



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie électrique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Safia aissaoui et Adel benzetta

Le : lundi 27 juin 2022

Etude et simulation d'un convertisseur DC-DC pour les applications véhicule électrique

Jury :

| | | | | |
|----|---------------------|------------|----------------------|-----------|
| Dr | SAADI RAMZI | Professeur | Université de Biskra | Encadreur |
| Dr | HAMMOUDI MED YACINE | MCA | Université de Biskra | Président |
| Dr | HADHRI AMEL | MCA | Université de Biskra | Examineur |



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie électrique
Réseau électrique

Réf. :

Etude et simulation d'un convertisseur DC-DC pour les applications véhicule électrique

Le : lundi 27 juin 2022

Présenté par : Avis favorable de l'encadreur :

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Résumé :

Une pile à combustible génère une faible tension de sortie avec une réponse lente en raison de la dynamique de ses auxiliaires. Pour cela, un convertisseur DC / DC est obligatoire pour augmenter cette tension à une tension fixe et exploitable pour alimenter la charges. Ce travail présente une l'étude de performance d'un convertisseur basse tension DC / DC non isolé pour les applications pile à combustible. Ce convertisseur a été comparé avec le convertisseur BOOST classique selon le rendement et les pertes. Les résultats de simulation permet de démontré que la structure présenté garantir des hautes performances par rapport à le BOOST classique pour les applications pile à combustible

ملخص :

تولد خلية الوقود جهد خرج من خفض مع استجابة بطيئة بسبب ديناميكيات مساعدتها. لهذا الغرض، يعد محول DC / DC إلزاميًا لزيادة هذا الجهد إلى جهد ثابت وقابل للاستخدام لتزويد الأحمال. يقدم هذا العمل دراسة أداء لمحول تيار مستمر / تيار مستمر منخفض الجهد غير معزول لتطبيقات خلايا الوقود. تمت مقارنة هذا المحول مع محول BOOST الكلاسيكي وفقًا للكفاءة والخسائر. تُظهر نتائج المحاكاة أن الهيكل المقدم يضمن أداءً عاليًا مقارنةً بتقنية BOOST الكلاسيكية لتطبيقات خلايا الوقود.

ABSTRACT:

A fuel cell generates a low output voltage with a slow response due to the dynamics of its auxiliaries. For this, a DC / DC converter is mandatory to increase this voltage to a fixed and usable voltage to supply the loads. This work presents a performance study of a non-isolated low voltage DC/DC converter for fuel cell applications. This converter has been compared with the classical BOOST converter according to efficiency and losses. The simulation results demonstrate that the structure presented guarantees high performance compared to the classic BOOST for fuel cell applications.



Dédicace

*A nos très chers parents.
A nos frères et nos sœurs.
A notre famille.
A tous nos amis*





Remerciements

Nous commencerons tout d'abord par remercier « Dieu » Le

Tout Puissant, qui nous a

Donné la santé, la force et les moyens de la faire

Ce travail.

Nous remercions l'encadreur RAMZI SAADI pour

Avoir dirigé ce travail. Sa compétence scientifique a

Largement contribué à la réalisation de ce travail. Nous lui sommes

Également très reconnaissante de nous avoir montré son travail

Et Confiance.

Merci aux membres du jury d'avoir examiné notre

Mémoire et évaluer notre travail. Et la confiance qu'ils nous

Ont accordée tout au long de ce parcours

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont apporté un soutien,

Une assistance

Technique ou un conseil

Sommaire

Sommaire

| | |
|-------------------------------------|-----|
| Dédicace | i |
| Remerciements | ii |
| Liste des Figures et tableaux | iii |
| Introduction générale..... | iv |

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LES PILES A COMBUSTIBLE

| | |
|--|----|
| I-1-Introduction..... | 1 |
| I-2-Historique des piles à combustible | 1 |
| I-3-Principe de fonctionnement | 2 |
| I-4- Les rendements de fonctionnement des PAC | 3 |
| I-5- Système pile a combustible | 4 |
| I-6-Différents types des piles à combustible | 5 |
| I-7-Constitution d'une pile à combustible de type PEM | 7 |
| I-8- Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible | 8 |
| I-8-1 Les avantages | 8 |
| I-8-2 Les inconvénients | 9 |
| I-9- Caractéristiques de technologie des piles à combustible..... | 10 |
| I-9-1- Densité de courant..... | 10 |
| I-9-2- Tension réelle | 10 |
| I-10- Domaines d'application | 11 |
| I-10- 1- les applications transports..... | 12 |
| I-10- 2- les applications stationnaires | 12 |
| I-10- 3- les applications portables | 12 |
| I-10- 4- les applications militaires et spatiales | 12 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| I-11- Utilisation la pile à combustible dans différent capteur..... | 12 |
| I-11-1- Capteurs de terrains | 13 |
| I-11-2- Capteurs électrochimiques | 13 |
| I-11-3- Capteurs optiques..... | 13 |
| I-11-4- Capteurs biologiques | 13 |
| I-12- Conclusion | 13 |

CHAPITRE II :

Convertisseurs DC/DC pour des applications PàC

| | |
|--|----|
| II-1-Introduction | 14 |
| II-2-Définition d'un convertisseur DC-DC..... | 14 |
| II-2-1- Convertisseurs DC-DC non isolés | 14 |
| II-2-2- Les convertisseurs DC-DC isolés | 14 |
| II-3- Convertisseurs continu-continu isolés | 15 |
| II-3-1 - Convertisseur Flyback | 15 |
| II-3-2- Convertisseur push-pull | 18 |
| II-4- Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé | 20 |
| II-4-1-Le « BOOST » classique | 20 |
| II-4-2-Le « BOOST » en cascade | 22 |
| II-4-3- le « BOOST » entrelacé :IBC | 23 |
| II-4-4-le double “BOOST” double entrelacé : FIBC (flotant)..... | 24 |
| II -5-Etude comparative des deux structures (IBC) (FIBC) | 26 |
| II-6- Conclusion | 27 |

Sommaire

CHAPITRE III :

Dimensionnement du convertisseur

| | |
|--|----|
| III -1-introduction | 28 |
| III-2- Dimensionnement et les pertes dans les convertisseurs..... | 28 |
| III -3-Calcul des Pertes dans les convertisseurs DC/ DC | 29 |
| III -3-1-Pertes dans les inductances | 29 |
| III -3-2-Pertes dans les interrupteurs..... | 29 |
| III-3-3-les pertes dans les diodes | 31 |
| III-3-4-les pertes dans les condensateurs | 31 |
| III -4- Pertes dans le convertisseur « BOOST » classique | 31 |
| III-5-Pertes dans le convertisseur Double « BOOST » double entrelacé IDDB | 32 |
| III -6-Résultats de simulation | 34 |
| III-7- Conclusion | 37 |
| Conclusion générale..... | v |

| | |
|---|-----------|
| Figure I-1 : Schéma de principe de conversion directe en électricité..... | 1 |
| Figure I-2 :L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible. | 1 |
| Figure I-3 : Principe de fonctionnement | 3 |
| Figure. I-4: Comparaison de la performance des PAC par rapport aux autres systèmes de production de puissance. [7] | 4 |
| Figure I-5: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC..... | 5 |
| Figure I-6:Classification des piles à combustible..... | 6 |
| Figure I-7: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. [11]..... | 8 |
| Figure I-8: Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro Encyclo). [11]..... | 8 |
| Figure I.9 : Equivalent électrique d'une pile à combustible..... | 10 |
| Figure I-10: Influence de la polarisation sur la tension | 11 |
| Figure I- 11:Domaines d'application des piles à combustible..... | 11 |
| Figure II-1 : Représentations symboliques couramment utilisées aux entrées-sorties des du Convertisseur DC/DC..... | 14 |
| Figure II-2: Convertisseur DC/ DC..... | 15 |
| Figure II-3 : Convertisseur Flyback | 16 |
| Figure II-4 : Forme d'onde en mode de fonctionnement continu (à gauche) et discontinu (à droite)..... | 17 |
| Figure II-5 : Schéma de principe d'un convertisseur de type push-pull..... | 18 |
| Figure II-6 : Formes d'ondes typiques de convertisseur de type push-pull..... | 19 |
| La figure II-7 : schéma de principe de ce convertisseur..... | 21 |
| Figure II-8 : Formes d'ondes du convertisseur BOOST (courants à gauche, tension à droite)... | 21 |
| Figure II-9 : Convertisseur BOOST en cascade..... | 23 |
| Figure II-10 le « BOOST » entrelacé : IBC | 23 |
| Figure II-11:Double BOOST dual entrelacé – IDD BOOST | 25 |
| Figure II-3:Pertes des convertisseurs cas 1..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| Figure II-4 : rendement des convertisseurs cas 1..... | 35 |
| Figure II-5: Pertes des convertisseurs cas 2..... | 36 |
| Figure II-6:rendement des convertisseurs cas 2..... | 36 |
| Tableau II-1: Comparaison des topologies entrelacées..... | 7 |
| Tableau II-1: Comparaison des topologies entrelacées..... | 27 |
| Tableau III-1 : Composants utilisé pour calcule des pertes..... | 34 |

Introduction générale

Introduction générale

Les piles à combustibles représentent des sources de production d'énergie très intéressantes. Mais à cause de sa dynamique lente et sa tension de sortie qui varient fortement avec la charge un convertisseur DC DC est obligatoire pour régler les deux contraintes.

Un convertisseur continu-continu ou hacheur BOOST est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension continue réglable à la charge, à partir d'une source de tension continue. Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle des applications Pile à combustible à cause de ses hauts rendements, leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et coûts réduits, ils ont remplacé les Alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.

Le but de notre travail est Etude et simulation d'un convertisseur DC-DC pour les applications véhicule électrique

Organisation de la mémoire :

Ce mémoire est Structuré en une introduction générale et trois chapitres, conclusion générale

Dans le premier chapitre :

On s'intéresse aux piles à combustibles et leurs caractéristiques électriques les différents types ainsi que leur application, sans oublier les avantages et les inconvénients de ces dernières.

Dans le deuxième chapitre :

Les convertisseurs DC/DC isolés et non isolés pour PàC sont décrits

Dans le troisième chapitre :

Comparaison entre la structure IDDB (Interleaved Double Dual Boost) et le BOOST classique selon leur performance

**CHAPITRE I :
GENERALITE
SUR LES PILES
A COMBUSTIBLE**

I -1-Introduction :

Une pile à combustible est un appareil qui converti l'énergie chimique d'un combustible en électricité au travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible est approvisionné.

La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique. Celui-ci est généralement proche de 50%. [1] [2]

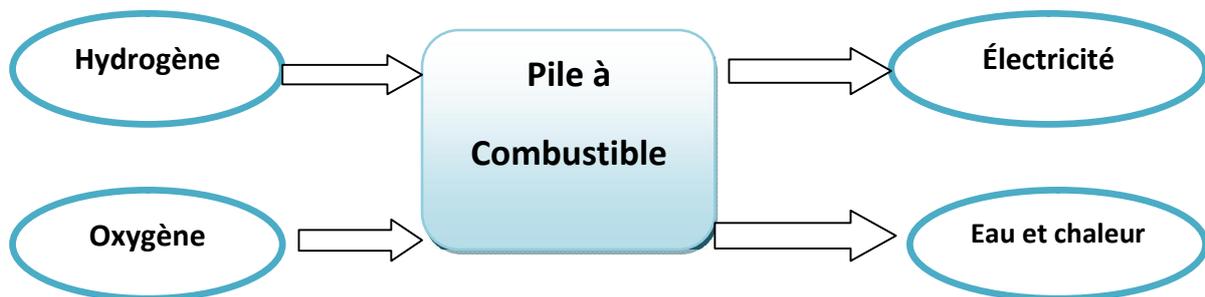


Figure I-1 : Schéma de principe de conversion directe en électricité

I -2-Historique des piles à combustible :

L'effet physico-chimique à l'origine des piles à combustible a été découvert en 1838 par le professeur Christian Friedrich Schönbein qui a observé un courant électrique dû à la combinaison d'hydrogène et d'oxygène. La première pile à combustible fut présentée par William GROVE en 1839 sous l'expérience suivante : une cellule hydrogène-oxygène (figure I-2) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique) [3].

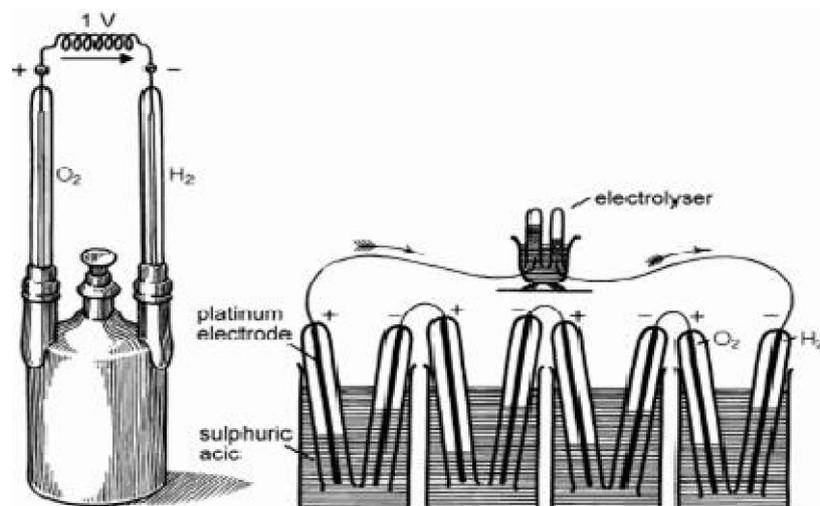


Figure I-2 : L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible [4]

Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques en vogue à cette période là. Cinquante ans plus tard, en 1889, Ludwig Mond et Charles Langer apportent des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs (platine) ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante. Ils baptisent cette technologie pile à combustible.

