

Architecture électrique de sortie pour générateur pile à combustible de forte puissance

Emmanuel FRAPPÉ¹, Alexandre DE BERNARDINIS¹, Olivier BÉTHOUX²,

Claude MARCHAND², et Gérard COQUERY¹

¹ IFSTTAR LTN, ² LGEP CNRS

¹ 25, allée des Marronniers - 78000 Versailles-Satory, ² 11, rue Joliot Curie - 91192 Gif sur Yvette
¹emmanuel.frappe@ifsttar.fr, ¹alexandre.de-bernardinis@ifsttar.fr, ²olivier.bethoux@lgep.supelec.fr

RÉSUMÉ – Dans un objectif de montée en puissance pour des applications de transport ou auxiliaires de traction, de longs empilements de pile à combustible peuvent être soumis à des disparités (fluidiques, température) et être le siège de possibles défaillances. Couplé à une méthode de détection de défauts, le convertisseur associé au générateur pile à combustible peut alors agir en fonction. Cet article présente des topologies candidates de convertisseur pour une pile segmentée en 3 parties. Chaque segment de pile peut alors être contrôlé indépendamment en fonction de son état de santé. Le convertisseur devra avoir une topologie simplifiée et une efficacité énergétique importante.

ABSTRACT – In the objective of power increase for transport application or on-board auxiliaries system, long FC stacks may be subject to disparities (fluidics, temperature) and can be the cause of possible failures. With the help of a fault detection strategy, power converter associated with the fuel cell can act to mitigate it. This article is about power converter topologies for a 3 parts segmented PEM fuel cell. Each FC segment can be controlled independently according to its state of health. The converter topology has to be simple with a high efficiency.

MOTS-CLÉS – PEMFC, pile à combustible segmentée, convertisseurs, action correctrice.

1. Introduction

Le véhicule électrique est un moyen de transport respectueux de l'environnement dans le sens où il dispose d'une énergie « localement » propre. Un générateur électrique possible est la pile à combustible (PàC) de technologie PEMFC (Pile à membrane échangeuse de protons), elle doit alors être de puissance suffisante à la traction du véhicule.

La montée en puissance des piles se fait par de longs empilements de cellules (>100) ainsi que par une augmentation de leur surface active. Néanmoins l'augmentation du nombre de cellule est limité par des contraintes de tenue mécanique et d'étanchéité des cellules [1]. De plus un trop grand nombre de cellules ou une surface active trop importante rend la gestion fluidique de la pile difficile, ainsi des disparités dans l'alimentation des gaz peuvent apparaître au sein même d'une cellule [2], [3] où entre ces dernières [4-6]. Il en résulte une non uniformité entre les tensions de cellules [7] et une possible apparition de défauts de type noyage ou assèchement [8], [9]. De ce fait, l'utilisation de plusieurs piles permet une augmentation de puissance tout en utilisant des piles de taille standard dont leur association et leur gestion sont plus aisées. On parle alors d'association multi-stack, déjà présentée dans [10], [11].

Par ailleurs, une disparité de température tout au long du stack fait que les noyages apparaissent principalement aux extrémités de la pile, où la température est plus faible, et les assèchements ont lieu plutôt au centre de la pile où la température est plus élevée [12-16]. Ainsi à l'apparition d'un défaut, qui ne peut toucher que quelques cellules seulement, une action correctrice doit être effectuée sur l'ensemble du stack y compris sur les cellules saines.

L'action la plus efficace consiste à modifier le débit d'air, pour cela le compresseur est plus sollicité ce qui a pour inconvénient d'augmenter les charges du circuit fluidique auxiliaire. Une autre approche peu explorée serait d'agir d'un point de vu électrique sur la pile. Sachant que l'eau produite dans la pile ainsi que la chaleur sont fonction du courant débité, une sollicitation moindre en puissance de la pile permettrait d'améliorer son état de santé. Le concept du multi-stack permet d'envisager des actions électriques sur les piles, telles un by-pass ou une action graduée comme le soulagement d'un des stacks en défaut [17]. L'association multi-stack comporte cependant un inconvénient, celui de

multiplier les circuits fluidiques, et par conséquent complexifier le système et augmenter l'encombrement. Dans un souci de simplification, et de minimisation de l'encombrement lié aux circuits fluidiques, une solution nous conduit à envisager des piles de plus grande taille. Afin de réduire le risque de disparité des tensions de cellules ou groupes de cellules, il est souhaitable de pouvoir agir sur des parties de la pile, ce qui nous amène à introduire le principe de segmentation. La pile est alors séparée électriquement en trois parties reproduisant virtuellement une association multi-stack série qui dispose d'un même circuit fluidique. Ceci permet alors d'agir indépendamment sur les extrémités de la pile ou sur le centre par l'ajout d'une interface de convertisseurs statiques dédiée ayant autant de convertisseurs que de ports d'entrée/sortie [18].

Du fait de la multiplication des convertisseurs, l'architecture électrique associée doit être simple (coût et fiabilité) et avoir une efficacité énergétique importante pour ne pas pénaliser le fonctionnement nominal. Par ailleurs, les choix technologiques (semi-conducteurs, transformateur, filtrage) seront déterminants quant à la viabilité de cette solution (efficacité, compacité, sûreté de fonctionnement).

Le plan de la communication est suivant. Dans un premier temps, une association multi-stack est comparée à une pile segmentée puis le cahier des charges de l'application est énoncé. Ensuite, nous discutons les intérêts respectifs du couplage alternatif (par le biais d'un transformateur multi-enroulement) et du couplage continu (en sortie de redresseur) pour le transfert de puissance. Pour le transfert de puissance par liaison DC, quatre topologies isolées seront étudiées. L'issue de cette étude comparative nous conduira à définir une architecture électrique de sortie et les moyens technologiques permettant sa réalisation.

2. Contexte et cahier des charges de l'application

2.1 Les principes du multi-stack et de la pile segmentée

Une PàC utilisée seule en tant que générateur ne permet qu'une action électrique limitée en cas d'apparition d'un défaut. C'est pourquoi une association multi-stack, qui permet une redondance de générateur de même qu'une action sur la pile en défaut, permet de concevoir un ensemble générateur PàC plus tolérant aux pannes. Dans cette configuration, chaque pile peut être indépendante : elles possèdent leur propre convertisseur et peuvent être alimentées par leur propre circuit de fluide (ce qui inclut les compresseurs d'air). Néanmoins cette possibilité est onéreuse du fait de la multiplication des composants de distribution fluide et occupe un certain volume/poids. C'est pourquoi dans beaucoup d'applications embarquées, les circuits de fluidiques sont mutualisés : on a un compresseur d'air pour alimenter l'ensemble des piles.

