



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Electromécanique

Réf. : /

Présenté et soutenu par :
KAIDI Bilal

Le : lundi 27 juin 2022

Modélisation et simulation du système pile à combustible et convertisseur boost entrelacée à deux bras

Jury :

Pr	DENDOUGA Abdelhakim	Pr	Université de Biskra	Président
Dr	KRAA Okba	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	SAADI Aicha	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
Filière : Electromécanique
Electromécanique

Réf. : /

Modélisation et simulation du système pile à combustible et convertisseur boost entrelacée à deux bras

Le : lundi 27 juin 2022

Présenté par :

KAIDI Bilal

Avis favorable de l'encadreur :

KRAA Okba *signature*

Signature Avis favorable du Président du Jury

DENDOUGA Abdelhakim

Signature

Cachet et signature

Dédicaces

بعد بسم الله الرحمن الرحيم،

Je tiens à remercier toutes personnes qui ont contribué au succès de ce travail et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier mon cher encadreur de mémoire pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de biskra responsable de ma formation théorique je n'oublie pas

de remercier les membres de jures pour avoir me corrigé ce travail ainsi que mes parents pour leurs soutiens constant et leurs encouragements.

Merci

Remerciements

Tout d'abord je dois remercier Dieu qui m'a donné la santé et la volonté
durant la réalisation de ce présent mémoire.

Puis, je voudrai remercier mon prof **KRAA Okba** pour sa disponibilité,
ses précieux conseils et pour la confiance qu'il a mise en moi, qu'il
trouve ici .toute ma gratitude et surtout ma parfaite considération de
l'intérêt qu'elle porte à ce travail.

Je tiens également à adresser mes remerciements aux membres du jury
d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Merci

Résumé

Ce mémoire traite du problème de contrôle du convertisseur boost entrelacé de suralimentation pour la pile à combustible. Système de PaC-IBC.. Notre étude a fait le point sur les techniques de conversion DC- DC de l'énergie produite par le procédé de pile à combustible en utilisant la commande par régulateur PI et la modélisation mathématique de convertisseur boost entrelacé. En vue de mieux concevoir l'objectif de cette étude et rendre concret les résultats auxquels on a abouti, une étude a été faite sur des exemples de ces convertisseurs. Une simulation d'un convertisseur boost entrelacé a été élaborée avec variation d'un rapport cyclique pour une source constant et ensuit avec un ce système Pac-IBC.

L'objectif du contrôle est d'assurer :

- Stabilité asymptotique du système en boucle fermée.
- Régulation parfaite de la tension de sortie.
- Un bon partage de courant entre les modules.

Il est formellement montré, à l'aide d'un l'analyse théorique et les résultats de simulation que le contrôle proposé répond à tous les objectifs.

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة مشكلة التحكم في محول تعزيز الشاحن الفائق المتشابك لخلية الوقود. نظام PaC-IBC استعرضت دراستنا تقنيات تحويل DC-DC للطاقة الناتجة عن عملية خلية الوقود باستخدام التحكم في منظم PI والنمذجة الرياضية لمحول التعزيز المشذر. من أجل تصور هدف هذه الدراسة بشكل أفضل ولجعل النتائج التي قادها المرء ملموسة ، تم إجراء دراسة على أمثلة لهذه المحولات. تم تطوير محاكاة لمحول التعزيز المتشابك مع اختلاف دورة العمل لمصدر ثابت ثم مع نظام Pac-IBC هذا.

:الغرض من التحكم هو ضمان

- الاستقرار المقارب لنظام الحلقة المغلقة
- تنظيم مثالي لجهد الخرج
- مشاركة جيدة بين الوحدات الحالية

يتضح رسميًا ، باستخدام التحليل النظري ونتائج المحاكاة ، أن عنصر التحكم المقترح يلبي جميع الأهداف

Mots clés : Convertisseur DC-DC, Convertisseur boost entrelacé à deux bras, Pile à combustible,

Commande par régulateur PI.

