures précédentes par, d'une part, les contraintes de tension des semi-conducteurs réduite

comme dans le cas du BOOST à trois niveaux et d'autre part, les contraintes de courants réduits comme pour le BOOST entrelacé et en plus gain en tension élevée.

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

Tableau 1 Comparaison entre les structures 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
IBC	Moyenne	Moyenne	Bas	Bas
IDDB	Moyenne	Moyenne	Bas	Haut

Tableau 2-1 : Comparaison entre les structures Dc/Dc basse tension non-isolé

II. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents structures des convertisseurs DC/DC isolé et non isolés pour les applications piles à combustible. Ainsi que leurs fonctionnement et leurs avantages et inconvénients.

Ce chapitre donne des lignes directrices pour aider le concepteur à choisir les topologies de convertisseurs appropriés en termes de rendement, la complexité, le coût et la fiabilité pour une particulière application.

Chapitre III

Modélisation, commande du convertisseur

III. 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 présentons dans ce chapitre la modélisation et la commande globale de convertisseur proposé (double BOOST dual entrelacé). La modélisation moyenne en petits signaux, bien connue sous le nom small-signal averaged model a été appliquée afin de prendre en considération leurs non-linéarités dues aux interrupteurs de puissance, inductances, etc... Pour la commande de notre structure, on présentera une commande base sur une double 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.

III. 2. Modélisation de convertisseur proposé

Le modèles moyens en petits signaux est le plus largement utilisé pour modéliser les convertisseurs continu-continu a été appliquée pour notre convertisseur proposé.

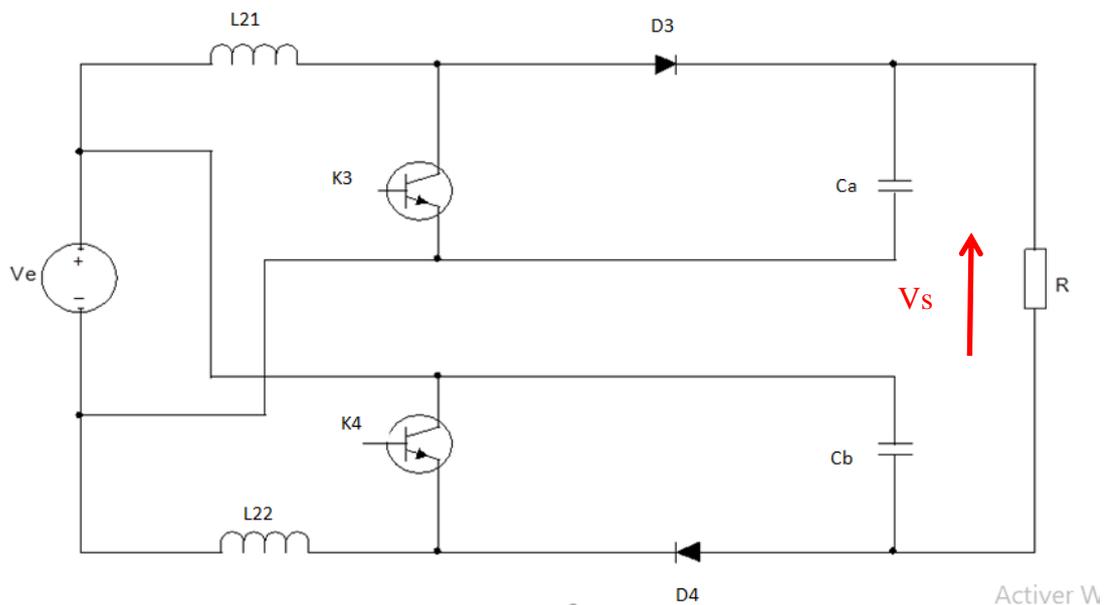


Figure :3.1 Structure du convertisseur étudié.