L'utilisation d'une seule pile permet de gagner encore plus en compacité, il n'y a alors qu'un seul circuit fluide. Le principe de la segmentation électrique de la pile permet alors d'agir sur des parties de la pile de façon similaire à une association multi-stack, mais ce concept nécessite une architecture de convertisseurs isolés. Une association multi-stack, une pile segmentée ainsi que les convertisseurs associés sont montrés en figure 1.

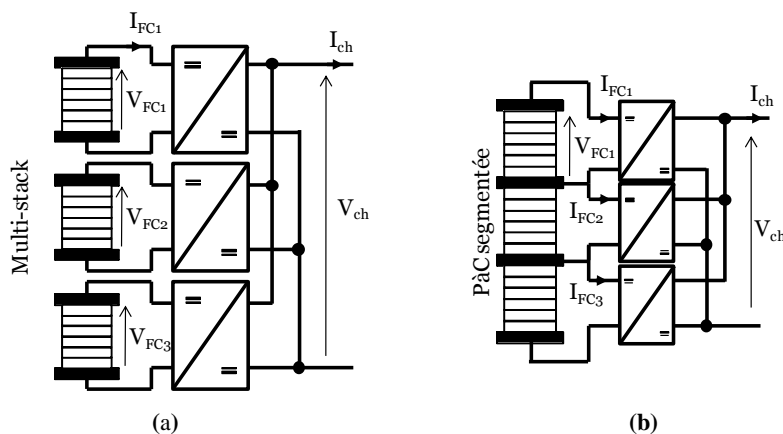


Figure 1 : Générateur PàC multi-stack (a), à pile segmentée (b)

2.2 Cahier des charges

Cette étude porte sur différents convertisseurs pouvant être utilisés sur une pile à combustible segmentée. La PàC est respectivement subdivisée en trois parties de 10kW, 200cm² de surface active, 100 cellules chacune. On a alors les caractéristiques d'entrées suivantes :

- Tension à vide : 100V.
- Tension à charge nominale : 60V pour un courant de 166A.

Le convertisseur doit donc être capable de réguler sa tension de sortie à 540VDC, valeur de tension standard dans les applications ferroviaires et véhicules utilitaires/lourds, pour une très grande dynamique de tension d'entrée.

L'ondulation de courant est un critère important au bon fonctionnement de la pile, Les auteurs montrent dans [19] qu'une oscillation de courant de 120Hz (harmoniques basse fréquence générés par des onduleurs) peut réduire la puissance fournie par la pile jusqu'à presque 6% de sa puissance nominale. A l'inverse, Fontes [20] montre que des oscillations de courant à haute fréquence (>10kHz) sont filtrées par la capacité de double couche et ont peu d'influence sur le fonctionnement du stack. Néanmoins il est fréquent pour une pile à combustible de limiter les ondulations à 10% du courant nominal.

Les segments de pile ne comportent pas d'isolation entre eux, il est alors impératif d'utiliser des convertisseurs isolés. De plus, il est important de minimiser le nombre d'interrupteurs semi-conducteurs en série. En effet, la tension d'une cellule en fonctionnement vaut au plus 1V, il est alors primordial de minimiser les chutes de tensions directes dans les interrupteurs de puissance qui sont supérieures à une tension de cellule. Pour cela l'emploi de semi-conducteur du type MOSFET de puissance est préférable. Par ailleurs, les niveaux de tension d'entrée (générateurs PàC) privilégient également la technologie MOSFET.

3. Étude comparative du transfert de puissance

Le transfert de puissance entre les différents segments de pile peut se faire via deux types de liaisons : une liaison AC ou une liaison DC. La liaison AC a l'avantage d'autoriser des transferts de puissance directement au sein du transformateur, grâce à l'utilisation d'un transformateur multi-enroulement. La liaison DC impose que chaque convertisseur soit de la forme "onduleur-isolation-redresseur", mais permet de régler plus facilement la puissance entre les différents segments grâce au nœud DC. L'étude qui suit se focalise sur un sous-ensemble convertisseur associé à un segment de pile.

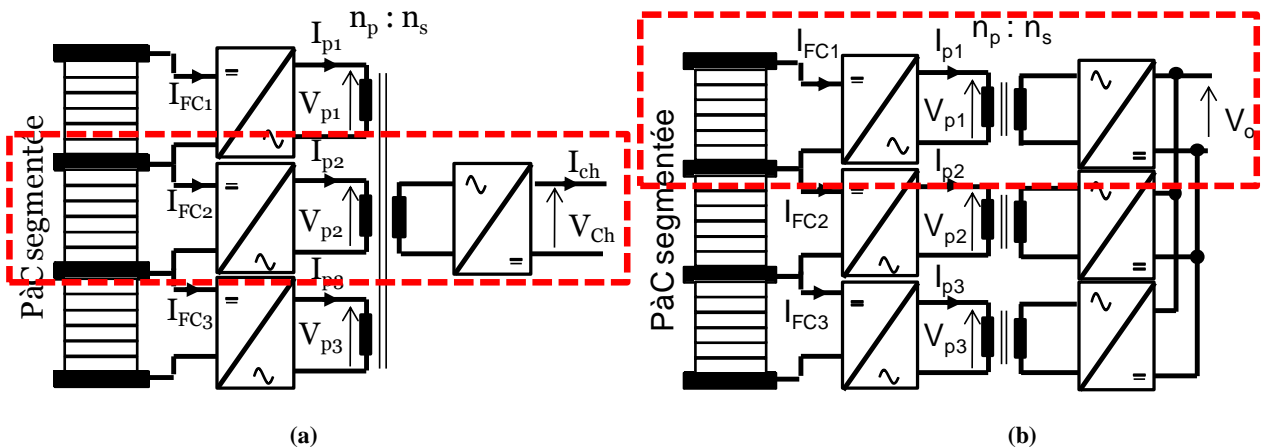


Figure 2 : Liaison AC (a) ou liaison DC (b)

3.1 Transfert de puissance par liaison AC

Une isolation étant requise par le choix d'une segmentation du générateur PàC, une première étude a porté sur la liaison AC. De nombreux auteurs ont publiés des travaux sur cette approche [18], [21-24]. Chaque port du transformateur multi-enroulement est connecté à un onduleur de tension qui délivre une tension rectangulaire (-V, 0, +V). Le transfert de puissance entre 2 ports s'effectue grâce à un déphasage entre les tensions, les inductances de fuites et la fréquence de découpage interviennent également dans ce transfert (Figure 3). Cette topologie permet un réglage efficace de la puissance entre les différents ports.