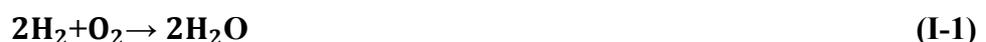
Wilhelm Ostwald dit en 1884 « la pile à combustible est une invention plus importante Pour l'humanité que la machine à vapeur et enverra bientôt le générateur Siemens dans les musées ». Malheureusement, à cause de la grande quantité de pétrole disponible et de l'invention du moteur à combustible, les piles à combustible furent délaissées jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. Les piles à combustible réapparurent alors dans le programme spatial américain Apollo [5].

Les acteurs du domaine énergétique français ne restent pas à l'écart des travaux de L'époque mais pour des raisons de faisabilité technique ou pour des raisons stratégiques (choix d'autres filières de production d'électricité) les programmes sont progressivement arrêtés.

Ce n'est que dans les années 1990 que les recherches reprennent, notamment dans le Domaine automobile. En 1999 les recherches vont être encouragées (et financées) grâce à la création d'un réseau national de recherche technologique « pile à combustible » elles sont poursuivies à l'heure actuelle par l'intermédiaire de projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ou d'autres organismes publics comme l'ADEM [3].

I-3 -Principe de fonctionnement :

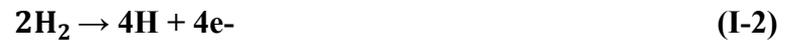
Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de L'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée D'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :



Dans les piles dites « acide », l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en Protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode.

Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique.[6]

Oxidation (anode):



Reduction (cathode) :

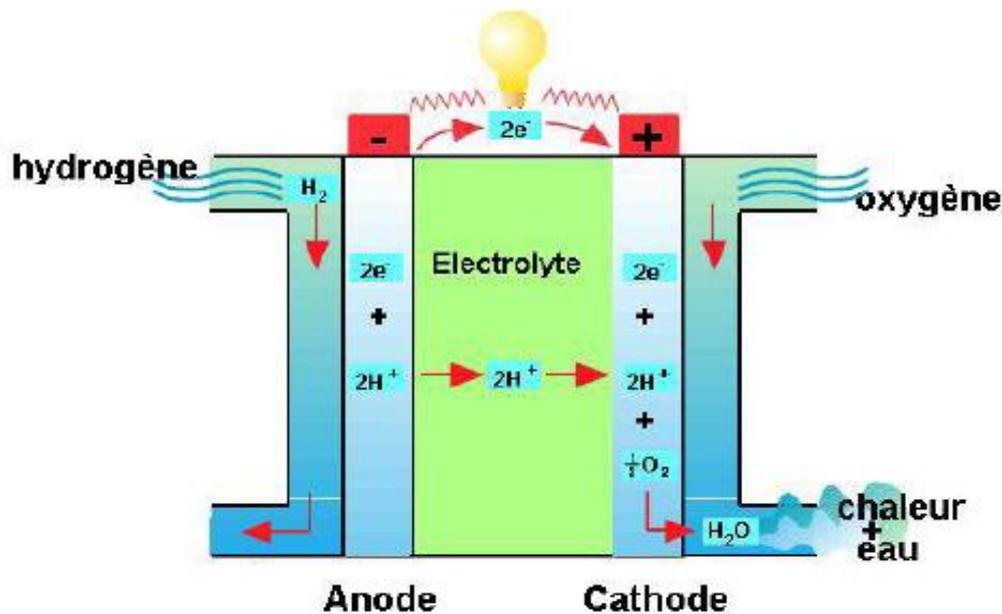


Figure I-3: Principe de fonctionnement.

I-4- Les rendements de fonctionnement des PAC :

En comparaison avec les moteurs à combustion interne et les autres systèmes de production de puissance (turbine à gaze, etc.), les piles à combustible ont un rendement énergétique très élevé. La (figure I-4) présente une comparaison des performances des différents systèmes de production de puissance. [7]

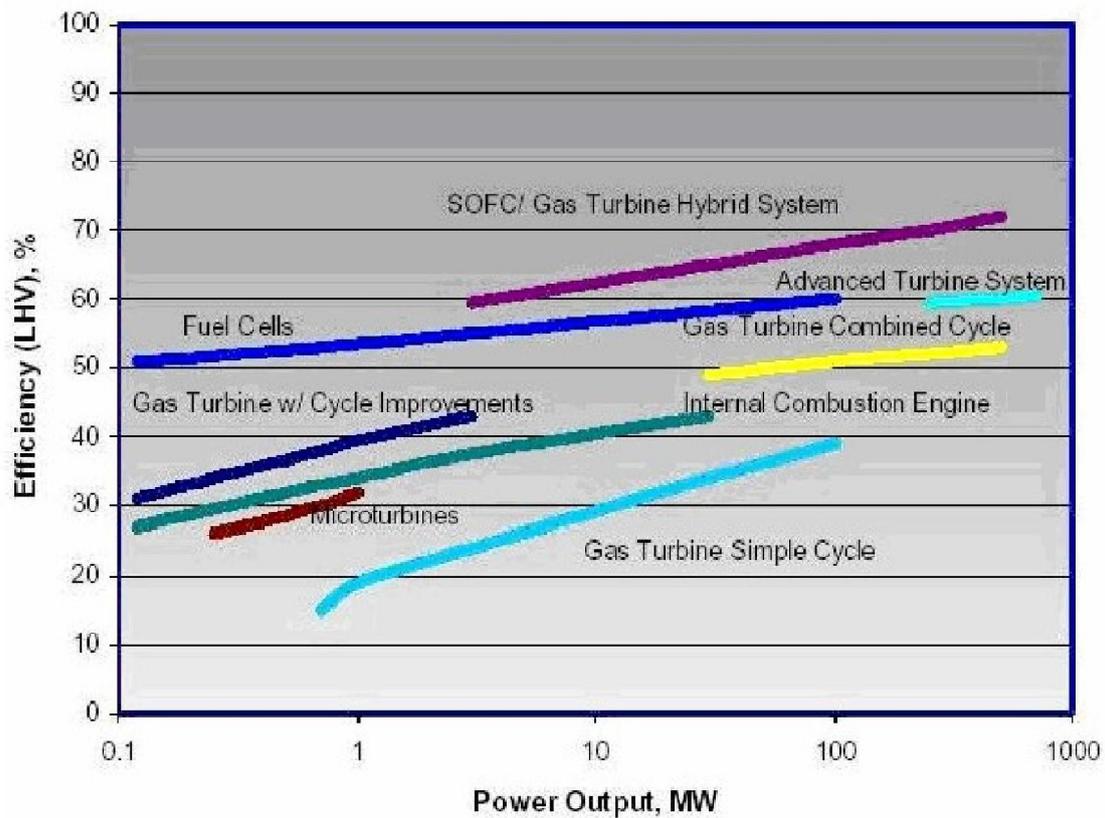


Figure I-4: Comparaison de la performance des PAC par rapport aux autres systèmes de production de puissance. [7]

Les PAC (Fuels Celles dans la figure) en général et les piles à électrolyte solide (SOFC) en Particulier, couvrent tous les domaines de production de puissance présentés dans la (figure I-4), de moins d'un MW à des centaines de MW. Leurs rendements en électricité varient de 50% à 60% et dépassent 70% pour les SOFC lorsque ce type de piles fonctionne en cycle combiné. [7]

I-5- Système pile à combustible :

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires Destinés à la faire fonctionner. La figure ci ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué. [8]

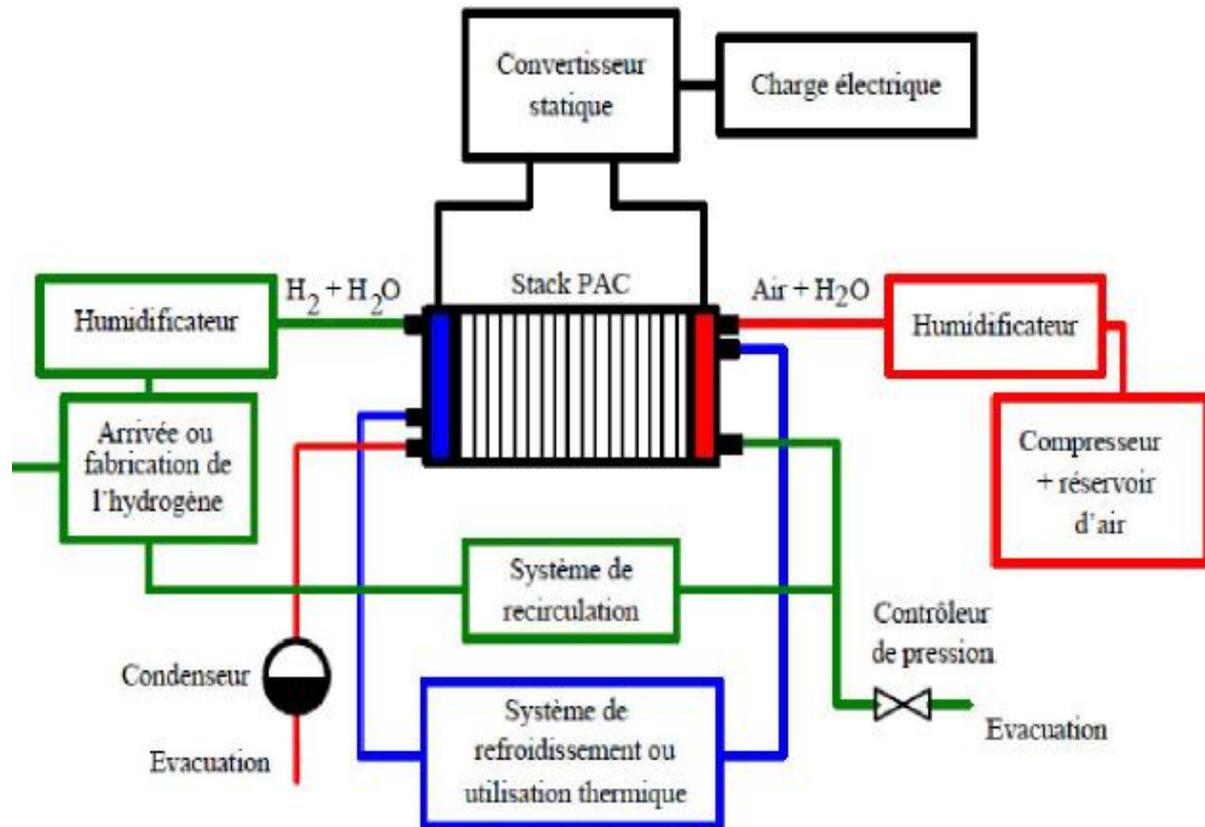


Figure I-5: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC.

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique.

I-6-Différents types des piles à combustible :

Il existe différents types de piles à combustible qui se différencient essentiellement par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement [9] :

- La Pile A Membrane Electrolyte Polymérique (PEMFC)
- La Pile A Méthanol Direct (DMFC)
- La Pile A Electrolyte Alcalin (AFC)
- La Pile A Acide Phosphorique (PAFC)
- La Pile A Oxyde Solide (SOFC)

➤ La Pile A Carbonates Fondus (MCFC)

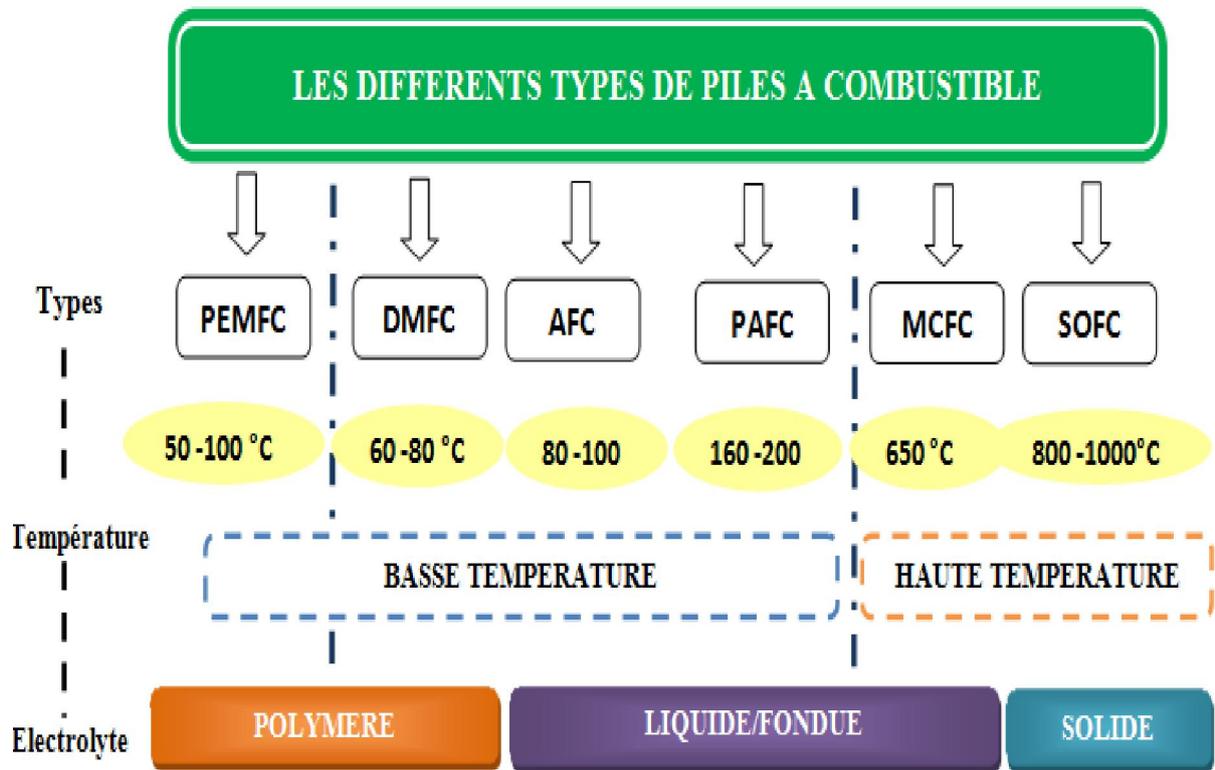


Figure I-6: Classification des piles à combustible

Le tableau suivant représente les différents types de la pile à combustible :

| types de la pile à combustible | Electrolyte | Température De fonctionnement | Domaine D'application | Rendement électrique |
|---|------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------|
| AFC Alkaline Fuel Cell Pile à combustible alcaline | Hydroxyde De potassium | 60°C à 90°C | Portable, Transport | Stack 60 à 70% |
| DMFC Direct méthanol Fuel Cell Pile à combustible au méthanol direct | Membrane polymère | 60°C à 120°C | Transport, Stationnaire | Stack 20 à 30% |

| | | | | |
|---|------------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------------|
| PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell Pile à combustible à membrane | Membrane polymère | 60°C à 100°C | Portable Stationnaire Transport | Stack 50 à 70% |
| PAFC Phosphoric Acide Fuel Cell Pile à combustible à acide phosphorique | Acide phosphorique | 150°C à 220°C | Transport, Stationnaire | Stack 55 % |
| MCFC Molten Carbonate Fuel Cell Pile à combustible à carbonate fondue | Carbonate de Métaux alcalins | 650°C | Stationnaire | Stack 55 % |
| SOFC Solid Oxide Fuel Cell Pile à combustible à oxyde solide | Céramique | 600°C à 1000°C | Stationnaire Transport | Stack 60 à 65% |