Notations des symboles

i_L	<i>Courant de convertisseur</i>
V_s	<i>Tension de source</i>
V_0	<i>Tension de charge</i>
R	<i>Charge</i>
C	<i>Capacite</i>
D, d_1, d_2	<i>le rapport cyclique</i>
$D1; D2$	<i>diode</i>
$K1; K2$	<i>Intéreur</i>
$L1, L2$	<i>Inductance de bras</i>
R	<i>charge</i>
$u_1; u_2$	<i>Representation de $K1, K2$</i>
$d_1; d_2$	<i>Rapport cyclique</i>
Δi_L	<i>Ondulation de courant</i>
ΔV_0	<i>Ondulation de tension</i>
f_s	<i>Fréquence de commutaion.</i>
i_{in}	<i>Courant de ligne</i>
U_p	<i>Onde de porteuse</i>
k_p	<i>Gain proportienelle</i>
ϵ	<i>Coefficient d'amortissement</i>
k_i	<i>Gain intigrale</i>
P	<i>puissance</i>
T_n	<i>Période de commutation.</i>
k_{pv}	<i>Gain proportionnelle de tension</i>
K_{iv}	<i>Gain intigrale de tension</i>
ϵ_v	<i>Coefficient d'amortissement de tension</i>
K_{ii}	<i>Gain intigrale de courantr</i>
ϵ_i	<i>Coefficient d'amortissement de courant</i>
k_{pi}	<i>Gain proportionnelle de courant</i>
w	<i>Pulsation naturelle du système.</i>
r	<i>Résistance interne de la bobine.</i>
H	<i>Hydrogène</i>
O_2	<i>Oxygène</i>
H_2O	<i>Vapeur d'eau</i>
Q	<i>Chaleur</i>

Liste des figures

Figure	Page
--------	------

Fig.I.1 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.	6
Fig.I.2 : Différents types de convertisseurs statiques.	7
Fig.I.3 : Convertisseur Buck	8
Fig.I.4 : Convertisseur Buck-Boost.	8
Fig.I.5 : Convertisseur élévateur de tension(Boost	9
Fig.I.6 : Convertisseur Boost durant l'état on[7].	10
Fig.I.7: Convertisseur Boost durant l'état off.	10
Fig.I.8 : Transistor avec une source [8].	12
Fig.I.9 : Schéma de principe de conversion direct en électricité.	15
Fig.I.10 : Pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC).	16
Fig.II.1 : Topologies d'un convertisseur boost entrelacés [3].	22
Fig.II.2 : Schéma de boost entrelacée à 2 bras.	23
Fig.II.3 : Circuit équivalent pour le Mode 1 [16].	24
Fig.II.4 : Circuit équivalent pour le mode 2 [16].	25
Fig.II.5 : Circuit équivalent pour le mode 3[16].	25
Fig.II.6 : Circuit équivalent pour le mode 4[16].	26
Fig.II.7 : Schéma fonctionnel du courant d'entrée i_{L1} de l'inductance	29
Fig.II.8 : Schéma fonctionnel du courant d'entrée i_{L2} de l'inductance.	29
Fig.II.9 : Schéma fonctionnel de la tension de sortie.	30
Fig.II.10 : Simulation graphique d'IBC à 2 phases.	30
Fig.II.11 : Forme d'onde de la tension de sortie V_0 de l'IBC biphasé au rapport cyclique 50 %.	31
Fig.II.12 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L1}) à un rapport cyclique de 50 %.	31
Fig.II.13 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L2}) à un rapport cyclique de 50 %	32
Fig.II.14 : Les formes d'onde en régime permanent du courant d'inductance avec 180 Déphasage degré pour $D=0.5$.	32
Fig.II.15 : Forme d'onde de la tension de sortie de l'IBC biphasé pour le rapport cyclique 70%.	32