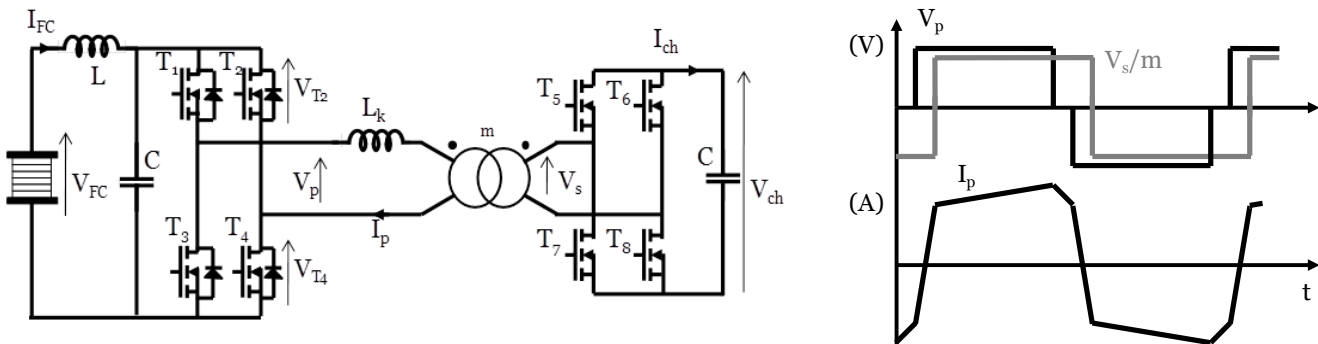


Figure 3 : Schéma du convertisseur et formes d'ondes de courant / tension dans l'inductance de fuite L_k

Cependant cette topologie n'est optimale que lorsque les tensions V_p et V_s/m sont de même amplitude ainsi en l'absence de déphasage aucun courant ne circule dans l'inductance de fuite. Elle est donc très sensible aux variations de tension

d'entrée qui vont engendrer une composante réactive qui peut être importante au sein du nœud AC. De plus, du fait de sa structure d'onduleur de tension, il y a la présence d'une forte composante alternative qui peut se retrouver sur la pile. L'utilisation d'un filtre en entrée est alors impératif ce qui va augmenter l'encombrement du convertisseur. Ainsi en l'état, son utilisation pour cette application n'est pas recommandée du fait des caractéristiques électriques de la pile. C'est pourquoi un autre type de liaison est étudié.

3.2 Transfert de puissance par liaison DC

Nous nous intéressons donc pour la suite de l'article au transfert de puissance par une liaison continue. Le point de départ de l'étude est le convertisseur boost qui offre un nombre réduit d'interrupteurs commandés ainsi qu'un très haut rendement tout en réduisant les contraintes en courant grâce à la technique de l'entrelacement. De plus, une topologie de type boost permet de contrôler directement le courant d'entrée, ainsi des rampes maximales de courant peuvent être imposées et les oscillations de courant limitées grâce à l'inductance. Elle est donc bien adaptée à la pile à combustible.

3.2.1 Le boost isolé

Le boost isolé est conçu à partir d'un boost entrelacé à 2 bras sur lequel s'ajoute une isolation galvanique par transformateur entre les selfs-transistor et les diodes [25] (Figure 4). Les commandes des interrupteurs sont identiques et déphasées de π . Son rapport de transformation correspond à celui du boost avec en plus le rapport d'élévation du transformateur $V_{ch} = \frac{m}{1-\alpha} V_{FC}$. De par sa conception un fonctionnement à rapport cyclique inférieur à 0.5 est interdit, ce qui implique que la tension aux bornes des interrupteurs vaut au minimum $V_{FC} \times 2 = 200V$. Les contraintes sur les interrupteurs, avec un transformateur de rapport $m=2.5$, des inductances $L1=L2= 165\mu H$, et une fréquence de hachage $f=10kHz$ sont :

$$V_{T_{max}} = \frac{V_{ch}}{m} = 216V \quad (1)$$

$$I_{T_{max}} = I_{FC} + \frac{(2-\alpha)V_s(1-\alpha)}{2mL_1f} = 168A \quad (2)$$

$$V_D = V_{ch} = 540V \quad (3)$$

$$I_{D_{max}} = \frac{I_{FC}}{2m} + (1-\alpha)^2 \frac{V_s}{2m^2L_1f} = 37A \quad (4)$$