Tableau I-1 : Différents types de la pile à combustible. [10]

I-7-Constitution d'une pile à combustible de type PEM :

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME)(figure I-7) . [11]

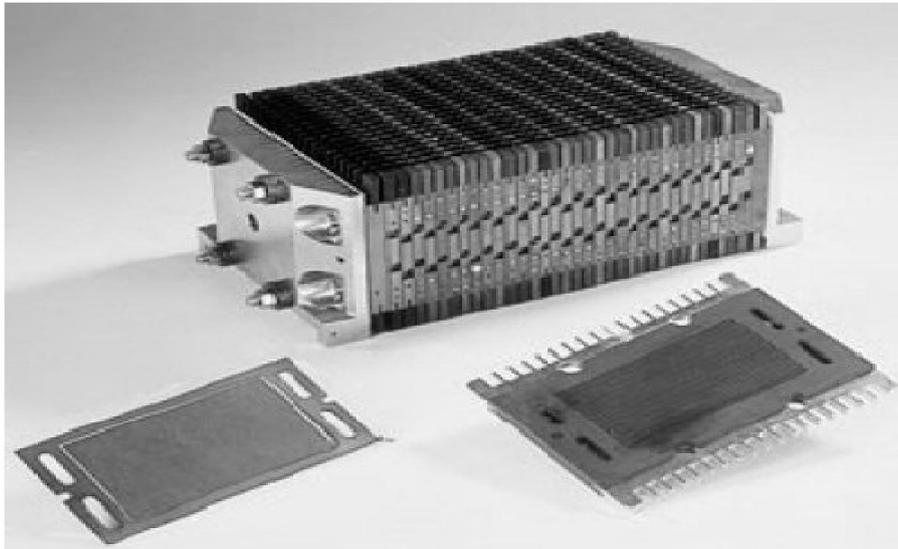


Figure I-7: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC. [11]

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement.

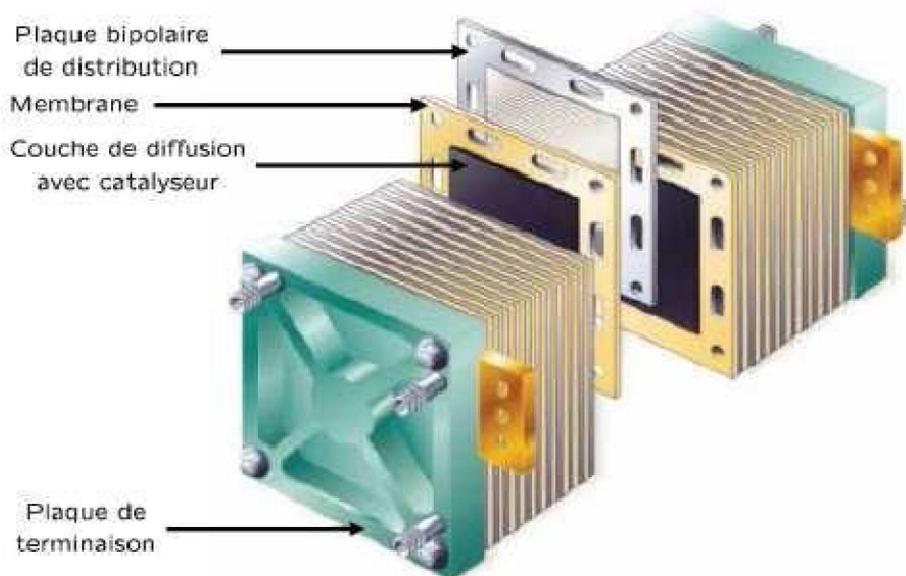


Figure I-8: Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro Encyclo). [11]

I-8- Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible :

I-8-1- Les avantages :

Les avantages les plus importants sont les suivants :

- **Très bon rendement énergétique (supérieur à 50 %) :** en comparaison avec moteurs a combustion interne (25-30%).l'énergie non convertie en énergie électrique

est émise sous forme de chaleur et est évacué sous forme d'eau chaude ou de vapeur. Ceci est un point fort dans le cas des applications domestiques, car la pile à combustible est capable de fournir de l'électricité et également de l'eau chaude qui pourra être utilisée pour le chauffage domestique ce qui va augmenter le rendement de la pile à combustible jusqu'à 80-90%.

- **Protection de l'environnement** : 99 % en moins de monoxyde de carbone en comparaison avec un véhicule à essence. [12]
- **Efficacité** : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands.
- **Modulabilité** : 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. [13]
- **Silence** : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur. [14].

I-8-2-Les inconvénients

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement : [15], [16]

- **Coût trop élevé de production et de maintenance**: Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires. Le poids et le volume
- **La durée de vie** : La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon
 - **l'application** : Automobile : quelques milliers d'heures.
 - **Stationnaire** : au moins 40 000 heures

Le manque d'infrastructures au niveau de l'approvisionnement en carburant (hydrogène, méthane). Ceci nécessite la mise en place de systèmes de production, de transport et de distribution. Cependant, la mise en place de tels systèmes ne peut se faire avant la commercialisation de la PAC.

I-9- Caractéristiques de technologie des piles à combustible :

I-9-1-Densité de courant :

La réaction électrochimique étant des réactions de surface, la densité de courant est donc une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (ramenée à la surface physique de l'électrode).

Elle est fonction de nombreux paramètres (type de pile à combustible, débit de Combustible, ect).

I-9-2- Tension réelle :

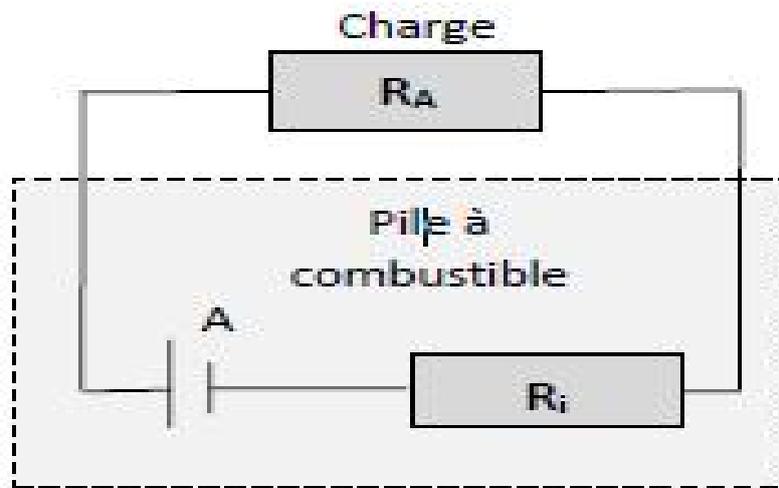


Figure I.9 : Equivalent électrique d'une pile à combustible.

La tension théorique est celle d'une pile à combustible en circuit ouvert ne débitant pas. Lorsque l'on relie les bornes de la pile à combustible à la charge, elle sera traversée par un courant d'intensité i , la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique suite aux phénomènes de polarisation dont on distingue trois formes :

- **Polarisation d'activation** qui concerne la diffusion des ions à l'interface électrode /électrolyte (transfert de charges) .
- **Polarisation de résistance** qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte.
- **Polarisation de concentration** qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. Les trois différentes zones illustres dans la (figure I-10).

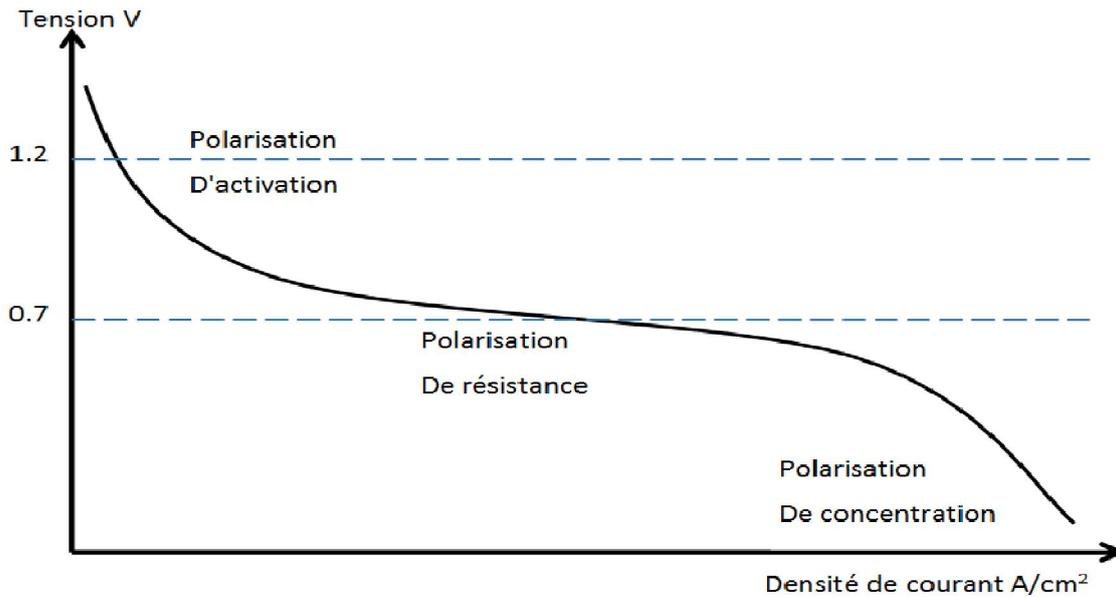


Figure I-10: Influence de la polarisation sur la tension.

La courbe [tension]/ [densité de courant] caractérise une pile à combustible. [1]

I-10- Domaines d’application :

Les piles à combustibles sont utilisées dans une large gamme de domaines qui seront présentés ci-dessous:



Figure I- 11:Domaines d’application des piles à combustible

I-10-1- les applications transports :

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques). [17]

I-10-2- les applications stationnaires :

L'avantage des piles à combustible dans ce domaine est la production simultanée de l'électricité et de la chaleur, les types SOFC et MCFC sont mieux adaptées à la cogénération d'électricité et de chaleur. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, Etats-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications:

- la production collective (200 kW à quelques MW)
- la production domestique ou individuelle (2 à 7 kW). [18]

I-10-3 - les applications portables :

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées. Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante. [19]

I-10-4-les applications militaires et spatiales :

Les spécificités des piles peuvent être utilisées pour ces secteurs de pointe que sont le militaire et le spatial. La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question qu'ils choisissent les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous marin fonctionnant grâce à des PAC. [20]

I-11- Utilisation la pile à combustible dans différent capteur:

Ils y a plusieurs capteurs qu'utilise la pile à combustible comme une source d'énergie quelque types :

I-11-1- Capteurs de terrains :

Plusieurs types de capteurs existent ; ils sont développés notamment dans du PNIR bio films (pôle national de recherche a implantation régionale).

I-11-2-Capteurs électrochimiques :

Le principe repose sur la mesure ampérométrique du flux de matière d'une espèce électro-active, l'oxygène dissous ou un indicateur électrochimique spécifique, au niveau de la surface de l'électrode. Le bio film en se développant sur la surface de l'électrode. Provoque la diminution du flux de matière.

I-11-3- Capteurs optiques :

Ils reposent sur plusieurs principes :

- Spectroscopie infrarouge atténuée a réflexion totale.
- Analyse de la diffusion multiple de la lumière par les agrégats qui permet de déterminer leur dimension fractale.

I-11-4- Capteurs biologiques :

Il s'agit d'utiliser les possibilités de la biologie moléculaire en immobilisant des anticorps et /ou des sondes nucléiques [21].

I-12- Conclusion :

Au premier chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des piles à combustible, puis nous avons présenté ses Principes de fonctionnement et différents types disponibles puis comparer leur.