Fig.II.16 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L1}) à un rapport cyclique de 70%.	33
Fig.II.17 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L2}) à un rapport cyclique de 70 %.	33
Fig.II.18 : Les formes d'onde en régime permanent du courant d'inductance avec 180 Déphasage degré pour $D=0.7$.	33
Fig. (III.1): Principe de la modulation de largeur d'impulsion [17].	37
Fig. (III.2): Schéma global de la commande du convertisseur boost entrelacé à deux bras.	39
Fig. (III.3): Schéma de régulation du courant dans une bobine par un3 régulateur PI [3].	40
Fig. (III.4): Schéma de régulation de la tension par un PI.	41
Fig. (III.5) : Graphique de système IBC en MATLAB.	42
Fig.III.6 : Partie de commande PI en MATLAB	43
Fig. III.7 : Tension de sortie V_0 du convertisseur boost entrelacé lors d'un changement de référence.	44
Fig.III.8 : Tension de la pile à combustible V_s .	44
Fig.III.9 : Courants des bras du convertisseur boost entrelacé .	44
Fig.III.10 : Courant de la pile à combustible(i_{FC}).	45
Fig.III.11 : Courant de la charge(i_{ch}).	45
Fig.III.12 : Puissance de la pile à combustible.	45
Fig.III.13 : La puissance de la charge.	46
Fig.III.14 : Tension de sortie V_0 du convertisseur boost entrelacé lors d'une variation de la charge et changement de référence.	46
Fig.III.15 : Tension de la pile à combustible V_s d'une variation de la charge.	46
Fig.III.16 : Courants des bras du convertisseur boost entrelacé lors d'une variation de la charge	47
Fig.III.17: Courant de la pile à combustible pour charge variable (i_{FC}).	47
Fig.III.18 : Courant de la charge variable (i_{ch}).	47
Fig.III.19 : Puissance de la pile à combustible pour charge variable.	48
Fig.III.20 : La puissance de la charge variable.	48

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau II.1 : Paramétré de convertisseur.	28
Tableau II.2 : Valeur de point d'équilibre.	30
Tableau III.1 : Paramètre de l'IBC à 2bras	43
Tableau III.2 : paramètre de régulateur	43

Sommaire

<i>Thème</i>	<i>page</i>
<i>Dédicaces</i>	
<i>Remerciements</i>	
Résumé	
Notations des symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Sommaire	
Introduction général	2
Chapitre I Généralité sur les convertisseurs DC-DC et la pile à combustible	
I.1.Introduction	5
I.2.Le Convertisseur Statique	5
I.3. Types des convertisseurs statiques	6
I.3.1 Conversion continu-continu	7
I.3.2.Convertisseur dévolteur de tension(Buck)	7
I.3.3.Convertisseur élévateur de tension(Boost)	8
I.3.4.Convertisseur abaisseur- élévateur de tension, polarité opposée(Buck-Boost)	8
I.4. Principe de fonctionnement de convertisseur boost	8
I.4.1 Application de convertisseur boost	11
I.5.Transistor	11
I.5.1. La différence entre l'IGBT et le MOSFET	12
I.5.2. Présentation d'une MOSFET	13
I.6. La pile à combustible	13
I.6.1 Les différents types de pile à combustible	14

I.6.2 Pile à combustible à hydrogène	14
I.6.3 Présentation d'une pile à combustible	15
I.6.4 Principe de fonctionnement	16
I.7.Applications des piles à combustibles	17
I.8. Modèle électrique de la pile à combustible (PEMFC)	17
I.9. Conclusion	19
Chapitre II: Modélisation et simulation d'un convertisseur Boost entrelacé a 2 bras	
II.1 Introduction	21
II.2. Entrelacement des convertisseurs	21
II.2.1. Avantage de l'entrelacement	21
II.2.2. principe de technique d'entrelacement	22
II.3. Convertisseur Boost entrelacé	22
II.4. Domaine d'utilisation des convertisseurs boost	23
II.5. Les avantage d'un convertisseur boost entrelacée	23
II.6. Modélisation d'un convertisseur boost entrelacée à 2 bras	23
II.6.1.Modèle à fonction commutée	24
II.6.2. Équations d'état stationnaire du système	26
II.6.3. Sélection des paramètres	27
II.7. Simulation du convertisseur	28
II.7.1. Discussion des résultats	34
II.9. Conclusion	34
Chapitre III: Contrôle du convertisseur IBC à 2 bras alimenté par pile à combustible	
III.1. Introduction	36
III.2. Principe de fonctionnement de MLI	36