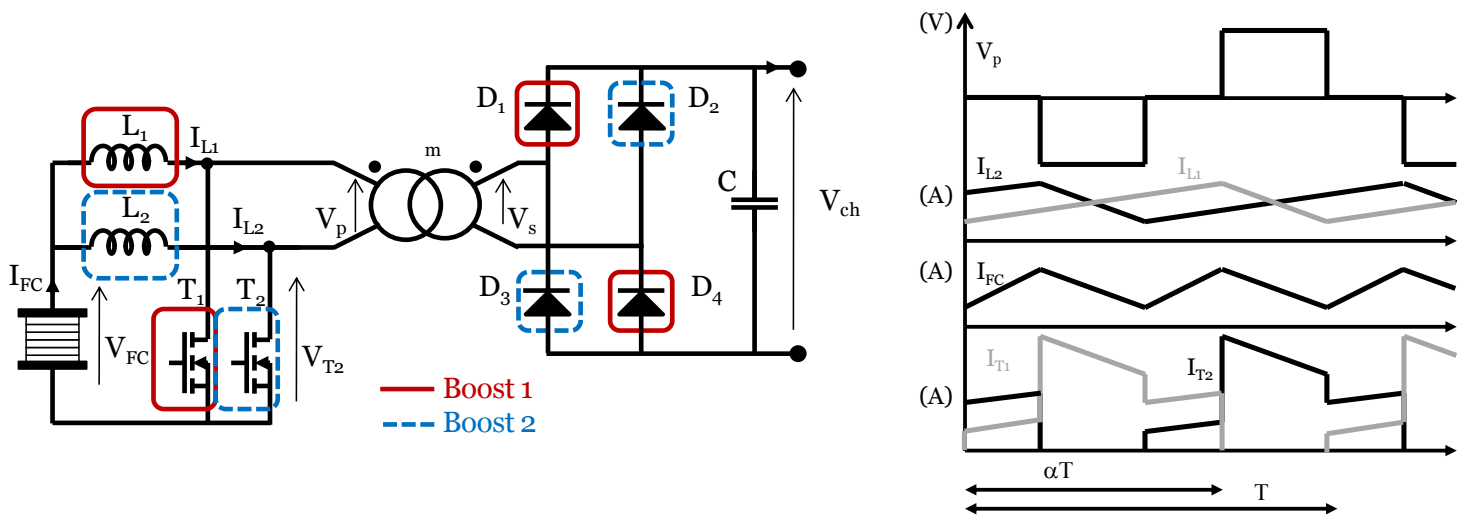


Figure 4 : Le boost isolé (demi-pont) et formes d'ondes associées

Les inconvénients de cette structure sont l'impossibilité à fonctionner avec un rapport cyclique inférieur à 0.5, ce qui implique une tension aux bornes des transistors assez élevée. Ainsi le choix des composants est limité à un nombre réduit de composants tolérant cette gamme de tension. C'est pourquoi une autre topologie de boost isolé est étudiée. Cette topologie doit permettre de réduire la contrainte en tension sur les interrupteurs situés au primaire.

3.2.2 Le boost isolé à pont complet

Une structure boost isolée à pont complet est donnée dans [26] (Figure 5). La commande des interrupteurs est identique à la topologie précédente et son rapport de transformation vaut :

$$V_{ch} = \frac{m}{1-D} V_{FC} \quad (5)$$

avec D le rapport cyclique vu par l'inductance d'entrée. $D = 2\alpha - 1$ avec α le rapport cyclique de la commande des interrupteurs. Ainsi, bien que α doit ici aussi, toujours être supérieur à 0.5, vu par l'inductance d'entrée le boost fonctionne avec un rapport cyclique D allant de 0 à 1. On peut donc utiliser le boost sur toute sa plage de fonctionnement et non la moitié comme précédemment. La contrainte en tension sur les interrupteurs est donc divisée par deux. Avec un transformateur de rapport $m=5$, une inductance $L=86\mu\text{H}$, elles deviennent :

$$V_{T_{\max}} = \frac{V_{ch}}{m} = 110\text{V} \quad (6)$$

$$I_{T_{\max}} = I_{FC} + \frac{(2\alpha - 1)V_s(1 - \alpha)}{m L f_{hach}} = 180\text{A} \quad (7)$$

$$V_D = V_{ch} = 540\text{V} \quad (8)$$

$$I_{D_{\max}} = \frac{I_{FC}}{m} + (1 - \alpha)^2 \frac{2V_s}{m^2 L f_{hach}} = 37\text{A} \quad (9)$$

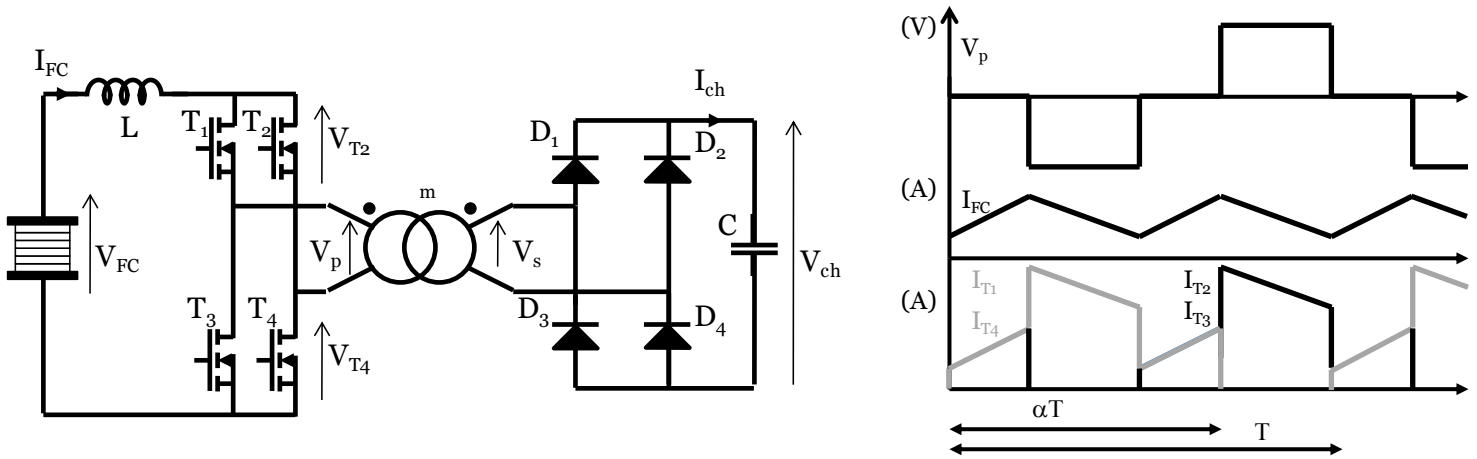


Figure 5 : Le boost isolé à pont complet et ses formes d'ondes

Cependant, ces deux topologies à commutation dure nécessitent, à cause de l'inductance de fuite du transformateur, un circuit d'écrêtage lors de l'ouverture des interrupteurs. Ce circuit d'écrêtage peut être actif par l'ajout d'une capacité et d'un interrupteur [27] ou passif par l'ajout d'une diode, d'une capacité et d'une résistance [28]. Néanmoins dans les deux cas, les pertes du convertisseur sont augmentées. Une autre possibilité d'écrêtage est d'utiliser les MOSFET en avalanche, l'énergie de l'inductance de fuite est alors déchargée dans les interrupteurs et aucun élément supplémentaire n'est requis [26]. Pour utiliser les MOSFET en avalanche, il faut s'assurer que l'inductance de fuite du transformateur soit la plus faible possible et le dimensionnement des refroidisseurs doit être fait en prenant en compte ce fonctionnement qui est sévère pour les interrupteurs. C'est néanmoins la solution retenue pour l'étude.

Pour s'assurer de minimiser au maximum les pertes du convertisseur, une troisième topologie est étudiée. Elle met en œuvre un fonctionnement à commutation douce afin de minimiser les pertes par commutations.