CHAPITRE II :
convertisseurs
DC/DC pour des
applications PàC

II-1-Introduction :

L'objectif principale de ce deuxième chapitre est de présenter les différentes topologies de convertisseurs DC/DC isolés et non isolés qui sont adaptés au PàC. Ainsi, leurs avantages et inconvénients sont listés pour servir de lignes directrices pour l'aide à la prise de décision dans le choix de la topologie adéquate.

II-2-Définition d'un convertisseur DC-DC:

Par définition, Un Convertisseur DC-DC est un circuit d'électronique de puissance qui convertit une source de courant continu (DC) d'un niveau de tension spécifié à un autre différent. C'est un type de convertisseur de puissance électrique. Les niveaux de puissance considérés par de tels circuits vont de très bas (petites batteries) à très haut (transmission de puissance à haute tension voire très haute tension)., le modèle des tensions-courants à ses entrées-sorties peut être symbolisé comme indiqué sur la (Figure II-1) suivante :

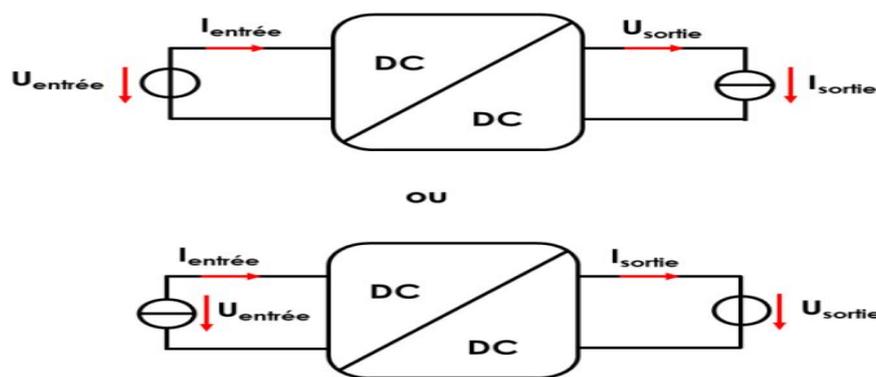


Figure II-1 : Représentations symboliques couramment utilisées aux entrées-sorties des du convertisseur DC/DC.

II-2-1-Convertisseurs DC-DC non isolés : appelés hacheurs, qu'ils soient réversibles ou bien non réversibles, le type réversible permet l'inversion du courant ou de la tension, par contre le type non réversible permet le transfert de l'énergie électronique dans un sens unidirectionnel (de la source vers la charge)[22].

II-2-2-Les convertisseurs DC-DC isolés : appelés alimentation à découpage, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC-DC. Ces alimentations comportent, au sein des cellules de commutation, des transformateurs qui permettent d'assurer un isolement galvanique, et d'élever ou abaisser les niveaux de tension et de courant [23].

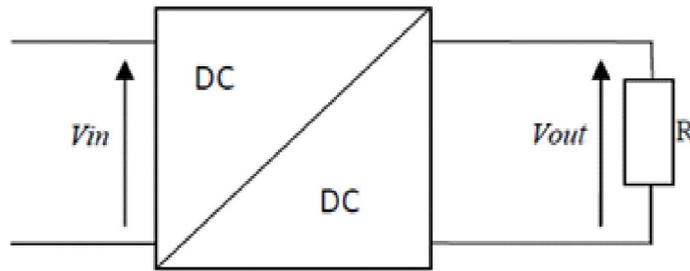


Figure II-2: Convertisseur DC/ DC

Dans le cas où la sortie doit être isolée galvaniquement de l'entrée par un étage intermédiaire, le convertisseur DC/DC est dit « isolé ». L'étage intermédiaire est en fait un transformateur qui assure l'isolation galvanique entre la partie primaire et l'étage secondaire et qui permet aussi d'élever ou d'abaisser la tension du primaire. Dans le cas contraire, si aucune isolation n'est demandée, le convertisseur DC/DC est dit « non isolé ». L'intérêt des montages non isolés réside dans l'absence d'un transformateur généralement onéreux, volumineux et lourd.

II-3- Convertisseurs continu-continu isolés :

Les convertisseurs DC/DC éleveurs non isolés pour les systèmes PàC ont souvent une architecture à base de la topologie du convertisseur éleveur conventionnel appelé hacheur conventionnel ou traditionnel (BC : BOOST Converter en anglais)

L'utilisation des convertisseurs DC/DC isolés pour PàC permet d'atteindre des gains d'élévation en tension importants.

Les convertisseurs isolés continu-continu 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.

II-3-1 - Convertisseur Fly back :

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 II-3).

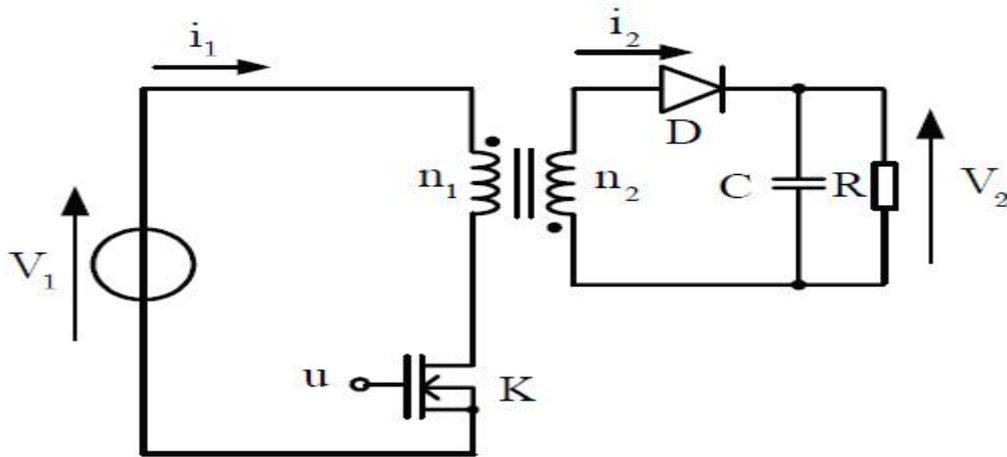


Figure II-3 : Convertisseur Fly back.

Lorsque l'interrupteur K conduit, la source fournit de l'énergie à l'inductance primaire L_1 qui est ensuite transférée au secondaire lorsque K est ouvert. Dans ce convertisseur, les courants primaire et secondaire i_1 et i_2 sont discontinus et l'on met en évidence deux modes de fonctionnement selon que le flux ϕ unidirectionnel dans le transformateur est continu ou discontinu (figure II-4).

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

$$Y_{\text{CON}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot m$$

$$Y_{\text{disCON}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\alpha^2}{2 \cdot X} \quad (\text{II - 1})$$

où le courant réduit est $X = \frac{L_1 \cdot f}{V_1}$, f étant la fréquence de fonctionnement du convertisseur.

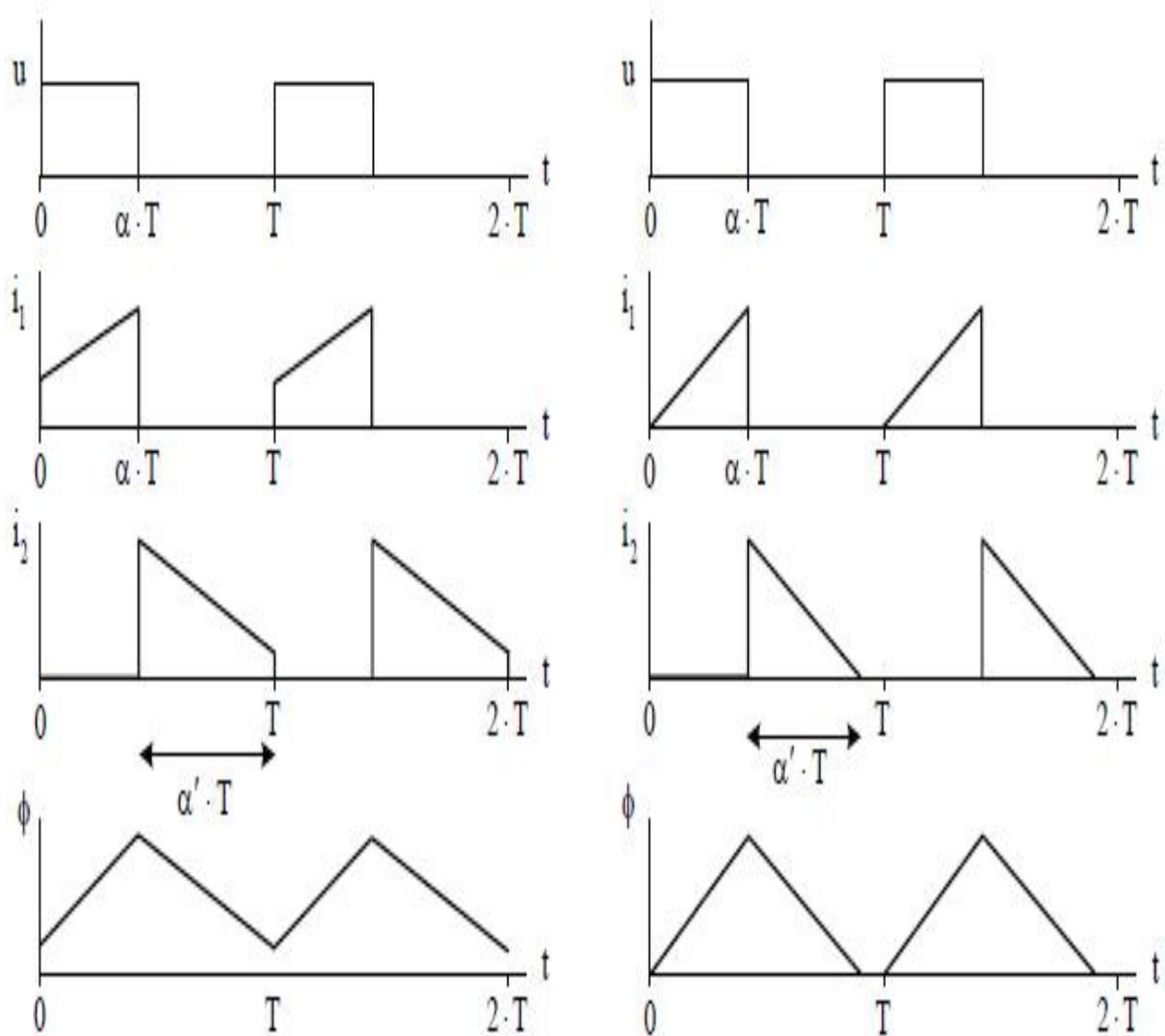


Figure II-4 : Forme d'onde en mode de fonctionnement continu (à gauche) et discontinu (à droite).

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 **inconvenients** 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 de l'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 [24].

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 type de convertisseur (Boost [25], Sepic [26], ou Forward[27]).

II-3-2- Convertisseur push-pull :

Ce convertisseur utilise un transformateur à point milieu qui permet de transférer à tout instant l'énergie au secondaire (figure II-5) :

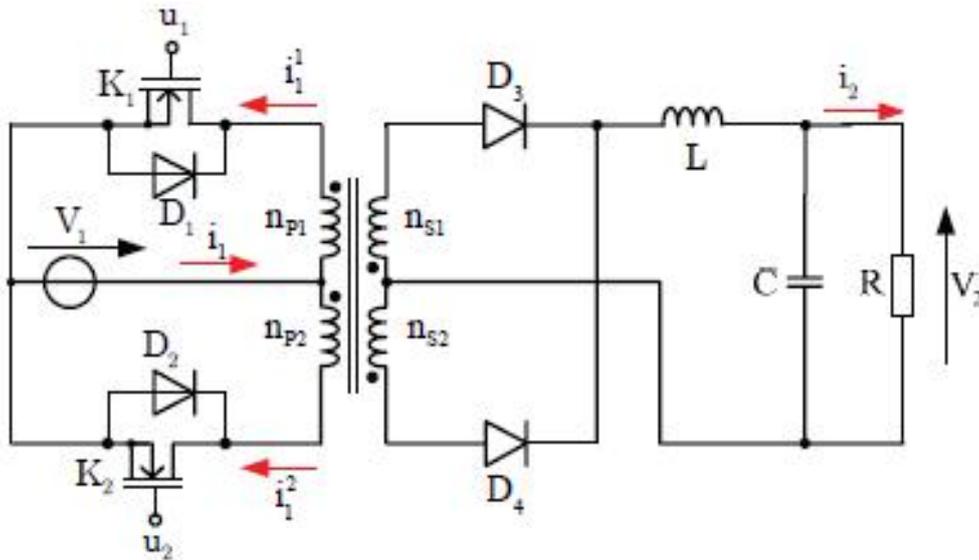


Figure II-5 : Schéma de principe d'un convertisseur de type push-pull.

Les formes d'onde de ce convertisseur sont données sur la (figure II-6). Chacun des interrupteurs est commandé pendant la même durée $\alpha \cdot T$, K_1 pendant la première demi-période, K_2 pendant la deuxième, le rapport cyclique pouvant évoluer entre 0 et 0.5.