III.3. La commande classique par régulateur PI	37
III.3.1. Correcteur à action proportionnelle P	37
III.3.2 Correcteur à action intégral I	37
III.3.3. Correcteur à action proportionnelle intégral PI	38
III.4 Stratégies de commande	38
III.5. Commande du convertisseur boost entrelacé à deux bras	39
III.5.1. régulateur des courants des bras	40
III.5.2. régulateur de la tension de sortie du convertisseur boost entrelacé	41
III.6. Simulation du système PaC- IBC	42
III.6.1. Test de poursuite de tension de bus continu :	44
III.6.2. Test pour variation de la charge	46
III.7. Conclusion	49
Conclusion générale	51
Références Bibliographique	

Introduction général

Les piles à combustible ont été découvertes en 1839 par le scientifique William Grove, mais la découverte a été oubliée pour plusieurs raisons, notamment le manque de capacités financières, l'intérêt scientifique et le manque du besoin nécessaire en énergies technologiques [1].

Quant à aujourd'hui, surtout le dernier vingtième de l'éveil scientifique, les énergies renouvelables, ou on dit qui ne sont pas nocives pour l'environnement, sont devenues très importantes pour le côté humain. Les sources d'énergie renouvelables sont un domaine de recherche respectueux de l'environnement et intéressant en raison de l'atténuation des combustibles fossiles. Il existe de nombreuses sources d'énergie renouvelable telles que l'éolien, le photovoltaïque solaire et les piles à combustible. L'hydrogène peut être utilisé comme source d'énergie d'entrée à la pile à combustible pour générer de l'énergie électrique [2].

La pile à combustible est l'une des solutions prometteuses aux problèmes mentionnés, Alor l'utilisation d'une méthode efficace pour utiliser leur énergie à haut rendement du système, zéro émission de carbone et faible bruit sonore, il doit être facile de le convertir vers d'autres formes finales d'utilisation comme (électrique, mécanique, thermique et chimique). Pour l'heure, seul l'hydrogène peut prétendre répondre à ces critères.

En effet, bien que l'hydrogène sous la forme moléculaire n'existe quasiment pas dans la nature, l'atome d'hydrogène est extrêmement abondant sur notre terre. En réalité, la production d'hydrogène peut être envisagée par trois voies principales : oxydation des produits d'origine fossile (gaz naturel...), l'électrolyse de l'eau (par énergie éolienne et photovoltaïque ou bien énergie nucléaire...), production directe à partir de la biomasse ou par l'utilisation de bactéries [3].

Cela a attiré la participation de nombreux acteurs à travers le monde. Malgré des caractéristiques énergétiques et environnementales intéressantes ainsi que la diversité des technologies, la pile à combustible, comme les autres sources d'énergie non conventionnelles, n'est pas une bonne source d'électricité. En effet, ses propriétés électriques ne répondent généralement pas aux besoins de l'utilisateur car il a un faible de tension. C'est pourquoi nous utilisons un convertisseur boost entrelacée avec des leviers afin d'augmenter la tension des piles à combustible.

Un convertisseur continu-continu est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source de tension continue (pile à

combustible). Les convertisseurs continu-continu (DC-DC) sont devenus une composante essentielle dans les applications industrielles au cours de ces dernières décennies grâce à leurs rendements de plus en plus élevés, et coûts réduits.

Ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour les faibles niveaux de puissance. Les convertisseurs DC-DC ont un très grand domaine d'application. Ils sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, des périphériques informatiques et adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir des tensions continues. Pour réduire les ondulations des courants d'entrée et de sortie du convertisseur DC-DC on fait recours à la technique d'entrelacement. Cette structure consiste à mettre plusieurs convertisseurs de même type en parallèle et de décaler les signaux de commande les uns par rapport aux autres. Ici, nous nous retrouvons à parler du convertisseur boost entrelacé.

Ceci permet d'avoir des avantages importants en termes du niveau de puissance, le calibre des composants actifs et passifs, et aussi sur le rendement, et la qualité d'énergie de l'étage de conversion. Nous allons présenter, la modélisation du convertisseur boost entrelacé et la commande du système PaC- IBC et les différents régulateurs de base utilisés dans la commande PI appliquées au convertisseur avec une étude théorique. Pour le régulateur on va parler sur la synthèse de tension et de courant sa signification contrôlée par une boucle externe de contrôle de tension et deux boucles internes de contrôle de courants de chaque bras. Notre travail est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre porte le principe de fonctionnement des convertisseurs DC-DC classique et une généralité sur le convertisseur, nous présenterons également le principe de fonctionnement et les différents types d'une pile à combustible et le modèle électrique et les réactions chimiques.

Pour le deuxième chapitre, nous verrons la modélisation et la simulation d'un convertisseur boost entrelacé on va voir l'entrelacement des convertisseurs les avantages et le principe de technique.

Dans le dernier chapitre c'est ce qu'on va voir l'étude de la commande de régulateur PI appliqué sur le système PaC- IBC avec les résultats de simulation.

Chapitre I Généralité sur les convertisseurs DC-DC et la pile à combustible

I.1.Introduction

Conversion statique au moyen de convertisseurs statiques. C'est le développement des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors et transistors), qui a permis le développement et l'émergence de groupes convertisseurs. Conversion statique réalisée au moyen de convertisseurs statiques qui transforment l'énergie électrique disponible en une forme adaptée à l'alimentation d'une charge. Le bon fonctionnement d'un convertisseur statique résulte d'une forte correspondance entre les différents éléments, c'est-à-dire la structure de conversion, les composants de puissance et la loi de contrôle [4].

Les convertisseurs de type DC-DC convertissent un niveau de tension électrique à un autre niveau par action de commutation. Leur petite taille et leur efficacité par rapport aux régulateurs linéaires leur permettent d'attirer l'attention de tous. Les convertisseurs DC-DC ont un très large champ d'application. Il est largement utilisé en particulier dans les ordinateurs personnels, les accessoires informatiques et les adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir une tension continue [4].

Dans ce chapitre on a parlé généralement sur les convertisseurs statiques et une entrée sur le convertisseur boost.

Nous parlerons également sur les différents types d'une pile à combustible et le principe de fonctionnement.

I.2.Le Convertisseur Statique

Le convertisseur statique est un dispositif qui transforme de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge. L'énergie électrique est fournie soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateur), Soit sous forme continue (batterie d'accumulateur, génératrice à courant continu, alimentation par caténaire...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Une idée très importante est utilisée en électronique de puissance, qui s'appelle la dite de réversibilité. Lorsqu'un convertisseur est dit réversible, cela veut dire que l'énergie électrique peut transiter de manière bidirectionnelle. Par contre lorsqu'un convertisseur est dit non-réversible celle-ci transfère et convertit l'énergie d'une source à une charge utilisatrice. L'énergie ne peut donc pas transiter dans les deux sens. Certains convertisseurs sont naturellement réversibles (onduleur) ou naturellement non réversibles (redresseur à diode) suivant leur schéma de structure [4].



Fig.I.1 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.

I.3. Types des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc...

Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques:

- Continu -----> Continu (Hacheur)
- Continu -----> Alternatif (Onduleur)
- Alternatif -----> Alternatif (Gradateur)
- Alternatif -----> Continu (Redresseur)

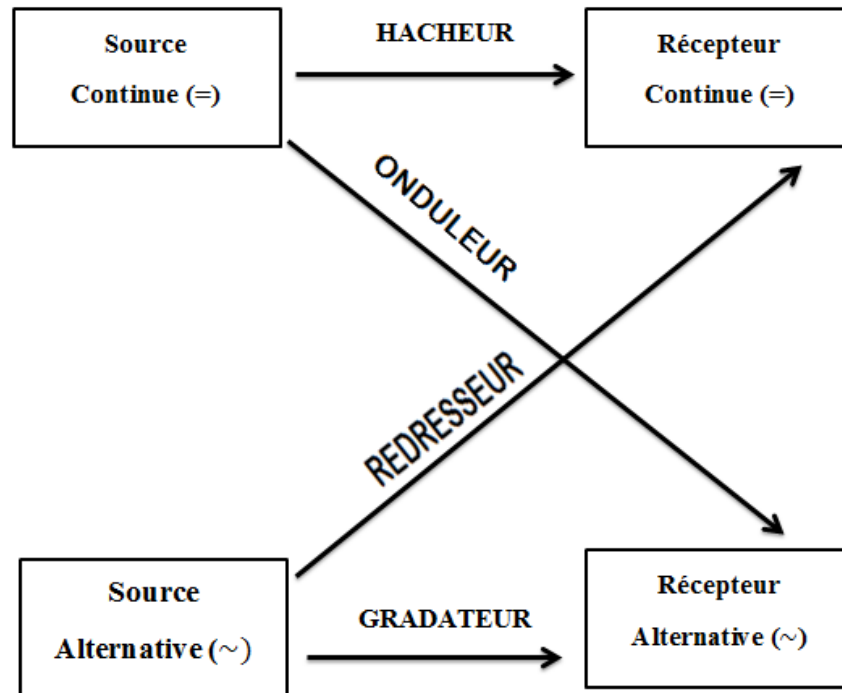


Fig.I.2 : Différents types de convertisseurs statiques.

I.3.1 Conversion continu-continu

Le Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable. Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor, pour des faibles puissances, ou un thyristor pour grande puissance.

Un hacheur est un abaisseur de tension lorsque l'interrupteur est placé en série avec la charge. Il est élévateur de tension lorsque l'interrupteur est placé en parallèle avec la charge. [5]

Le branchement série est le plus simple et le plus utilisé. Selon le procédé de hachage (découpage), on peut faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie de 3 manières :

- 1- Hacheur à fréquence fixe et largeur d'impulsion variable.
- 2- Hacheur à fréquence variable et à largeur d'impulsion fixe.
- 3- Hacheur à fréquence et à temps de conduction variable.

I.3.2. Convertisseur dévolteur de tension (Buck)

Un convertisseur Buck comme la figure (I.3), ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [6].

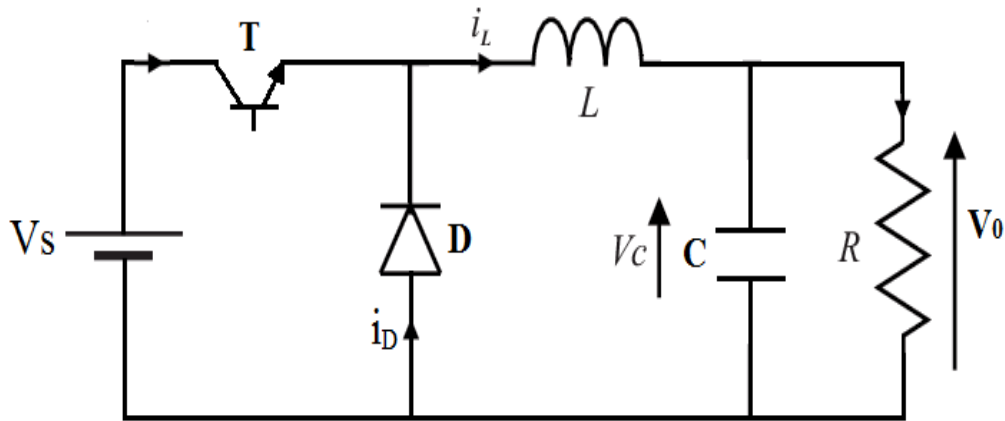


Fig.I.3 : Convertisseur Buck.