Les équations différentielles du convertisseur IDDB s'écrivent, en valeur moyenne sont:

$$\begin{cases}
 L_{21} \cdot \frac{d\tilde{i}_{L21}(t)}{dt} = \tilde{v}_1(t) - D_3 \cdot \tilde{v}_{C_a}(t) + V_{C_a} \cdot \tilde{d}_3(t) - R_{L21} \cdot \tilde{i}_{L21}(t) - D_3 R_{C_a} C_a \frac{d\tilde{v}_{C_a}}{dt} \\
 L_{22} \cdot \frac{d\tilde{i}_{L22}(t)}{dt} = \tilde{v}_1(t) - D_4 \cdot \tilde{v}_{C_b}(t) + V_{C_b} \cdot \tilde{d}_3(t) - R_{L21} \cdot \tilde{i}_{L21}(t) - D_4 R_{C_b} C_b \frac{d\tilde{v}_{C_b}}{dt} \\
 C_a \cdot \frac{d\tilde{v}_{C_b}}{dt} = -\tilde{i}_{ch}(t) + D_3 \cdot \tilde{i}_{L21}(t) - I_{L21} \cdot \tilde{d}_3(t) \\
 C_b \cdot \frac{d\tilde{v}_{C_b}}{dt} = -\tilde{i}_{ch}(t) + D_4 \cdot \tilde{i}_{L22}(t) - I_{L22} \cdot \tilde{d}_4(t)
 \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Où $v_1, v_{C_a}, v_{C_b}, \tilde{i}_{L21}, \tilde{i}_{L22}, d_3$ et d_4 sont des petites perturbations autour de leurs points de fonctionnements.

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

$$G_{v,d}(s) = \frac{\tilde{v}_s(s)}{\tilde{d}} = G_{2,dv} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zv1}}\right) \left(1 - \frac{s}{\omega_{zv2}}\right)}{\Delta(s)} \quad (\text{III. 2})$$

$$G_{i,d}(s) = \frac{\tilde{i}_{L2x}(s)}{\tilde{d}} = G_{2,d} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right)}{\Delta(s)} \quad (\text{III. 3})$$

avec :

$$G_{2,dv} = \frac{V_1}{(1-D)^2} \left(\frac{(1-D)^2 R - 2R_{L2x}(1+D)}{(1-D)^2 R + 2R_{L2x}} \right) \quad (\text{III. 4})$$

$$\omega_{zv1} = \frac{1}{C_x R_{C_x}} \quad (\text{III. 5})$$

$$\omega_{zv2} = \frac{R(1-D)^2 - R_{L2x}(2-D)}{L_{2x}(2-D)} \quad (\text{III. 6})$$

$$\Delta(s) = \frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{s}{Q\omega_0} + 1 \quad (\text{III. 7})$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(1-D)^2 R + 2R_{L2x}}{L_{2x} C_x (R + 2R_{C_x})}} \quad (\text{III. 8})$$

$$\xi = \frac{\omega_0 (L_{2x} C_x (R + 2R_{C_x}))}{R C_x (R_{L2x} + R_{C_x} (1+D)^2) + (L_{2x} + R_{C_x} R_{L2x} C_x)} \quad (\text{III. 9})$$

$$Q = \frac{1}{\xi}, G_{2,d} = \frac{V_1(D+3)}{(1-D)((1-D)^2R + 2R_{L2x})} \quad (\text{III. 10})$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{\frac{RC_x}{D+3}(C_x + 2R_{Cx})} \quad (\text{III. 11})$$

Les fonctions de transfert (III-2) et (III-3) sont aussi des systèmes d'ordre deux avec une deux pole a pulsation de coupure (III-8), et un zéro dans la partie droite de l'axe des imaginaires RHPZ (Right Half Plan Zero) (III-6) et un zéro dans la partie gauche de l'axe des imaginaires LHPZ (III-5)