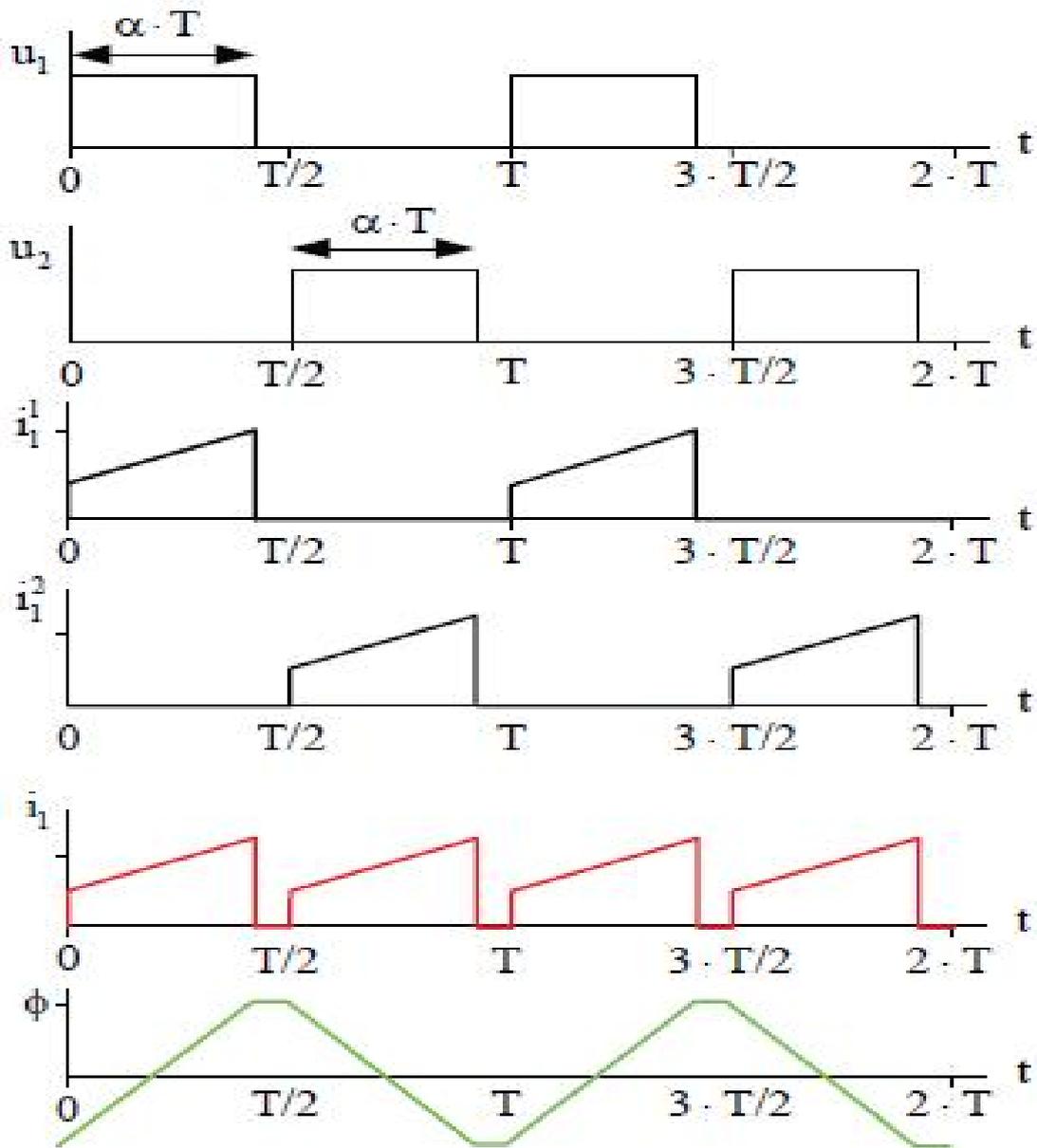


Figure II-6 : Formes d'ondes typiques de convertisseur de type push-pull.

Le flux magnétique ϕ de ce convertisseur est alternatif et utilise l'ensemble de la courbe B-H du matériau magnétique. Un problème peut venir de dissymétries du montage (chutes de tension, durée de conduction des interrupteurs) qui conduisent à un courant magnétisant comportant une composante continue susceptible de saturer le noyau magnétique. Un contrôle en courant du convertisseur permet de résoudre ce problème [24].

Comme pour le Fly back, les inductances de fuite du transformateur induisent des contraintes lors du blocage des interrupteurs et diminuent le rendement. Ces contraintes peuvent être réduites grâce à l'utilisation de circuit écrêteur [28] et [29].

De plus, comme précédemment, le courant délivré par la source comporte une ondulation importante difficilement compatible avec une pile à combustible sauf à filtrer ce courant. Le rapport entre la tension V_2 et V_1 en grandeurs réduites de ce convertisseur est :

$$Y = \frac{V_2}{V_1} = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{n_{s1}}{n_{p1}} = 2 \cdot \alpha \cdot m \quad (\text{II - 2})$$

Avantage :

- Adapté pour des applications à basse tension et à basse puissance Volume et coût réduits.

Inconvénients :

- Les interrupteurs de puissance manipulent le double de la tension d'entrée → des pertes importantes par conduction à cause de la chute importante de tension → faible rendement [30].
- Les inductances de fuite du transformateur induisent des contraintes lors du blocage des interrupteurs et diminuent le rendement [31]. Pour choisir une topologie de convertisseur pour PàC entre celles présentées précédemment, plusieurs critères doivent être pris en compte à savoir le critère de volume et de poids, de la compacité, du taux d'ondulation de courant $\Delta i_{PàC}$ et encore du gain en tension.

II-4- Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé :

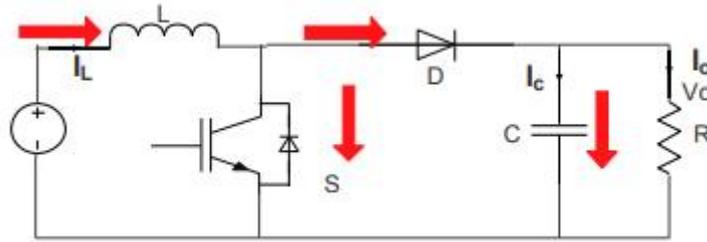
Nous allons intéresser dans cette technologie aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de BOOST. Plusieurs variantes existent : le BOOST classique, Le « BOOST » en cascade, le BOOST entrelacé et le double BOOST dual entrelacé...etc.

II-4-1-Le « BOOST » classique :[32]

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

Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (exemple : transistor) et d'une diode D. L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de Période de découpage fixe T_d Et de rapport cyclique variable α . Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT_d et ouvert de αT_d à T_d . Selon la présence et l'absence du courant dans l'inductance on peut répartir deux modes de Fonctionnement, conduction discontinue ou conduction continue. On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La (figure II-7) présente le schéma de principe de ce convertisseur, et la (figure II-8) donne les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des Courants (à gauche) et tensions (à droite).

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes de courant et de tension de la (figure II-7) .



La figure II-7 : schéma de principe de ce convertisseur

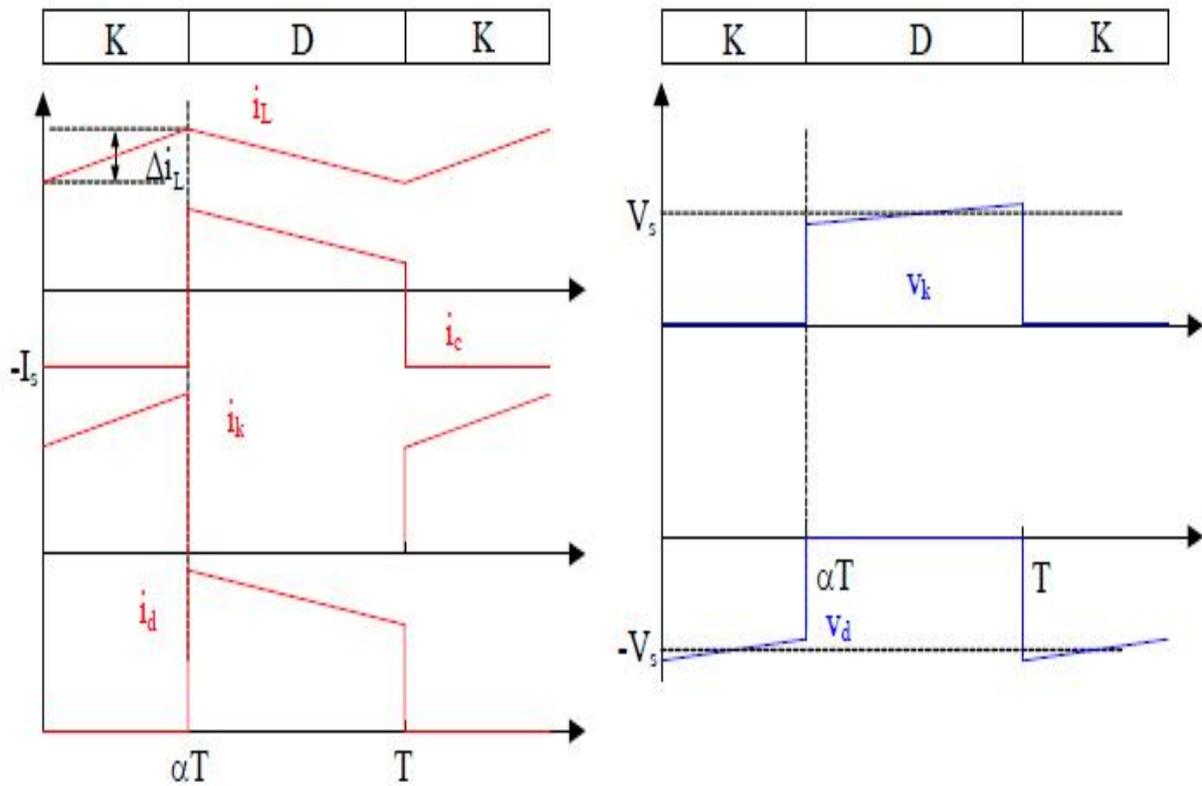


Figure II-8 : Formes d'ondes du convertisseur BOOST (courants à gauche, tension à droite).

- ❖ En notant X la valeur moyenne de x, α le rapport cyclique du signal de commande, et f la fréquence de découpage, on en déduit la tension de sortie en valeur moyenne :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \tag{II -3}$$

- ❖ L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} \tag{II -4}$$

$$\Delta V_S = \frac{\alpha \cdot I_S}{C \cdot f} = \frac{\alpha \cdot V_e}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot f}$$

Par définition, α 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 :

$$I_L = \frac{I_S}{1-\alpha} \quad (\text{II -5})$$

- ❖ Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension, on a :

$$V_{k,\max} = |V_{d,\max}| = V_{s,\max} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_S}{2} \quad (\text{II -6})$$

- ❖ et en courant :

$$i_{k,\max} = |i_{d,\max}| = i_{s,\max} = \frac{I_S}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II -7})$$

Avantage de convertisseur BOOST :

- Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes avec des Sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié Aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) Puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de Puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. Le Convertisseur BOOST est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur BUCK est employé pour abaisser la tension de Sortie [33].

II-4-2-Le « BOOST » en cascade :

Le circuit du convertisseur est donné par la figure ci-dessous.

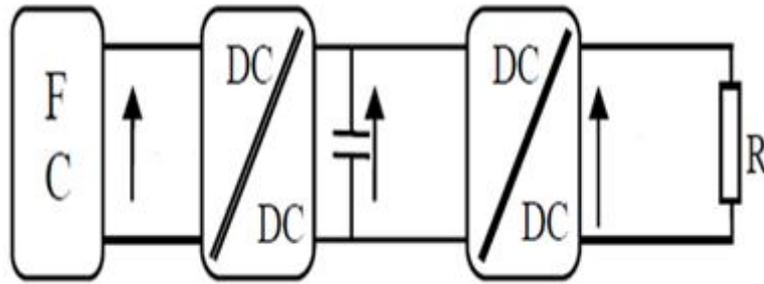


Figure II-9 : Convertisseur BOOST en cascade

La tension aux bornes de la charge est donnée par:

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha_1} \cdot \frac{1}{1-\alpha_2} \quad (\text{II-8})$$

Les α_1 et α_2 sont le rapport cyclique de S_1 et S_2 respectivement. Donc le rapport de tension du convertisseur correspond au produit du rapport de tension des deux convertisseurs boost.

II-4-3- le « BOOST » entrelacé : IBC

Le circuit du convertisseur est donné par la figure ci-dessous.

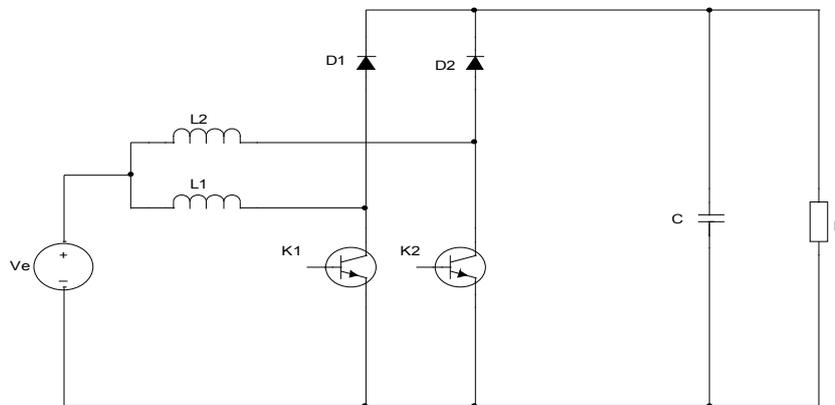


Figure II-10 le « BOOST » entrelacé : IBC

Dans la structure de convertisseur de la (figure II-10), 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 a 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 (figure II-10). La fréquence du courant d'entrée est doublée par rapport à celle du découpage.

Tant que les deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les Inductances sont de même forme, mais ils sont décalés d'une demi-période entre eux.