3.2.3 Le boost isolé résonant

Cette topologie résonante est présentée par [29-32] (Figure 6). Une capacité est ajoutée afin de constituer un circuit résonant avec l'inductance de fuite L_k , de ce fait cette structure n'est plus sujette aux pics de tension dus à l'ouverture des interrupteurs. Le circuit résonant permet d'obtenir un fonctionnement en commutation à zéro de courant (ZCS).

La commande du convertisseur se fait maintenant en fréquence avec $V_{ch} = \frac{m}{1 - \frac{f}{f_r}} V_{FC}$.

Cette relation montre que la plage de la commande en fréquence du convertisseur évolue fortement lorsque la tension de pile V_{FC} varie. Ainsi pour une tension de sortie fixe et une tension d'entrée évoluant de V_{FC} à $V_{FC}/2$, la fréquence de commande est multipliée par 2.5. Il faut alors s'assurer que le fonctionnement en ZCS est garanti sur l'ensemble de la plage de fonctionnement du convertisseur. La fréquence de fonctionnement du convertisseur est choisie entre 20kHz pour un courant nul et 45kHz pour le courant maximal, de ce fait $L_k = 1.62\mu\text{H}$ et $C_p = 2.61\mu\text{F}$.

Les contraintes sur les interrupteurs, avec un transformateur de rapport $m=4$, une inductance $L = 38\mu\text{H}$ sont :

$$V_{T \max} = \frac{V_{ch}}{m} = 135V \quad (10)$$

$$I_{T \max} = \frac{V_s}{m \sqrt{\frac{L_k}{C_p}}} = 170A \quad (11)$$

$$V_D = V_{ch} = 540V \quad (12)$$

$$I_{D \max} = \frac{I_{FC}}{m} = 40A \quad (13)$$

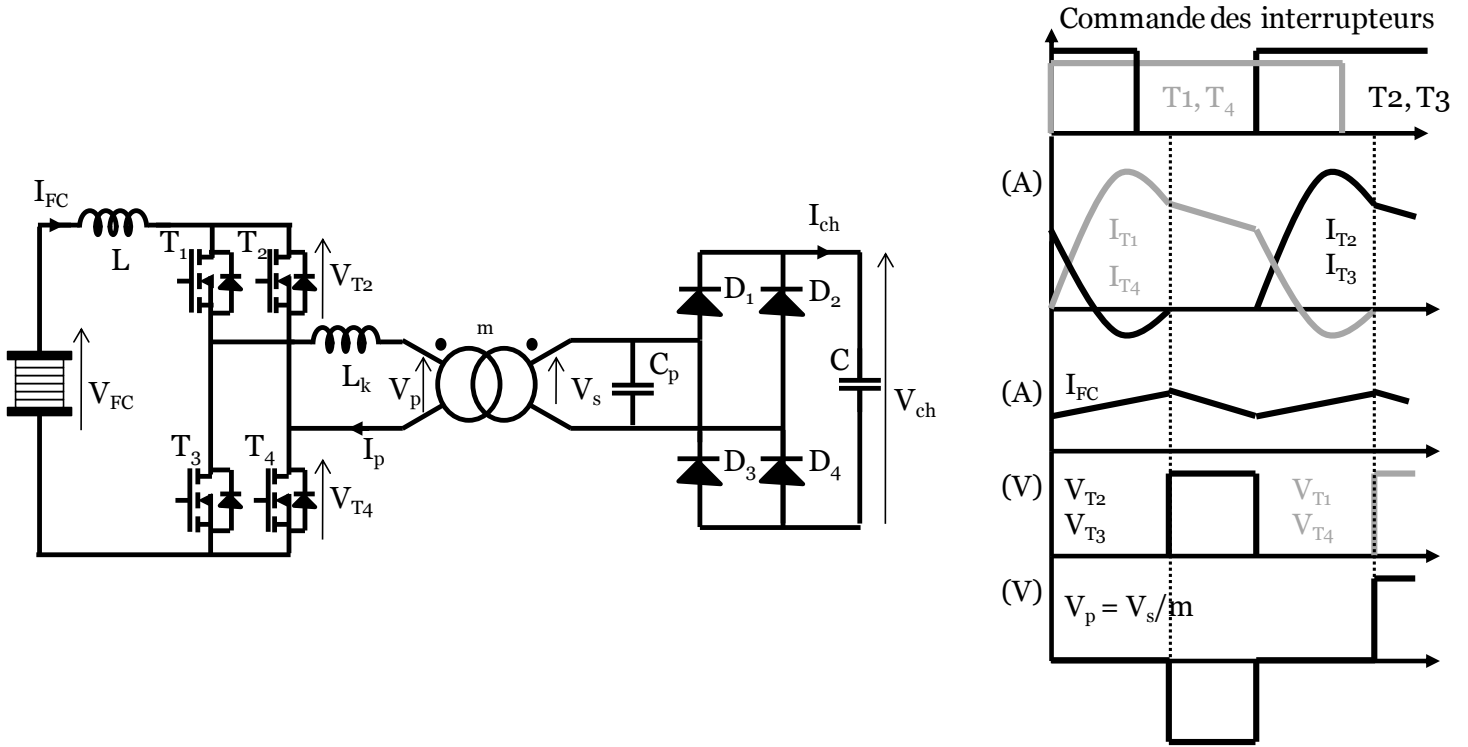


Figure 6 : Le boost isolé résonant et formes d'onde associées

3.2.4 L'onduleur à double résonance

Pour finir, une topologie d'onduleur de tension à double résonance [33], déjà étudiée à l'IFSTTAR LTN pour une application de chargeur de batterie pour le ferroviaire, est présentée [34] (Figure 7). Cette structure permet également un fonctionnement en ZCS, et est étudiée afin de la comparer avec la structure résonante précédente alimentée en courant. Le fonctionnement du convertisseur se fait entre deux fréquences : la fréquence minimale (ou anti-résonante) pour laquelle le convertisseur ne délivre pas de courant et la fréquence de résonance pour laquelle le courant est maximale. Il est alors possible de borner le fonctionnement du système entre ces deux fréquences caractéristiques. Néanmoins le rapport de transformation du transformateur est élevé avec cette structure ($m=11$). Les contraintes en courant sur les interrupteurs dépendent des paramètres résonants du convertisseur $L_s = 0.2\mu H$, $L_p = 4.2\mu H$, $C_p = 14.7\mu F$, $F_r = 83kHz$ et sont :

$$V_{T \max} = \frac{V_{ch}}{m} = 50V \quad (14)$$

$$I_{T \max} = I_{FC} + \frac{V_{ch}}{m Z_r} = 550A \quad (15)$$

$$\text{Avec } Z_r = \sqrt{\frac{L_s L_p \omega_r^2}{1 - L_p C_p \omega_r^2}}$$

$$V_D = V_{ch} = 540V \quad (16)$$

$$I_{D_{\max}} = \frac{I_{T_{\max}}}{m} = 50A$$

(17)