III. 3. Stratégie de commande du convertisseur proposé

III. 3. 1. La commande avec deux boucles

Le convertisseur IDDB est commandé 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 du convertisseur proposé. Par conséquent, la référence de courant totale est obtenue à partir de régulateur PI, et ensuite cette référence est partagée équitablement entre chaque phase du convertisseur proposé. Le courant total est divisé par 2. Ensuite, la boucle interne (boucle de courant) permet d'obtenir les rapports cycliques (D3, D4) 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 (K3, K4). L'architecture de la stratégie de contrôle a deux boucle de convertisseurs proposé est représentée sur la Figure suivantes :

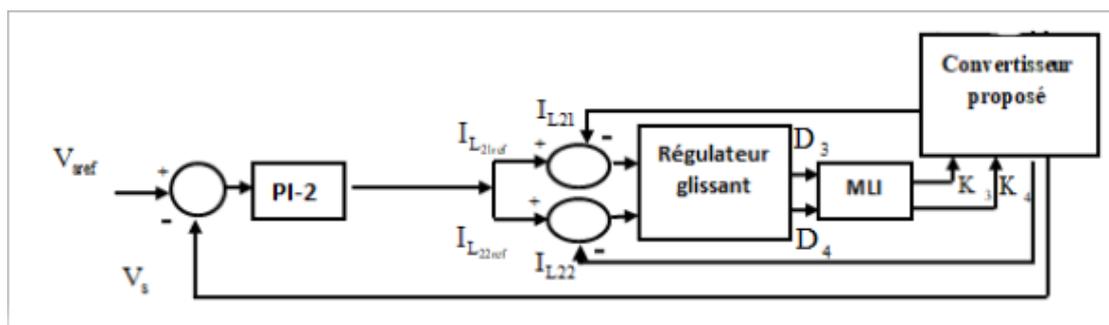


Figure 3.2: L'architecture de la stratégie de commande

Le régulateur PI-2 est défini comme suit:

$$PI_2 = K_2 \left(1 + \frac{1}{T_2 s}\right) \quad (III.12)$$

Les paramètres des correcteurs que nous avons déterminé, en utilisant l’outil SISOTOOL du MATLAB sont les suivants :

$$K_2 = 200 \quad \text{et} \quad T_2 = 0.7$$

III. 3. 2. Régulateur de courant par mode glissant

Pour commander le courant inductif de chaque phase de convertisseur proposé Un régulateur par mode glissant est conçu sur Le modèle moyen du convertisseur est utilisé. La commande glissant est un mode de commande bien adapté aux convertisseurs statiques [27-18]. En effet, il permet de garantir stabilité et robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques. Les équations suivantes définissent le Modèle moyen de IDDB.

$$\begin{cases} 2L_{21} \cdot \frac{dI_{L_{21}}}{dt} = (D_3 + 1) \cdot V_a + (D_3 - 1) \cdot V_s - 2r_{L_{21}} \cdot I_{L_{21}} \\ 2L_{22} \cdot \frac{dI_{L_{22}}}{dt} = (D_4 - 1) \cdot V_a + (D_4 + 1) \cdot V_s - 2r_{L_{22}} \cdot I_{L_{22}} \\ C_a \cdot \frac{dV_{ca}}{dt} = -I_{ch} + (1 - D_3) \cdot I_{L_{21}} \\ C_b \cdot \frac{dV_{cb}}{dt} = -I_{ch} + (1 - D_4) \cdot I_{L_{22}} \end{cases} \quad (III. 13)$$

On définit les surfaces de glissement de IDDB par les expressions suivantes :

$$S_{iL_{2i}} = (I_{L_{2i}} - I_{L_{2i\text{ref}}}) + k_{iL_{2i}} \int_0^t (I_{L_{2i}} - I_{L_{2i\text{ref}}}) dt \quad (III.14)$$

Avec $i = [1, 2]$. Le terme intégral permet de compenser les variations paramétriques [2-12]. Le coefficient K_{iL} permet de fixer la dynamique avec laquelle l’erreur converge vers zéro.