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

Pour un rapport cyclique inférieur à 0.5, l'ondulation du courant d'entrée et L'ondulation de la tension de sortie s'écrivent en fonction de l'ondulation dans les Convertisseurs élémentaires :

$$\Delta i = \frac{1-2 \cdot \alpha}{L \cdot f} \cdot \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} = \frac{1-2 \cdot \alpha}{1-\alpha} \cdot \Delta i_L \quad (\text{II -10})$$

$$\Delta V_S = \frac{I_S \cdot (0.5 - \alpha)}{C \cdot f} = \frac{V_e \cdot (0.5 - \alpha)}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot f}$$

f : fréquence de découpage.

- ❖ et pour un rapport cyclique supérieur à 0,5 :

$$\Delta i = \frac{2 \cdot \alpha - 1}{L \cdot f} \cdot \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} = \frac{2 \cdot \alpha - 1}{\alpha} \cdot \Delta i_L \quad (\text{II -11})$$

$$\Delta V_S = \frac{I_S \cdot (\alpha - 0.5)}{C \cdot f} = \frac{V_e \cdot (\alpha - 0.5)}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot f}$$

- ❖ Le rapport de tension n'a pas changé :

$$V_{k,\max} = |V_{d,\max}| = V_{s,\max} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_S}{2} \quad (\text{II -12})$$

- ❖ Par contre, les courants dans les interrupteurs et les diodes sont divisés par deux

$$i_{k,\max} = i_{d,\max} = i_{1,\max} = \frac{I}{2} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} \quad (\text{II -13})$$

II-4-4-le double “BOOST” double entrelacé : FIBC (flotant)[34]

Un des inconvénients du double BOOST entrelacé est la non réduction du courant dans les inductances.

Malgré qu'il y ait deux inductances, le courant moyen dans chacune reste la totalité du courant de la source. Ceci causera des difficultés lors du dimensionnement de ces inductances et le système est rendu plus complexe en raison du nombre de branches plus important. De plus, quel que soit l'état des interrupteurs, le courant doit traverser deux SC en série. Cela veut aussi dire que les pertes semi conducteur seront doublées.

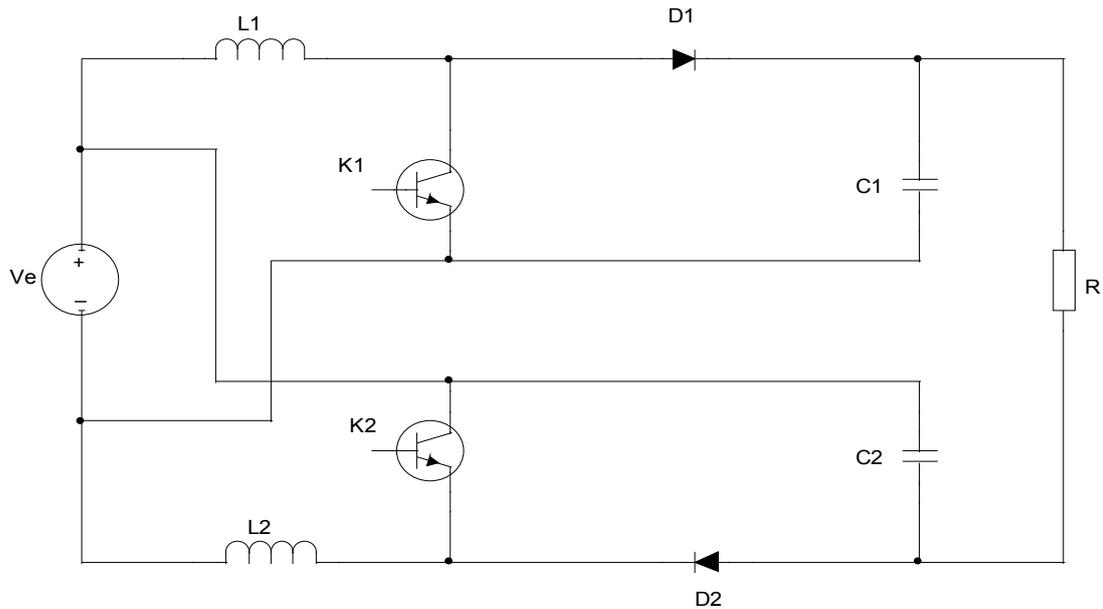


Figure II-11: Double BOOST dual entrelacé – IDD BOOST

Nous allons présenter dans cette partie une nouvelle structure, nommée IDD BOOST, qui possède des caractéristiques meilleures par rapport aux structures précédentes par, d’une part, une tension de dimensionnement des composants réduite comme dans le cas du double BOOST entrelacé et d’autre part, des courants réduits dans les inductances comme pour le BOOST entrelacé.

Le schéma de cette structure est illustré dans la (figure II-11). Il se compose de deux BOOST dont les entrées sont communes mais dont les sorties sont séparées par la charge.

Les transistors sont commandés avec un décalage de $T/2$. La tension de sortie de chaque BOOST peut être déterminée de façon classique :

$$V_{Csa} = V_{Csb} = \frac{V_s + V_{PAC}}{2} = \frac{V_{PAC}}{1 - \alpha} \tag{II -14}$$

La tension de sortie est déterminée en regardant la maille de sortie :

$$V_s = V_{PAC} - V_{PAC} + V_{Csa} = - V_{PAC} + 2 \frac{V_{PAC}}{1 - \alpha} \tag{II -15}$$

Soit : $V_s = V_{PAC} + \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} V_{PAC}$

Le rapport cyclique s’écrit : $\alpha = \frac{V_s - V_{PAC}}{V_s + V_{PAC}} = 1 - \frac{2V_{PAC}}{V_s + V_{PAC}} = 1 - c = \frac{y - 1}{y + 1}$ (II -16)

Avec $y = \frac{V_s}{V_{PAC}}$ qui est le rapport de transformation de tension

Puisque $V_s > V_{PAC}$, $\frac{2 \cdot V_{PAC}}{V_s + V_{PAC}} > \frac{2 \cdot V_{PAC}}{2V_s} = \frac{V_{PAC}}{V_s}$

$$\text{Nous déduisons donc : } \alpha = 1 - \frac{2 \cdot V_{\text{PAC}}}{V_s + V_{\text{PAC}}} < 1 - \frac{V_{\text{PAC}}}{V_s} \quad (\text{II -17})$$

On constate ici que, si l'on désire avoir le même point de fonctionnement (même tension d'entrée et même tension de sortie), le rapport cyclique que nécessite l'IDD BOOST est inférieur à celui du BOOST ou du double BOOST. Ceci est très intéressant pour les structures de type BOOST à grand rapport d'élévation de tension.

Le courant moyen fourni par la source est déterminé en équilibrant la puissance en entrée et en sortie :

$$I_{\text{PAC}} = \frac{V_s}{V_{\text{PAC}}} \cdot I_s = \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \cdot I_s \quad (\text{II -18})$$

II -5-Etude comparative des deux structures (IBC) (FIBC):

Cette partie a pour objectif de résumer les avantages et inconvénients des deux topologies entrelacées qui ont été discutés dans ce chapitre. Le (tableau II-1) souligne que la topologie entrelacée flottante ou IDDB offre un meilleur rendement que celui de la topologie BOOST entrelacée classique. Ceci est dû à un fonctionnement avec des rapports cycliques plus faibles pour un même gain d'élévation. Les deux architectures bénéficient d'une redondance naturelle permettant de garantir une continuité de service du convertisseur tout en réduisant son volume. Toutefois, un fonctionnement dans un mode défectueux va conduire à des contraintes électriques supplémentaires, en particulier pour la topologie entrelacée flottante. En effet, la phase saine de la partie défectueuse va compenser entièrement la perte d'une phase, provoquant une baisse drastique de l'efficacité énergétique.

De plus, si aucun contrôle tolérant aux défauts n'est appliquée à ce convertisseur afin de minimiser les contraintes de courant, cela pourrait conduire à la saturation des composants magnétiques et par conséquent à la perte du contrôle du convertisseur [35]-[36]. Compte tenu du coût et de la moindre complexité, la structure IBC est le meilleur choix pour des applications automobiles.

| Topologie | Avantage | Inconvénient |
|------------------------------------|---|---|
| BOOST entrelacé classique (IBC) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bon rendement ➤ Réduction de l'ondulation de courant ➤ Faible volume des composants magnétiques ➤ Redondance statique | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Contraintes électriques de courant supplémentaires en cas de défaut (i.e. 50% de l'élévation du courant) ➤ Coût élevé ➤ Complexité de contrôle élevée |
| BOOST flottant entrelacé (FIBC) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Gain d'élévation élevé ➤ Meilleur rendement ➤ Réduction de l'ondulation de courant ➤ Faible volume des composants magnétiques ➤ Redondance statique | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Contraintes électriques de courant supplémentaires en cas de défaut (i.e. 50% de l'élévation du courant) ➤ Coût très élevé ➤ Complexité de contrôle très élevée |

Tableau II-1: Comparaison des topologies entrelacées

II -6-Conclusion :

Dans ce chapitre nous présentons une comparaison entre des convertisseurs DC/DC incluant des topologies non-isolées, isolées pour des applications PàC en se basant sur les problématiques actuelles à savoir la réduction du volume et du poids, la réduction de l'ondulation du courant d'entrée ou encore la tolérance aux défauts.

A partir de leurs performances et ses avantages en termes de tolérance aux défauts et d'ondulation de courant d'entrée, les structures entrelacées flottantes ou IDDB a été choisie pour la suite de ce mémoire.

CHAPITRE III : **Dimensionnement du** **convertisseur**

III -1-introduction :

Après une présentation des différentes structures de convertisseur pour les applications pile à combustible. Ce chapitre est consacré sur le calcul des pertes et le rendement du convertisseur IDDB, ces performances sont comparées avec le convertisseur BOOST classique.

III-2- Dimensionnement et les pertes dans les convertisseurs:

Pour le dimensionnement des convertisseurs DC DC pour les applications pile, il est nécessaire que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les risques d'échauffements excessifs dans les composants semi-conducteurs. Les interrupteurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistor à effet de champ d'oxyde de métal) sont dans les applications faibles ou moyen puissance et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) pour les applications hautes puissance [37].

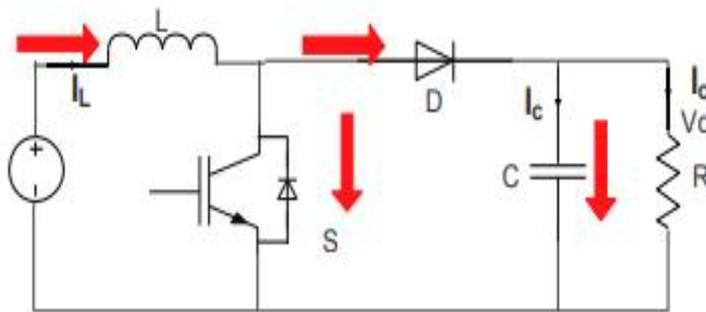


Figure III - 1: schéma de principe de ce convertisseur

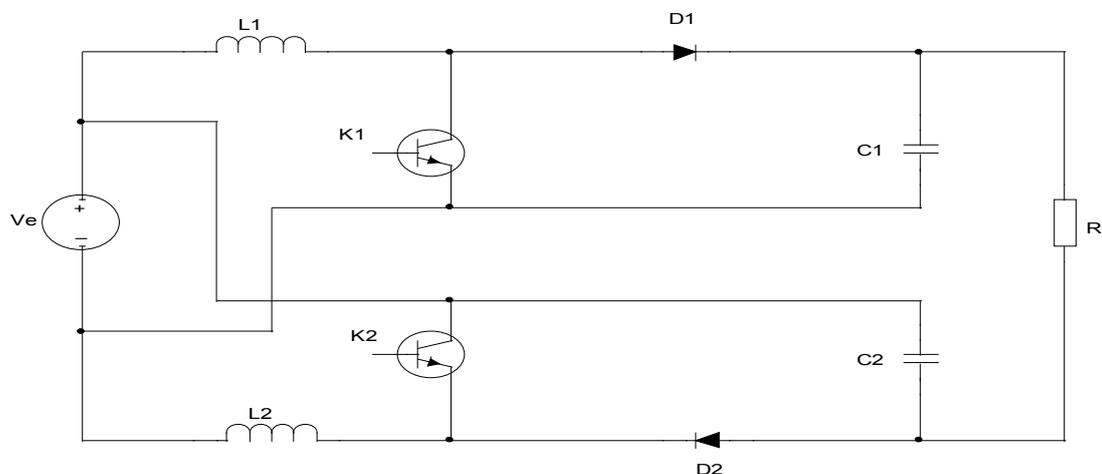


Figure III-2: Double BOOST dual entrelacé – IDD BOOST

III –3- Calcule des Pertes dans les convertisseurs DC DC :

Dans cette section nous avons présenté les calculs des pertes pour les deux structures IDDB et BOOST classique. Dans le but de déterminer la structure du convertisseur minimisant les pertes pour une puissance transmise donnée, la fréquence des signaux de commande est choisie égale à 10 kHz. Les inductances sont dimensionnées avec des circuits magnétiques Ferrites [38].

Les pertes dans le convertisseur se décomposent en trois parties : les pertes dans les inductances, les composants semi-conducteurs et les pertes dans le condensateur de sortie.

III -3-1- Pertes dans les inductances :

Les pertes dans les inductances sont calculées par la somme des pertes Joule et des pertes dans les circuits magnétiques. Les pertes Joule sont définies par :

$$P_{\text{cop}} = R_L \left(\int_t^{t+T} (I_L^2) + (t) dt \right) \quad (\text{III-1})$$

Les pertes dans les circuits magnétiques sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault [3] :

$$P_{\text{cor}} = 6.5 \cdot f^{1.51} \cdot \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^{1.74} \cdot m \quad (\text{III-2})$$

Où f est la fréquence des ondulations de courant en kHz.