I.3.3. Convertisseur élévateur de tension (Boost)

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 comme la figure (I.5) [6].

I.3.4. Convertisseur abaisseur- élévateur de tension, polarité opposée (Buck- Boost)

Un convertisseur Buck-Boost présenté par la Fig. (I.4) c'est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [6].

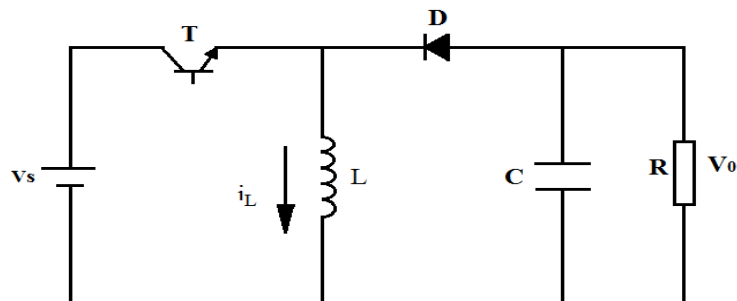


Fig.I.4 : Convertisseur Buck-Boost.

I.4. Principe de fonctionnement de convertisseur boost

L'inductance du convertisseur élévateur est très importante pour augmenter la tension d'entrée. Les principaux aspects responsables de l'activation de la tension de suralimentation de l'inductance sont dus à sa résistance inhérente ou à la résistance au courant induit soudainement à travers elle, et au fait que la réponse à celle-ci est de créer un champ magnétique, qui est ensuite

détruit. La destruction entraîne la libération de l'énergie stockée. Le processus ci-dessus entraîne le stockage du courant dans l'inductance. Un circuit de commande de transistor de relais peut être considéré comme un bon exemple de circuit de convertisseur élévateur.

La diode de retour connectée aux bornes du relais est introduite pour court-circuiter les champs électromagnétiques inversés de la bobine de relais et pour protéger le transistor chaque fois qu'il s'éteint. Si cette diode est retirée et qu'un redresseur de condensateur à diode est connecté aux bornes (le collecteur / émetteur du transistor), la tension accrue de la bobine de relais peut être collectée via ce condensateur. Un processus dans la conception du convertisseur élévateur fait que la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée (Fig. I.5) [7].

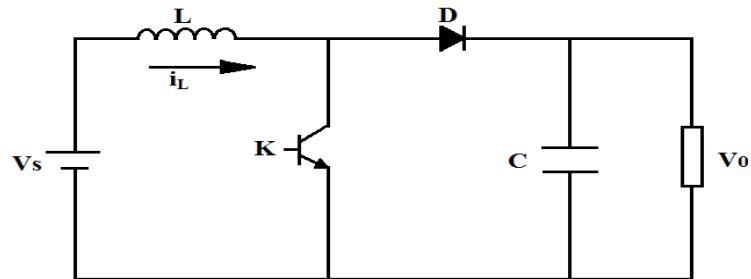


Fig.I.5 : Convertisseur élévateur de tension(Boost)

Si le commutateur T est ouvert à t_0 et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée, alors V_0 est égale à V_s . Lorsque le commutateur est fermé (fig.I.6) la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C est omis.