Pour assurer que la trajectoire d’état converge vers la surface de glissement, il faut que :

$$\dot{S}_{iL_{2i}} = -\lambda_{iL_2} S_{iL_{2i}} \quad (\text{III. 15})$$

où λ_{iL_2} fixe la dynamique de ralliement des composantes des 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 (III-13), (III-14) et (III-15) on peuvent exprimer les rapport cyclique (D3, D4) comme suit :

$$D_{2,3} = 1 - \frac{2 \cdot \left(-V_1 + r_{2i} \cdot I_{L_{2i}} + L_{2i} \left(-\lambda_{iL_2} S_{iL_{2i}} + \dot{I}_{L_{2i,ref}} - K_{iL_2} \cdot (I_{L_{2i}} - I_{L_{2i,ref}}) \right) \right)}{V_1 + V_s} \quad (\text{III. 16})$$

L'équation (III-16) montre que la commande ne dépend pas avec la valeur de la résistance de charge R. Par conséquent, ce régulateur ne sera pas perturbé par les variations de la charge.

En injectant la valeur de rapport cyclique dans le modèle moyen on peut définir la dynamique de l'erreur de courant :

$$\dot{z}_{2i} + (\lambda_{iL_2} + k_{iL_2}) \cdot z_{2i} + \lambda_{iL_2} \cdot k_{iL_2} \int z_{2i} d\tau = 0 \quad (\text{III. 17})$$

$$\text{Avec } z_{2i} = I_{L_{2i}} - I_{L_{2i,ref}}$$

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

$$\ddot{z}_{2i} + (\lambda_{iL_2} + k_{iL_2}) \cdot \dot{z}_{2i} + \lambda_{iL_2} \cdot k_{iL_2} \cdot z_{2i} = 0 \quad (\text{III. 18})$$

Ces équations sont utilisées 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'agit de la stabilité du régulateur.

III. 4. Résultats de simulation de la commande avec deux boucles

Pour vérifier les performances de la commande à deux boucles du système a été implanté dans le MATLAB Simulink.