ΔB est l'ondulation de l'induction T .

m la masse du circuit magnétique en kg.

III -3-2- Pertes dans les interrupteurs :

Les pertes dans les composants semi-conducteurs sont la somme entre les pertes de conduction et les pertes de commutation.

$$P_{\text{kcond}} = \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} (i_{\text{kw}}^2) + (t) dt \right) \cdot R_k + \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} (i_{\text{kw}}) + (t) dt \right) \cdot V_k \quad (\text{III-3})$$

V_k et R_k sont la chute de tension et la résistance dans l'état « ON » de l'interrupteur, respectivement.

i_{kw} Courant circuit circulant au borne de l'interrupteur lors de la commutation.

Les pertes de commutation d'un interrupteur sont calculées selon le type d'interrupteur soit IGBT ou MOSFET.

Pour l'IGBT, les énergies de commutation à l'ouverture $t_{d(\text{off})}$ et à la fermeture $t_{d(\text{on})}$

Sont souvent données dans leurs fiches techniques.

Les pertes de commutations dans les IGBT peuvent être définies par :

$$P_{\text{kcom-igbt}} = \frac{1}{2} I_{\text{kw}} \cdot V_{\text{kw}} (t_{\text{d(on)}} + t_{\text{d(off)}} + t_{\text{r}} + t_{\text{d(off)}} + t_{\text{f}}) \cdot f \quad (\text{III- 4})$$

I_{kw} Et V_{kw} sont le courant et la tension aux bornes du transistor durant la commutation.

$t_{\text{d(on)}}$: Temps de retard à l'état « ON »

t_{tr} : Temps de montée

$t_{\text{d(off)}}$: Temps De retard à l'état « Off »

t_{f} : Temps de descente respectivement.

Ils peuvent être obtenus à partir de la fiche technique du fabricant

Pour le MOSFET, les énergies de commutation à l'ouverture $W_{\text{(off)}}$ et à la fermeture $W_{\text{(on)}}$ ne sont pas fournies par le constructeur.

Les pertes de commutations dans les **MOSFET** peuvent être définies par :

$$P_{\text{kcom-mosfet}} = (W_{\text{(on)}} + W_{\text{(off)}}) \cdot f \quad (\text{III- 5})$$

$W_{\text{(on)}}$ $W_{\text{(off)}}$ sont l'énergie à la fermeture et l'énergie à l'ouverture respectivement et sont calculées par les relations suivantes :

$$W_{\text{(on)}} = \frac{V_{\text{DS}}^2 \cdot I_{\text{DS}}^2}{2 \cdot V_{\text{DS-test}} \cdot I_{\text{DS-test}}} (t_1 + t_2) \quad (\text{III- 6})$$

$$W_{\text{(off)}} = \frac{V_{\text{DS}}^2 \cdot I_{\text{DS}}^2}{2 \cdot V_{\text{DS-test}} \cdot I_{\text{DS-test}}} (t_3 + t_4)$$

Avec :

V_{DS} Et I_{DS} : sont la tension et le courant drain-source.

$V_{\text{DS-test}}$ Et $I_{\text{DS-test}}$: la tension et le courant drain-source, respectivement, sous lequel l'interrupteur a été testé pour déterminer sa fiche technique.

t_1 : La durée de la croissance du courant drain-source de zéro à I_{DS} (valeur à l'état « ON »).

t_2 : La durée de la croissance de tension V_{DS} (valeur à l'état « Off »).

t_3 : La durée de la croissance du courant drain-source de zéro à I_{DS} (valeur à l'état « Off »).

t_4 : La durée de la croissance de tension V_{DS} (valeur à l'état « ON »).

III-3-3-les pertes dans les diodes :

Les pertes de conduction dans les diodes peuvent être définies par :

$$P_{dcond} = \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} (i_d)^2 dt \right) \cdot R_d + \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_d dt \right) \cdot V_d \quad (\text{III-7})$$

V_d et R_d sont respectivement, la chute de tension et la résistance dans l'état « ON » de diode.

$$P_{dcom} = Q_n \cdot V_d \cdot f \quad (\text{III-8})$$

III-3-4-les pertes dans les condensateurs :

Les pertes dans les condensateurs sont calculées par :

$$R_{cap} = R_{eq} \cdot i_{eff}^2 \quad (\text{III-9})$$

III-4- Pertes dans le convertisseur « BOOST » classique :

- **Pertes dans les inductances :**

Les pertes Joule sont définies par

$$P_{cop} = R_L \left(I_{fc}^2 + \frac{\Delta I_{fc}^2}{12} \right) \quad (\text{III-10})$$

R_L est la résistance équivalente série de l'inductance

Les pertes dans les circuits magnétiques sont :

$$P_{cop} = 6.5 \cdot f^{1.51} \cdot \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^{1.74} \cdot m \quad (\text{III-11})$$

Ou f est la fréquence des ondulations de courant en kHz, ΔB est l'ondulation de l'induction (en Tesla) et la masse du circuit magnétique en kg.

- **Les pertes dans les interrupteurs:**

Les pertes de conduction P_{kcond} et les pertes de commutation P_{Kcom} dans les interrupteurs sont :

$$P_{kcond} = D \cdot \left(R_K \left(I_{fc}^2 + \frac{\Delta I_{fc}^2}{12} \right) + V_K \cdot I_{fc} \right) \quad (\text{III-12})$$

$$P_{Kcom} = \frac{I_{fc} \cdot V_S^2 \cdot t \cdot f}{2 \cdot I_{test} \cdot V_{test}} \quad (\text{III-13})$$

$$t = t_{d(on)} + t_r + t_{d(off)} + t_f$$

- Les pertes dans les diodes:

$$P_{dcond} = (1 - D) \cdot (R_d \cdot (I_{fc}^2 + \frac{\Delta I_{fc}^2}{12}) + V_d \cdot I_{fc}) \quad (\text{III - 14})$$

$$P_{dcom} = \frac{I_{fc} \cdot I_{RM} \cdot V_S^2 \cdot t_n \cdot f}{2 \cdot I_{test} \cdot V_{test}} \quad (\text{III - 15})$$

R_d et V_d sont respectivement, la chute de tension et la résistance à l'état "ON" de la diode.

I_{RM} , t_n sont respectivement le courant et le temps de récupération. Ils peuvent être obtenus à partir de la fiche technique du fabricant.

- Pertes dans les condensateurs:

Les pertes dans les condensateurs sont calculées par :

$$P_{cap} = R_{eq} \cdot I_{eff}^2 \quad (\text{III - 16})$$

$$I_{eff}^2 = I_{fc}^2 + \frac{\Delta I_{fc}^2}{12}$$

R_{eq} est donnée par le constructeur.

III-5-Pertes dans le convertisseur Double « BOOST » double entrelacé

IDDB :

Le courant et la tension nominale de N-phase d'IDDB sont :

$$\frac{V_S}{(D+1)} \quad \text{Et} \quad \frac{2 \cdot I_{fc}}{N \cdot (D+1)}$$

- Pertes dans les inductances d'IDDB :

Ces pertes sont la somme des pertes de chaque inductance de N phases d'IDDB, et elles sont exprimées en fonction du nombre de phases

$$P_{Ncop} = R_L \cdot \left(\frac{4 \cdot I_{fc}^2}{N \cdot (D+1)^2} + \frac{N \cdot \Delta I_L^2}{12} \right) \quad (\text{III - 17})$$

$$P_{Ncop} = N \cdot 6.5 \cdot f^{1.51} \cdot \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^{1.74} \cdot m \quad (\text{III - 18})$$

- **Les pertes dans les interrupteurs d'IDDB:**

Ces pertes sont la somme des pertes de chaque interrupteur de N phases d'IDDB, et elles sont exprimées en fonction du nombre de phases

$$P_{NKcond} = D \cdot \left(R_K \cdot A + V_S \cdot \frac{2 \cdot I_{fc}}{(1+D)} \right) \quad (\text{III -19})$$

$$A = \frac{4 \cdot I_{fc}^2}{N \cdot (D+1)^2} + \frac{N \cdot \Delta I_{fc}^2}{12}$$

$$P_{NKcom} = \frac{2 \cdot I_{fc} \cdot V_S^2 \cdot t \cdot f}{N \cdot (D+1)^4 \cdot I_{test} \cdot V_{test}} \quad (\text{III -20})$$

$$t = t_{d(on)} + t_r + t_{d(off)} + t_f$$

- **Les pertes dans les diodes D'IDDB :**

Ces pertes sont la somme des pertes de chaque diode de N phases d'IDDB, et elles sont Exprimées en fonction du nombre de phases

$$P_{dcond} = (1 - D) \cdot \left(R_d \cdot A + V_d \cdot \frac{2 \cdot I_{fc}}{(1+D)} \right) \quad (\text{III -21})$$

$$A = \frac{4 \cdot I_{fc}^2}{N \cdot (D+1)^2} + \frac{N \cdot \Delta I_L^2}{12}$$

$$P_{dcom} = \frac{2 \cdot I_{fc} \cdot I_{RM} \cdot V_S^2 \cdot t_n \cdot f}{N \cdot (D+1)^4 \cdot I_{test} \cdot V_{test}} \quad (\text{III - 22})$$

- **Pertes dans les condensateurs d'IDDB :**

Ces pertes sont la somme des pertes de chaque condensateur de N phases d'IDDB, et elles sont exprimées en fonction du nombre de phase

$$P_{cap} = R_{eq} \cdot A \quad (\text{III -23})$$

$$A = \frac{4 \cdot I_{fc}^2}{N \cdot (D+1)^2} + \frac{N \cdot \Delta I_{fc}^2}{12}$$

III -6-Résultats de simulation :

Dans l'objectif de faire une comparaison entre la structure IDDB et le BOOST classique selon les pertes et Le rendement deux teste ont été réalisé, la premier pour $V_e=50$ et $V_s =150$ et la deuxième pour $V_e=150$ et $V_s=450$ v. Les calculs sont faits sous MATLAB Software et le tableau suivant résume les défèrent composants utilisé pour calcule des pertes

| Structure | Niveau de tension | Transistor | Diode | Inductance |
|------------------|----------------------------|---|--|------------|
| IDB BOOST | $V_e=50$ et $V_s =150$ | MOSFET SEMIKRON SK 85 MH 10 T 100V 80A | SCHOTTKY STPS80L6060V 80A | L=52uH |
| BOOST | $V_e=50$ et $V_s =150$ | MOSFET SEMIKRON SKM 111 AR 100V 200A | SCHOTTKY STPS80150C150V 80A | L=100uH |
| IDB BOOST | $V_e=150$ et $V_s =450$ | IGBT SEMIKRONSTPS80150C 600V 75A | Diode SKD 100 400V 100A | L=80uH |
| BOOST | $V_e=150$ et $V_s =450$ | IGBT SKM150MLI066TAT 600V 150A | Diode SK96GAB06UFμ 600V 126A | L=160uH |

Tableau III-1 : Composants utilisé pour calcule des pertes.

Les courbes de simulation des pertes et le rendement des deux structures en fonction du courant avec une tension de sortie pour le premier cas sont représentés dans la figure :

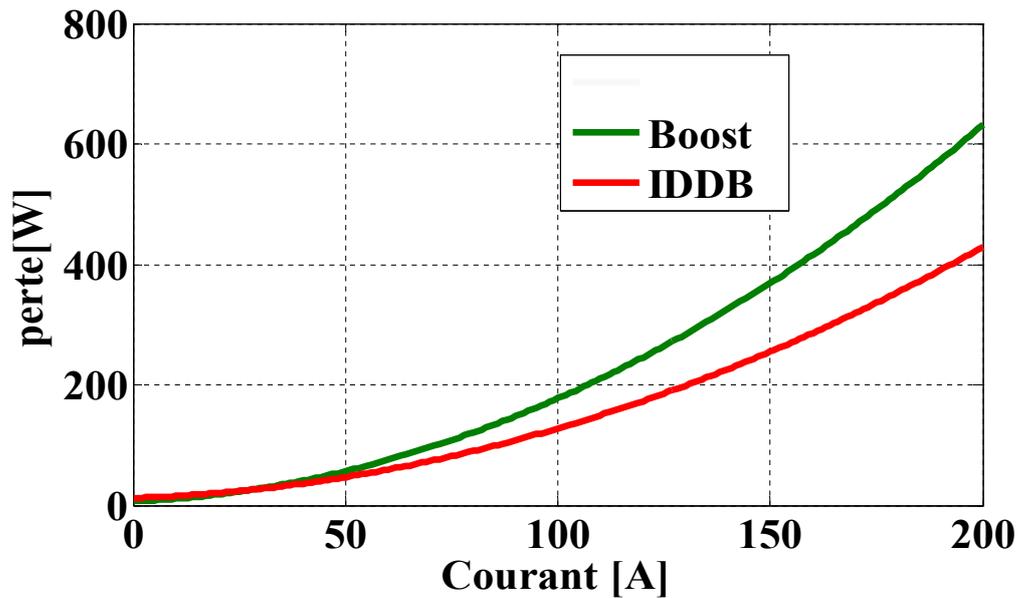


Figure II-3: Pertes des convertisseurs cas 1

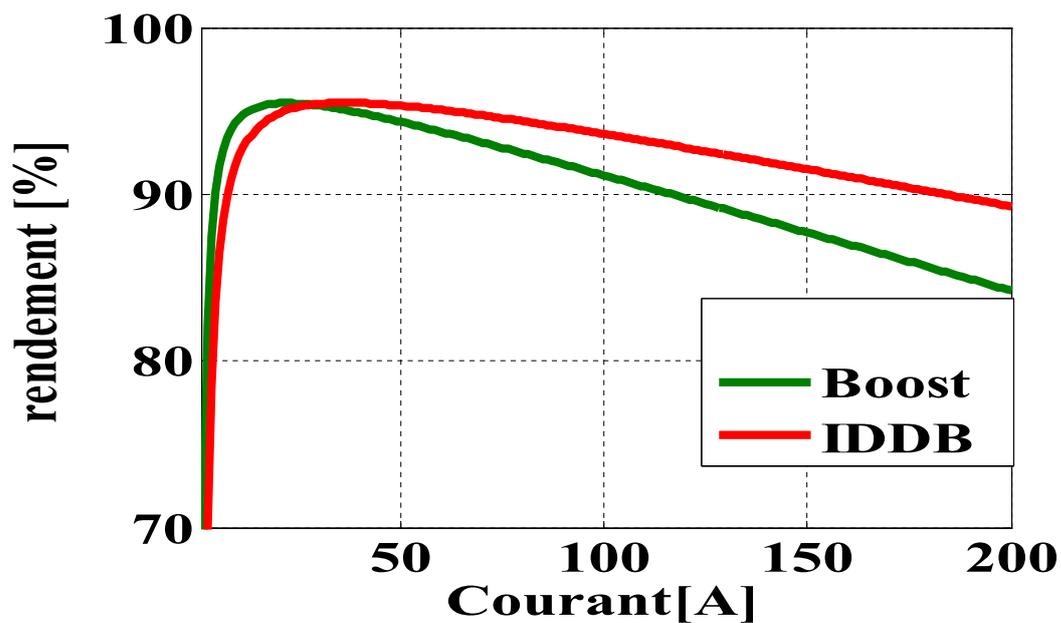


Figure II-4 : rendement des convertisseurs cas 1

D'après les courbes, on remarque que la structure « IDDB » possède le moins de pertes et le meilleur rendement que la structure IDDB» avec tension de sortie égale à 150 v