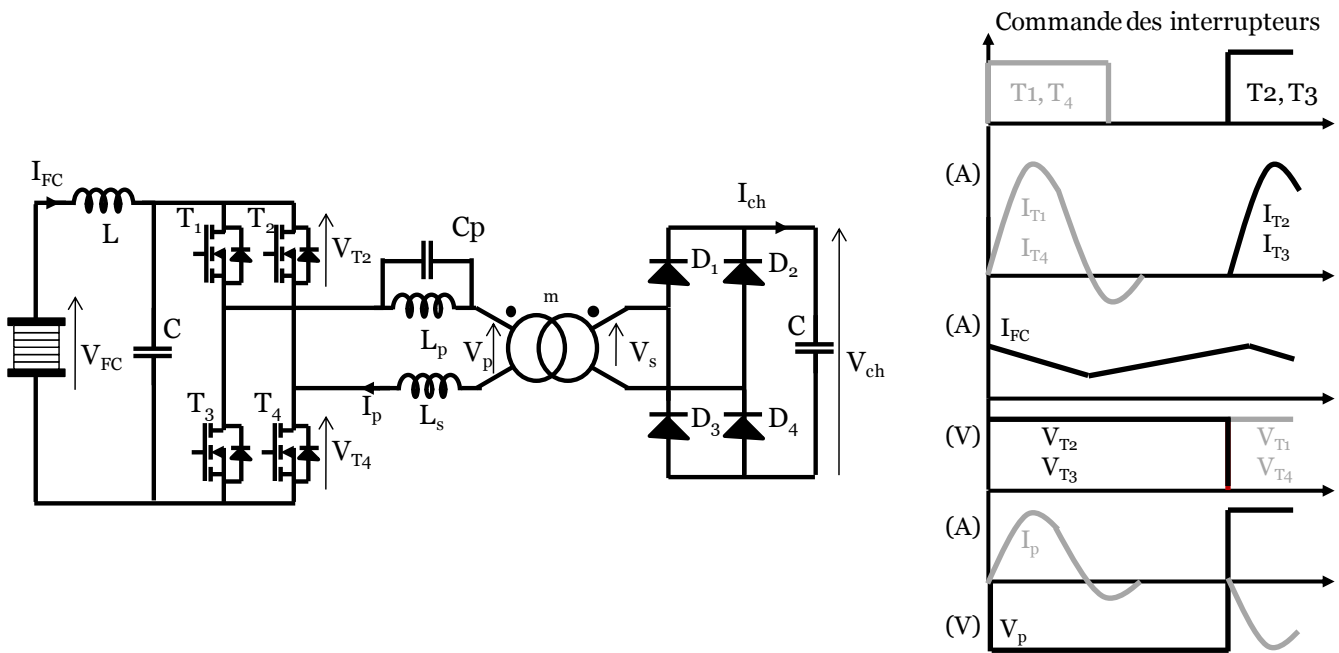


Figure 7 : L'onduleur à double résonance et formes d'ondes associées

3.3 Synthèse critique vers le choix d'une solution

Les différentes topologies présentées ont été simulées et comparées en termes de commande et d'efficacité énergétique. Les topologies à base de boost permettent de contrôler le courant d'entrée, et sont très adaptées pour un couplage avec une PaC. Les topologies à onduleur de tension ont un courant prélevé à la pile qui présente une forte composante alternative et peut devenir négative. Ceci impose d'y ajouter un filtre en entrée, cependant il y a toujours un risque de courant de pile négatif à faible puissance.

Le tableau suivant synthétise les différentes topologies présentées. Leurs nombres de composants, leurs principaux avantages et inconvénients y sont rassemblés.

Tableau 1. Comparaison des différentes topologies de convertisseurs

	Composants	Semi-conducteurs	Avantages	Inconvénients
Liaison AC				
Convertisseur commandé en déphasage	8 transistors 1 inductance 2 capacités		Gain de 2 redresseurs	Problème de réactif Très sensible à la tension d'entrée. Besoin de filtre en entrée
Liaison DC				
Boost isolé (demi-pont)	2 transistors 4 diodes 2 inductances 1 capacité	MOSFET : 2 « IXFN 130N30 » 300V-130A Diodes « DSEP2x91-06A » 600V-60A	Nombre réduit d'interrupteur	Besoin d'écrêtage Tension des interrupteurs au primaire assez élevée
Boost isolé à pont complet	4 transistors 4 diodes 1 inductance 1 capacité	MOSFET : 2 « IXFN 210N20P » 200V-188A Diodes « DSEP2x91-06A » 600V 60A	Réduction contrainte de tension des interrupteurs	Besoin d'écrêtage
Boost isolé résonant	4 transistors 4 diodes 1 inductance 2 capacités	MOSFET : 2 « IXFN 210N20P » 200V-188A Diodes « DSEP2x91-06A » 600V 60A	Fonctionnement en ZCS	Plage de fonctionnement en fréquence sensible à V_p
Onduleur à double résonance	4 transistors 4 diodes 3 inductances 3 capacités	MOSFET : 3 « IXFX 250N10P » 100V-250A Diodes « DSEP2x91-06A » 600V 60A	Fonctionnement en ZCS	Haut rapport d'élévation du transformateur Besoin de filtre en entrée

Les rendements des différents convertisseurs ont été calculés numériquement et sont présentés en figure 8.