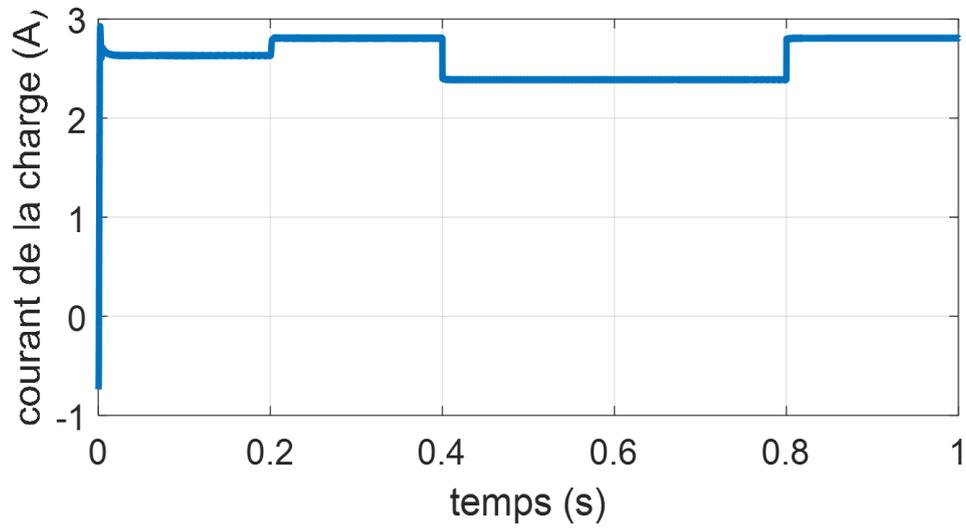


figure 3.3 variation de courant de charge

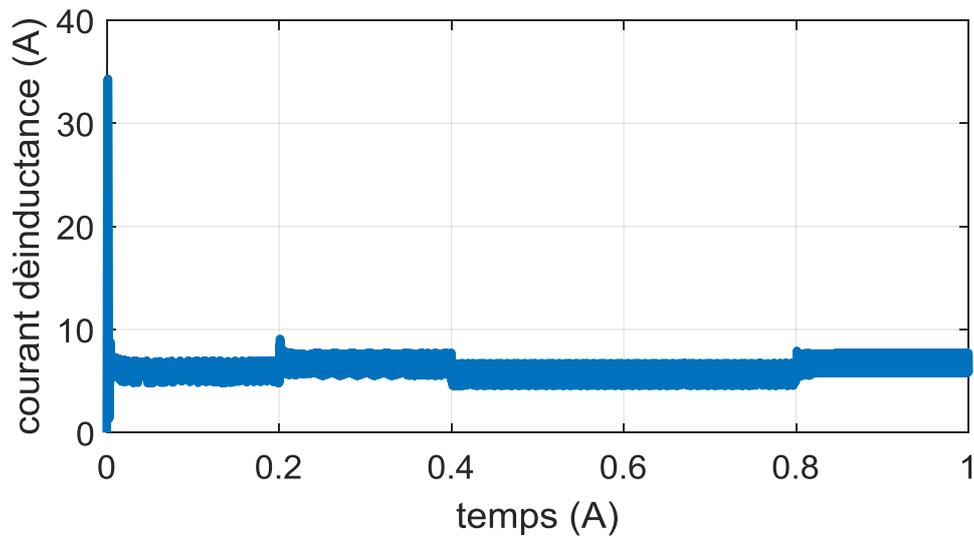


figure 3.4 :courant d'inductance IL21

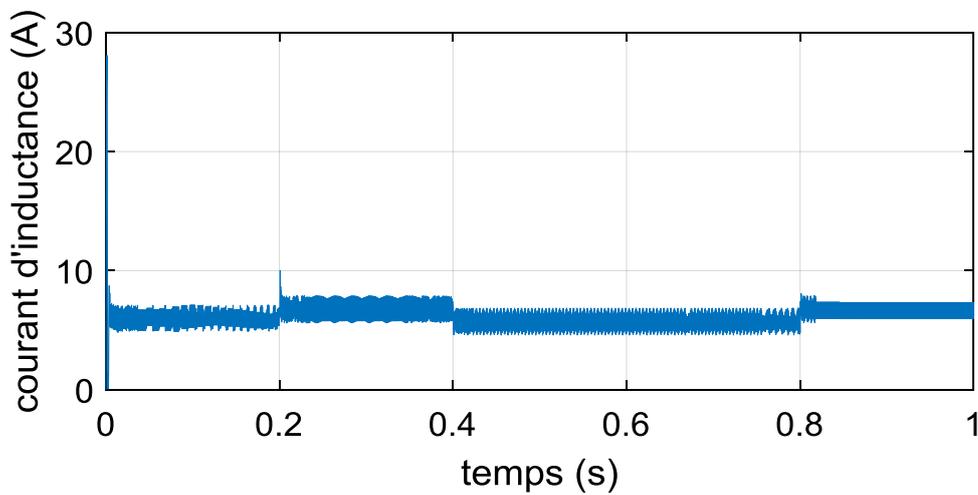


figure 3.5 :courant d'inductance IL22

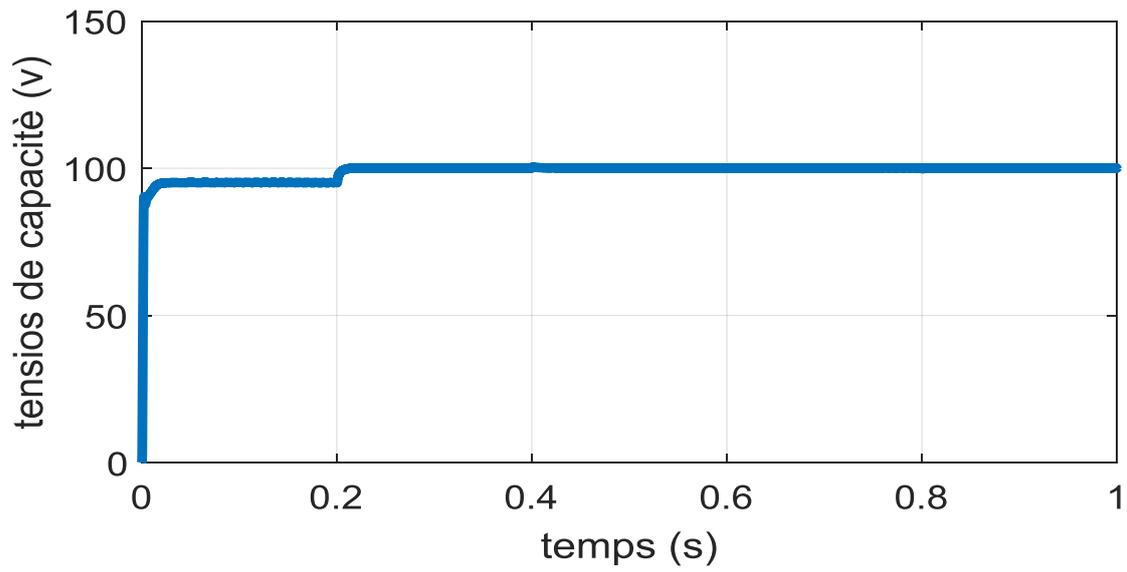


figure 3.6 :tension de capacité VC1

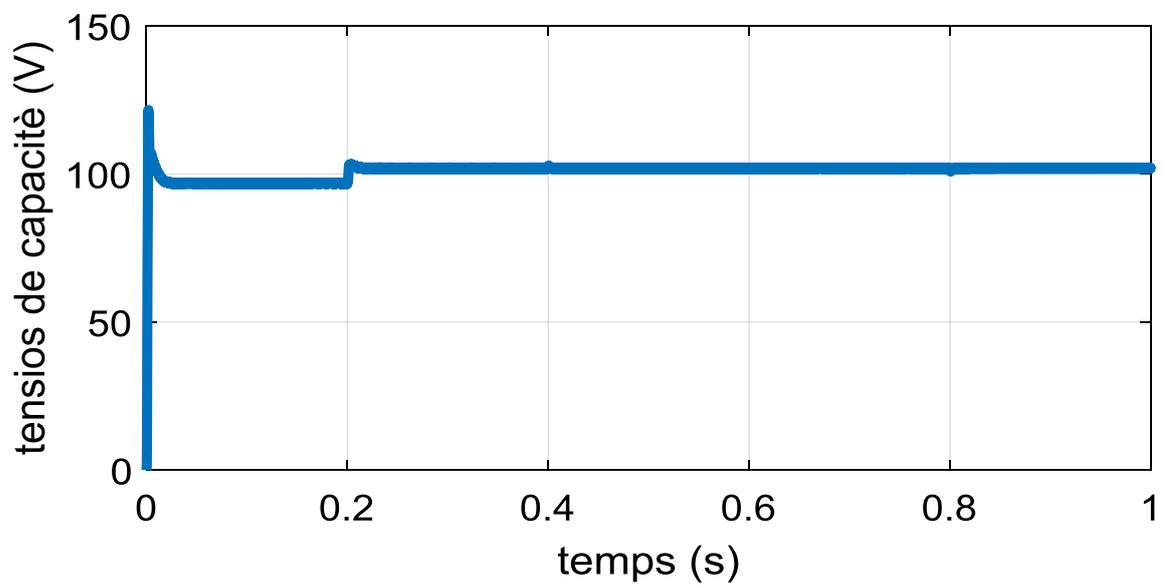


figure 3.7 : tension de capacité VC2

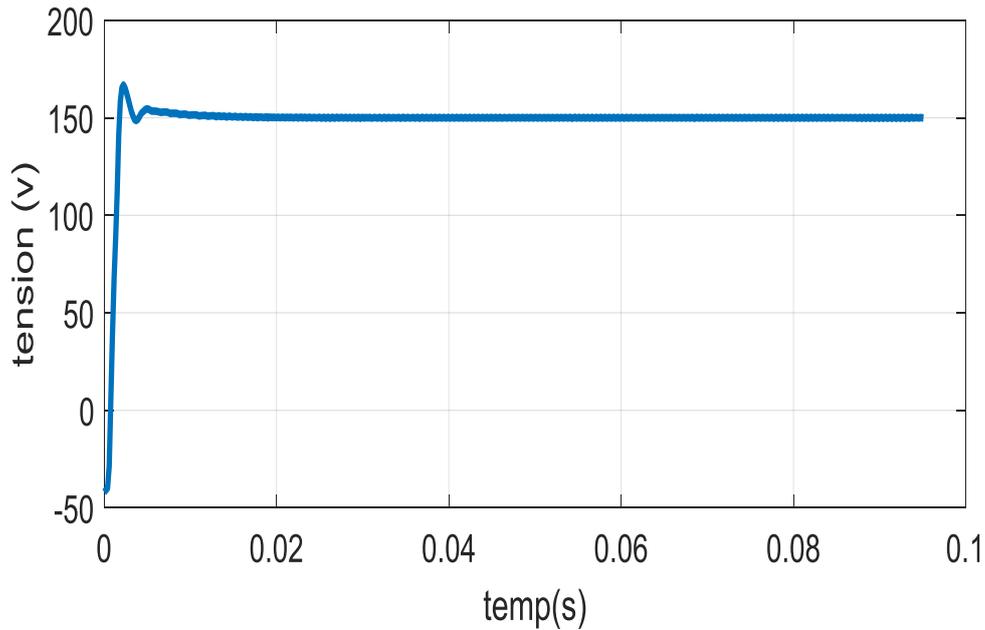


figure 3.8 :tension de sortie VS

La figure 3-3 représente une variation de courant de la charge et la figure 3-4 et 3-5 montre respectivement les courants d'inductance i_{l21} et i_{l22} il est bien évident que ces courants suivent la variation du courant de charge, La réponse dynamique du régulateur non linéaire de courant par mode glissant pour un charge variable est présentée dans les figures 3-4 et 3-5. A partir de ces courbes, on peut déduire que le régulateur de courant glissant a une très haute performance et un temps de réponse rapide avec un très faible dépassement.

nous observons que la tension de sortie suit la référence de tension mais avec un dépassement important.

III. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, Le modèle moyen en petits signaux de convertisseur IDDB a été utilisé pour aider à la conception optimale de la commande de notre système. Nous avons présenté une stratégie de contrôle basée sur une structure de contrôle à deux boucles avec une boucle externe de tension et une boucle interne de courant. Cette commande présente des résultats intéressants.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette mémoire était de étudier une structure de convertisseur basse tension continu-continu et son contrôle, qui permettent de coupler une source de type basse tension (pile à combustible) à un bus DC moyenne tension.

Après avoir présenté les généralités sur les piles à combustibles dans le premier chapitre, une étude sur les convertisseurs basse tension isolé et non-isolé pour les applications pile à combustible a été rappelé dans le deuxième chapitre Cela nous a permis de choisir le convertisseur utilisé dans notre travail (convertisseur structure double BOOST dual entrelacé).