Le Deuxième cas, la tension d'entrée est égale à 150 v et la tension de sortie est égale à 450 v

Les courbes de simulation des pertes et le rendement des deux structures en fonction du courant avec une tension de sortie=450 V sont représentées dans les figure :

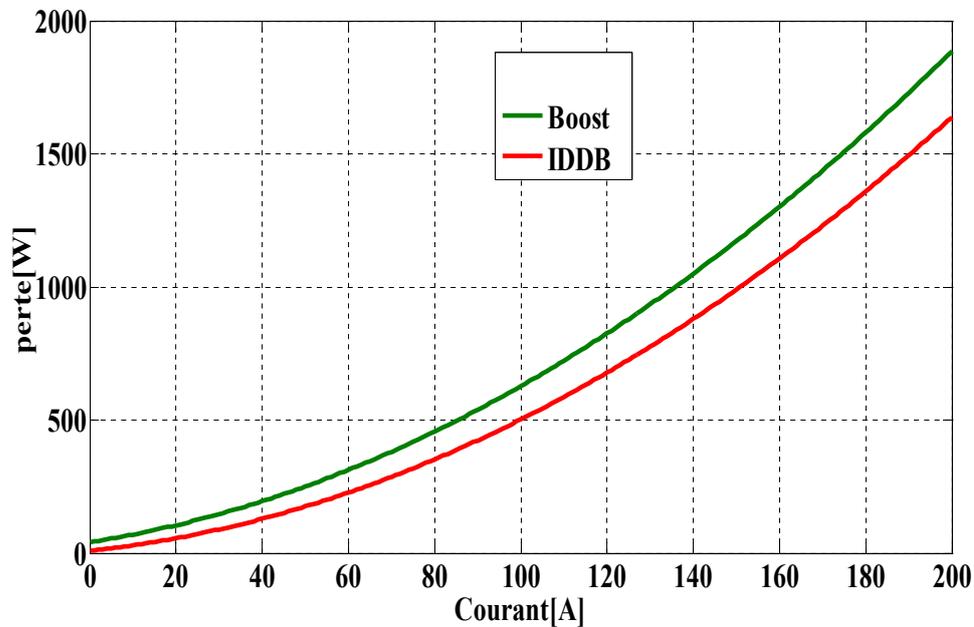


Figure II-5: Pertes des convertisseurs cas 2

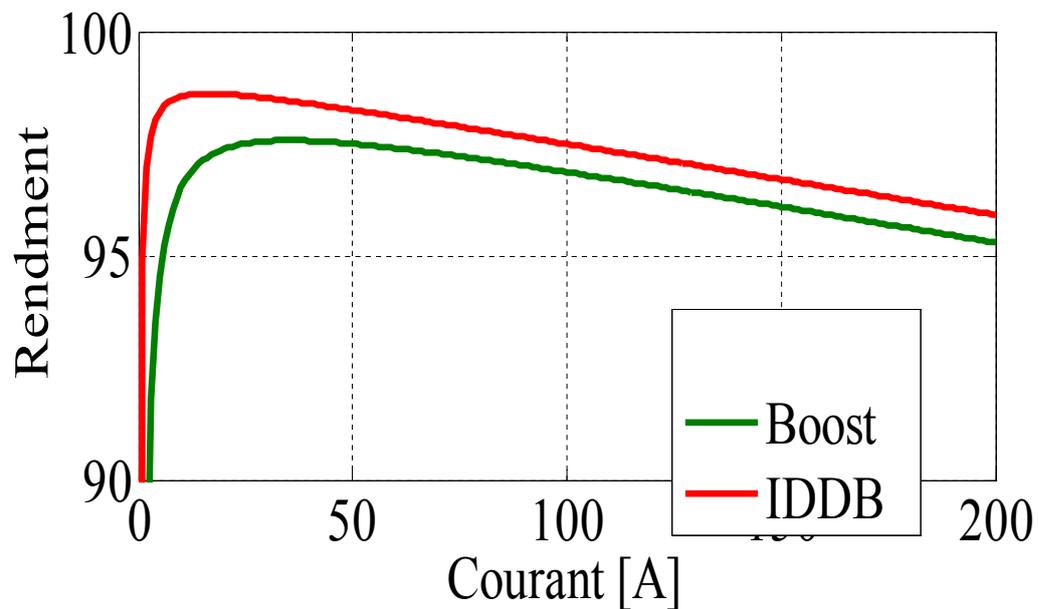


Figure II-6:rendement des convertisseurs cas 2

L'évolution des pertes des deux structures en fonction du courant est représentée sur la **Figure II-5**. Nous observons que les pertes dans la structure IDDB est moins que le BOOST classique.

D'après les courbes, on remarque que la structure « IDDB » elle aussi possède moins de un meilleur rendement que la structure « BOOST » avec tension de sortie égale à 450 v

Selon les comparaisons précédentes, il en résulte que la structure à IDDB a Moins de pertes que la structure BOOST classique quel que soit le niveau de tension d'entrée et de sortie.

III-7- Conclusion :

La structure l'IDD BOOST, permet de résoudre le problème du fort courant et durés fort rapport de tension en diminuant de façon notable le rapport de conversion des tensions par rapport que le BOOST classique.

**conclusion
générale**

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était de présenter une étude de performance d'une structure de convertisseur basse tension continu-continu, qui est utilisée pour l'interface entre une source de type pile à combustible et un bus DC moyenne tension.

Après avoir présenté les généralités sur les piles à combustibles dans le premier chapitre, une description sur les convertisseurs basse tension isolé et non-isolé pour les applications pile à combustible a été présentée. Afin de réaliser une comparaison selon les performances entre deux convertisseurs, le IDDB et le BOOST classique. Les résultats de comparaison entre les deux structures sous MATLAB ont montré que l'IDDB représente des hautes performances quel que soit le niveau de tension par rapport au BOOST classique.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Boudellal, Méziane ,«La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications», Dunod ,2007.
- [2] CANDUSSO, Denis. «*Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport*» Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan , 2013.
- [3] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance Complexe d'une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré-Nancy1, 2009
- [4] LACHICHI, Amel, « *Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant- Application aux convertisseurs pour pile à combustible* », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2005.
- [5] W. VIELSTICH, Handbook of fuel cells. Fundamentals, Technology and Applications,
- [6] K. KORDESCH et G. SIMADER, Fuel Cells and Their Applications, ed VCH, Fuel Cell Handbook (5ième édition) EG&G services, Parson, Inc. Science Applications, International Corporation (CD ROM). 1996
- [7] M.ZANDI, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [8] R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congres on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [9].W.MABROUK(2012) : *Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes protoniques. Applications en pile à combustible à membrane échangeuse de protons*, thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis.
- [10] Lefèvre, Guillaume, « *Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible* » thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble ,2004.
- [11] B.WAHDAME, « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [12]. DANA-MARIA PACLISAN(2013) : *optimisation par la modélisation de l'expérimentation vibratoire des systèmes pile a combustible pour le transport terrestre*, thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
-

-
- [13]. H.MAHCENE(2012) : *Etude des causes d'augmentation de la température dans une pile à oxyde solide (SOFC): Etude bidimensionnelle du champ de température*, thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [14]. S. BELKACEM BOUZIDA (2011) : *Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile à combustible de type PEMFC*, thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar, Batna.
- [15]. A.HADDAD(2009) : *Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique*, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard.
- [16]. EL-HASSANE AGLZIM (2009) : *Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité –*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [17]. E.FRAPPÉ (2012) : *Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW*, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.
- [18]. Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR (2014) : *Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC*, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [19].N.MEDDOUR (2010) : *simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide*, thèse de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [20].F.BREQUE(2008) : *modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile*, thèse de doctorat, l'Université du Québec A Trois-Rivières.
- [21].A.BRANGER, M.RICHER et S.ROUSTEL (2007) :*Livre de Microbiochimie et alimentation* , Editeur scientifique, Dijon : Éducagri éd., impr. 2007, cop. 2007.
- [22] Hazem, Z. E. (2017). Réalisation d'une alimentation variable SEPIC avec régulation de tension et protection contre surcharge
- [23] Delamare, G(2015) *Convertisseurs DC/DC à base de HFETsGaN pour applications spatiales* (Doctoral dissertation, INP Toulouse).
- [24] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, 2ed. : Kluwer academic publishers, 2001.
-

-
- [25] S.-J. Jang, T.-W. Lee, K.-S. Kang, S.-S. Kim, C.-Y. Won, "A new active clamp sepic-flyback converter for a fuel cell generation system", IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON), pp. 2538–2542, 6-10 Nov. 2005.
- [26] W. Li, L. Fan, Y. Zhao, "High-step-up and high-efficiency fuel-cell power-generation system with active-clamp flyback-forward converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 1, pp. 599–610, Jan. 2012.
- [27] G. Spiazzi, P. Mattavelli, J. R. Gazoli, R. Magalha, G. Frattini, "High step-up flyback converter with active clamp and voltage multiplier", IEEE Industrial Technology Conference (ICIT), pp. 1169–1174, 14-17 Mar. 2010.
- [28] E. H. Kim, B.-H. Kwon, "High step-up resonant push-pull converter with high efficiency", IET Power Electronics, vol. 2, no. 1, pp. 79–89, 2008.
- [29] J. -M. Kwon, E.-H. Kim, K.-H. Nam, "High-efficiency fuel cell power conditioning system with input current ripple reduction", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, pp. 826–834, Mar. 2009.
- [30] M. Kabalo, B. Blunier, D. Bouquain and A. Miraoui, "State-of-the-art of DC–DC converters for fuel cell vehicles," Vehicle Power and Propulsion Conf, Lille, pp. 1–6, 2010.
- [31] M. PHATTANASAK, "Etude, modélisation, et mise en oeuvre de convertisseurs DC-DC isolés multiport et modulaires," thèse de doctorat en génie électrique, Université de Lorraine, 2012.
- [32] Bin Huang. Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. Français. NNT : 2009INPL021N. tel-01748756
- [33] Damien GUILBERT Tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques à pile à combustible
Soutenue le 01/12/2014
- [34] DANG Bang Viet Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible Dans le cadre de l'école doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication, Signal »
- [35] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, A. Djerdir, "Energy Efficiency and Fault Tolerance Comparison of DC/DC Converters Topologies for Fuel Cell Electric Vehicles", in: *Proceedings of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC'13)*, Dearborn, USA, June 2013, pp. 1-7
- [36] D. Guilbert, "Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à
-

combustible”, in : *Procédions of Conférence des jeunes chercheurs en génie électrique (JCGE'14)*, 4-5 Juin 2014, Saint-Louis, France.

[37] SLAMA.F(2018). Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique (Doctoral dissertation).

[38] R. D. Doncker, D. M. Devan, M. H. Kheraluwala, “A Three-phase softswitched high-power-density dc/dc converter for high power application”, *IEEE Transaction on, Industry Applications*, vol.27, no. 1, pp. 63–73, Jan./Feb. 1991.

[39] D. K. Choi, B. K. Lee, S. W. Choi, C. Y. Won, D. W. Yoo, “A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid systems”, *Journal of power sources*, vol. 152, pp. 245–255, 2005.

[40] M. Mohr, F.W. Fuchs, “Clamping for current-fed de/dc converters with recovery of clamping energy in fuel cell inverter systems”, *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp.1–10, 2-5 Sep. 2007.

[41] A. Averberg, K. R. Meyer, A. Martens, “Current-fed full bridge converter for fuel cell systems”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 866–872, 15-19 Jun. 2008.

[42] X. Kong, A. M. Khambadkone, “Analysis and implementation of a high efficiency, interleaved current-fed full bridge converter for fuel cell system”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 543–550, Mar. 2007.

[43] M. Nym, M. A. E. Andersen, “High efficiency isolated boost dc-dc converter for high-power low-voltage fuel-cell application”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 505–514, Feb. 2010.