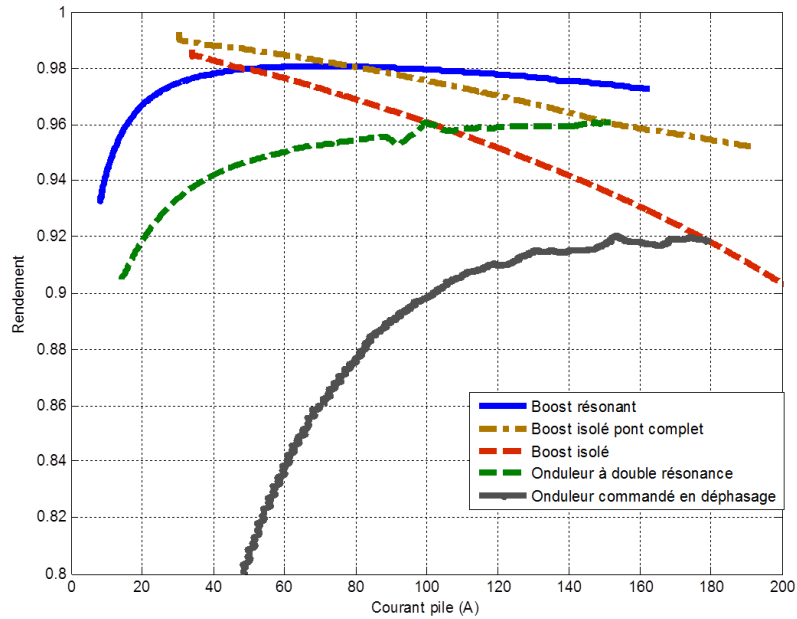


Figure 8 : Rendement des 5 structures de convertisseurs étudiées

Le boost isolé résonant offre les meilleures performances pour un courant supérieur à 80A contrairement aux topologies à commutation dure pour lesquelles le rendement chute rapidement. Elle a pour avantage de permettre un fonctionnement des interrupteurs moins sévère que les boost isolés qui fonctionnent en avalanche. De plus, elle est constituée d'autant de semi-conducteur que le boost à pont complet. Le circuit résonnant étant constitué de l'inductance de fuite du transformateur, seul l'ajout d'une capacité est nécessaire. Par conséquent, le boost isolé résonant est donc une topologie candidate pour le cahier des charges de l'application générateur PàC de puissance segmenté.

4. Architecture électrique de sortie et moyens technologiques associés

La topologie du boost isolée résonant est retenue pour réaliser l'ensemble convertisseur associé à la pile segmentée. Son schéma est représenté figure 9 (a) avec les mesures du courant de pile (I_{FC1}) et de la tension de sortie (V_{ch}). La régulation du convertisseur se fait par deux boucles imbriquées (Figure 9 (b)). La boucle extérieure, boucle de tension, est commune pour les trois convertisseurs associés à la pile segmentée. La consigne de courant est partagée aux trois convertisseurs qui ont leur propre boucle de régulation de courant.

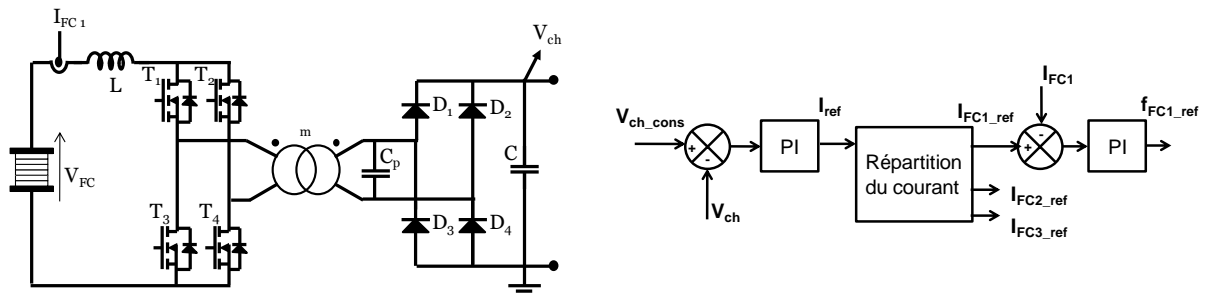


Figure 9 : Boost isolé résonant (a), synoptique de régulation (b)

L'utilisation à fréquence élevée (entre 20 et 45kHz) permet d'utiliser une technologie de transformateur « planar », elle a pour avantage de permettre des structures de transformateurs très compacts pour ces fréquences. Le transformateur est conçu sur mesure par la société Payton avec les caractéristiques souhaitées : puissance 10kW, tension primaire/secondaire de 135/540V, un courant primaire/secondaire de 170/40A et une inductance de fuite de 160μH.

La tension au primaire étant faible (135V) des interrupteurs MOSFET de la marque IXYS (IXFN210N20P) sont sélectionnés, ils offrent une faible résistance R_{dson} à l'état passant et une diode interne rapide.

Les capacités sélectionnées sont des condensateurs de puissance de la marque AVX, supportant une tension d'utilisation de 54V. Enfin l'inductance est conçue avec les caractéristiques suivantes : 38μH pour un courant maximal de 160A.

Les paramètres utiles au dimensionnement des éléments sont rappelés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Dimensionnement des composants

	contraintes	Choix de composants
Inductance d'entrée : L	38 μ H, 160A	
MOSFETS : T ₁ à T ₄	135V – 170A	2 MOSFET en parallèle « IXFN 210N20P » 200V-188A
Transformateur	135 – 540V, 170 – 40A, m = 4, 10kW	Transformateur planar technologie Payton planar magnetics
Capacité résonante : C _p	2.61 μ F, 540V – 40A _{max}	4 capacités en série FFV36C0136K 150V _{rms} – 25A _{rms}
Diodes de redressement : D ₁ à D ₄	540V – 40A	DSEP2x91-06A – 600V – 90A
Capacité du bus continu : C	50 μ F, 540V – 20A	FFG86K0586K – 600V – 44A – 56 μ F

5. Conclusion

La pile segmentée permet d'associer la compacité d'une pile seule avec les possibilités d'une association multi-stack. On perd cependant la possibilité d'agir séparément sur la fluidique des différents segments qui peut être compensée par une action électrique.

Le boost isolé résonant offre la meilleure efficacité énergétique parmi les topologies étudiées. Son fonctionnement à commutation douce permet de réduire la sollicitation des interrupteurs en annulant les pertes par commutation. L'efficacité énergétique est un critère important dans l'ensemble convertisseur proposé du fait de la présence d'un convertisseur par segment. Enfin chaque convertisseur est indépendant et peut agir sur le segment de pile associé.