La modélisation moyenne en petits signaux, bien connue sous le nom small-signal averaged model a été appliquée au convertisseur IDDB afin de garantir la conception optimale du contrôle de convertisseur. La stratégie de commande de convertisseur étudié est basée sur une structure de contrôle à deux boucle avec une boucle externe de tension avec correcteur linéaire de type PI et une boucle interne de courant base sur un correcteur non linéaire par mode glissant. La simulation sous Matlab-simulink présente des résultats intéressants.

Bibliographiques

- [1] N. Romani, "Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformage Embarqué," Université Paris Sud-Paris XI, 2007.
- [2] H. Oman, "Fuel cells for "personal electricity"," Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, pp. 43-45, 2000.
- [3] B. Cook, "Introduction to fuel cells and hydrogen technology," Engineering Science & Education Journal, vol. 11, pp. 205-216, 2002.
- [4] S. Thomas and M. Zalbowitz, Fuel cells-green power: Los Alamos National Laboratory, 1999.
- [5] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Test of a PEM fuel cell with low voltage static converter," Journal of Power Sources, vol. 153, pp. 145-150, 2006.
- [6] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [7] M. A. Cropper, S. Geiger, and D. M. Jollie, "Fuel cells: a survey of current developments," Journal of Power Sources, vol. 131, pp. 57-61, 2004.
- [8] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design: CRC press, 2009.
- [9] F. de Bruijn, "The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications," Green Chemistry, vol. 7, pp. 132-150, 2005.
- [10] W. Hankache, "Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible," Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2008
- [11] M. Boillot, "Validation expérimentale d'outils de modélisation d'une pile à combustible de type PEM," Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [12] M.-Y. Ayad, "Mise en oeuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2004.
- [13] R. Kötz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," Electrochimica Acta, vol. 45, pp. 2483-2498, 2000.
- [14] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir, "Energy efficiency and fault tolerance comparison of DC/DC converters topologies for fuel cell electric vehicles," in Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE, 2013, pp. 1-7.
- [15] M. Kabalo, B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "State-of-the-art of DC-DC converters for fuel cell vehicles," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, 2010, pp. 1-6.

- [16] J. Jacobs, A. Averberg, and R. De Doncker, "A novel three-phase DC/DC converter for high-power applications," in Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 1861-1867.
- [17] C. Liu, A. Johnson, and J.-S. Lai, "A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1691-1697, 2005.
- [18] J.-S. Lai and D. J. Nelson, "Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles," Proceedings of the IEEE, vol. 95, pp. 766-777, 2007.
- [19] A. Narjiss, D. Depernet, D. Hissel, and A. Berthon, "Design of a high efficiency fuel cell DC/DC converter dedicated to transportation applications," Journal of fuel cell science and technology, vol. 5, p. 041004, 2008.
- [20] R. Gopinath, S. Kim, J.-H. Hahn, P. N. Enjeti, M. B. Yeary, and J. W. Howze, "Development of a low cost fuel cell inverter system with DSP control," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 19, pp. 1256-1262, 2004.
- [21] J. Benziger, E. Chia, J. Moxley, and I. Kevrekidis, "The dynamic response of PEM fuel cells to changes in load," Chemical Engineering Science, vol. 60, pp. 1743-1759, 2005.
- [22] Y. Gu and D. Zhang, "Interleaved boost converter with ripple cancellation network," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 3860-3869, 2013.
- [23] H. El Fadil, F. Giri, J. Guerrero, M. Haloua, and A. Abouloifa, "Advanced Control of Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Energy Generation System," in World Congress, 2011, pp. 2803-2808.
- [24] [56] D. B. Viet, Y. Lembeye, J. P. Ferrieux, J. Barbaroux, and Y. Avenas, "New high power-high ratio non isolated DC-DC boost converter for Fuel cell applications," in Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE, 2006, pp. 1-7.
- [25] [58] S. Choi, V. Agelidis, J. Yang, D. Coutellier, and P. Marabeas, "Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved-input boost-derived DC-DC high-gain transformer-less converter," IET power electronics, vol. 4, pp. 168-180, 2011.
- [26] 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.
- [27] 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.