Références

- [1] P. Lin, P. Zhou, and C. W. Wu, "A high efficient assembly technique for large PEMFC stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 381-390, Oct. 2009.
- [2] S. G. Kandlikar, Z. Lu, T. Y. Lin, D. Cooke, and M. Daino, "Uneven gas diffusion layer intrusion in gas channel arrays of proton exchange membrane fuel cell and its effects on flow distribution," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 328-337, Oct. 2009.
- [3] S. G. Kandlikar, Z. Lu, W. E. Domigan, a D. White, and M. W. Benedict, "Measurement of flow maldistribution in parallel channels and its application to ex-situ and in-situ experiments in PEMFC water management studies," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 7-8, pp. 1741-1752, Mar. 2009.
- [4] M. Miller and A. Bazylak, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell stack testing," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 2, pp. 601-613, Jan. 2011.
- [5] P. A. C. Chang, J. St-Pierre, J. Stumper, and B. Wetton, "Flow distribution in proton exchange membrane fuel cell stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 1, pp. 340-355, Nov. 2006.
- [6] R. Mustata, L. Valiño, F. Barreras, M. I. Gil, and A. Lozano, "Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, vol. 192, no. 1, pp. 185-189, Jul. 2009.
- [7] J. Park and X. Li, "Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 1, pp. 444-459, Nov. 2006.
- [8] X. Liu, H. Guo, F. Ye, and C. Ma, "Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 11, pp. 3607-3614, 2007.
- [9] F. Weng, a Su, and C. Hsu, "The study of the effect of gas stoichiometric flow rate on the channel flooding and performance in a transparent fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 666-676, May 2007.
- [10] A. De Bernardinis, M.-C. Péra, J. Garnier, D. Hissel, G. Coquery, and J.-M. Kauffmann, "Fuel cells multi-stack power architectures and experimental validation of 1kW parallel twin stack PEFC generator based on high frequency magnetic coupling dedicated to on board power unit," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 8, pp. 2367-2383, 2008.
- [11] B. Vulturescu, A. De Bernardinis, R. Lallemand, and G. Coquery, "Traction power converter for PEM fuel cell multi-stack generator used in urban transportation," *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, Sep. 2007.
- [12] J. Ramousse et al., "Local Voltage Degradations (Drying and Flooding) Analysis Through 3D Stack Thermal Modeling," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 7, no. 4, p. 041006, 2010.

- [13] A. Hernandez, R. Outbib, and D. Hissel, "Diagnostic d'une pile à combustible PEMFC. Une approche statistique," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 42, no. 10, pp. 1225-1277, 2008.
- [14] J. Jang, H. Chiu, W. Yan, and W. Sun, "Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 476-483, May 2008.
- [15] R. Eckl, W. Zehntner, C. Leu, and U. Wagner, "Experimental analysis of water management in a self-humidifying polymer electrolyte fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, vol. 138, no. 1-2, pp. 137-144, Nov. 2004.
- [16] W. H. Zhu, R. U. Payne, D. R. Cahela, and B. J. Tatarchuk, "Uniformity analysis at MEA and stack Levels for a Nexa PEM fuel cell system," *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 231-238, Apr. 2004.
- [17] E. Frappé, A. De Bernardinis, O. Béthoux, G. Coquery, and C. Marchand, "Corrective action with power converter for faulty multiple fuel cells generator used in transportation," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1-6.
- [18] E. Frappé, A. De Bernardinis, O. Bethoux, C. Marchand, and G. Coquery, "A Soft-Switching Multisource DC-DC Converter for Segmented PEM Fuel Cell Power Management in Vehicle Application," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011.
- [19] W. Choi, J. Howze, and P. Enjeti, "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current," *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 1324-1332, Aug. 2006.
- [20] G. Fontes, "Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques," Thèse de INP Toulouse, 2005.
- [21] S. Mariethoz and a Rufer, "Multisource DC-DC converter for the supply of hybrid multilevel converter," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, vol. 2, no. c, pp. 982-987, Oct. 2006.
- [22] N. Schibli, "DC-DC converters for two-quadrant operation with controlled output voltage," in *EPE 99*, 1999, pp. 1-7.
- [23] F. Krismer, S. Round, and J. Kolar, "Performance optimization of a high current dual active bridge with a wide operating voltage range," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE*, 2006, vol. pp, pp. 1-7.
- [24] C. Zhao, S. D. Round, and J. W. Kolar, "An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, Sep. 2008.
- [25] Y. Lembeye, V. D. Bang, G. Lefevre, and J.-P. Ferrieux, "Novel Half-Bridge Inductive DC-DC Isolated Converters for Fuel Cell Applications," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 203-210, Mar. 2009.
- [26] M. Nymand and M. A. E. Andersen, "High-Efficiency Isolated Boost DC-DC Converter for High-Power Low-Voltage Fuel-Cell Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 505-514, Feb. 2010.
- [27] A. Vazquez, C. Aguilar, and F. Canales, "Comparison between two-stage and integrated power conditioner architecture for fuel cell based power supply system," in *Power Electronics Congress, 2008. CIEP 2008. 11th IEEE International*, 2008, pp. 177-184.
- [28] K. Wang, C. Y. Lin, L. Zhu, D. Qu, F. C. Lee, and J. S. Lai, "Bi-directional DC to DC converters for fuel cell systems," in *Power Electronics in Transportation, 1998*, 1998, pp. 47-51.
- [29] H. Benqassmi, J.-P. Ferrieux, and J. Barbaroux, "Current-source resonant converter in power factor correction," in *PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.*, 1997, pp. 378-384.
- [30] J.-F. Chen, R.-Y. Chen, and T.-J. Liang, "Study and Implementation of a Single-Stage Current-Fed Boost PFC Converter With ZCS for High Voltage Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 379-386, Jan. 2008.
- [31] R. Y. Chen, R. L. Lin, T. J. Liang, J. F. Chen, and K. C. Tseng, "Current-fed full-bridge boost converter with zero current switching for high voltage applications," *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, pp. 2000-2006, 2005.
- [32] R.-Y. Chen, T.-J. Liang, J.-F. Chen, R.-L. Lin, and K.-C. Tseng, "Study and Implementation of a Current-Fed Full-Bridge Boost DC-DC Converter With Zero-Current Switching for High-Voltage Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 4, pp. 1218-1226, 2008.
- [33] V. Croulard, G.-W. Baptiste, and A. Durville, "Double resonance electronic converter," U.S. Patent 2003023151428-Apr-2003.
- [34] A. De Bernardinis, S. Butterbach, R. Lallemand, A. Jeunesse, G. Coquery, and P. Aubin, "Double resonant converter topology with fast switching semiconductors for lead-acid battery charger used in hybrid electric locomotive," in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011, pp. 239-244.