Le courant du circuit i_L circule à travers l'inductance L et augmente [7], et les équations d'état sont:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_s) \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C}\left(-\frac{V_0}{R}\right) \end{cases} \quad 0 < t < dt, K : ON \quad I.1$$

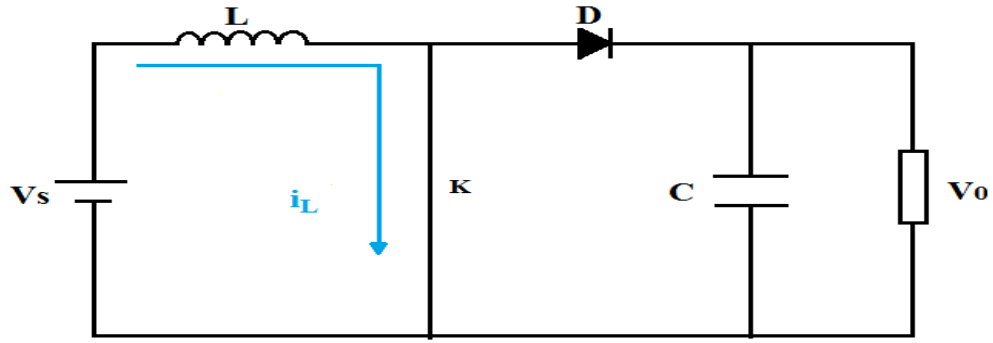


Fig.I.6 : Convertisseur Boost durant l'état on[7].

Lorsque K est désactivé (Fig.I.7), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_0 > V_s$:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_s - V_0) \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} (i_L - \frac{V_0}{R}) \end{cases} \quad dt < t < T, K : OFF \quad I.2$$

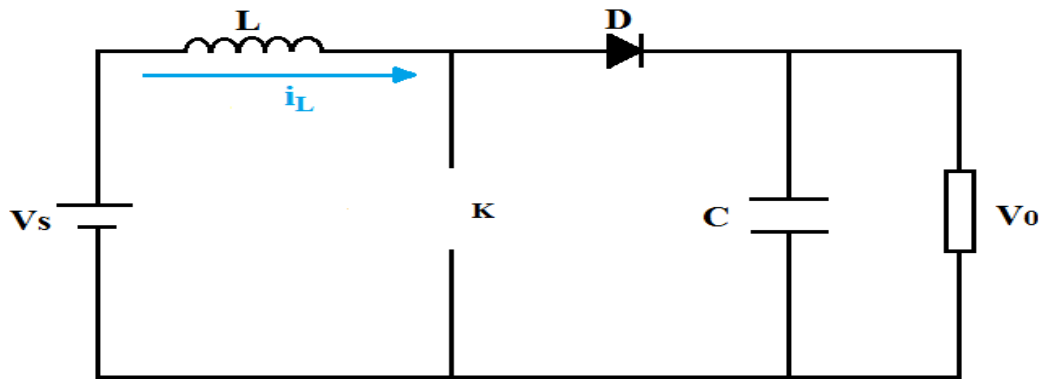


Fig.I.7: Convertisseur Boost durant l'état off.

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge. La tension de la charge de convertisseur boost est donnée par :

$$V_0 = \frac{1}{(1-D)} V_s \quad I.3$$

Avec $D = \frac{T_{on}}{T_{off}}$: est le rapport cyclique ($0 < D < 1$)

On considère ici uniquement le comportement du circuit en conduction continue [6].

I.4.1 Application de convertisseur boost

Un convertisseur de boost est utilisé lorsque vous souhaitez augmenter la tension disponible à partir d'une source CC. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série afin d'avoir un niveau de tension suffisamment élevé. L'espace disponible étant souvent limité, il n'est pas toujours possible d'avoir un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi de réduire le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité.

Les véhicules hybrides ainsi que les systèmes d'éclairage (utilisant des lampes à économie d'énergie) sont deux exemples typiques de l'utilisation de convertisseurs de suralimentation.

Les convertisseurs Boost sont utilisés dans des applications de faible puissance telles que les systèmes d'éclairage portables. Une diode électroluminescente blanche nécessite une tension d'environ 2,7 à 3,6 V pour fonctionner, un convertisseur de suralimentation permet d'augmenter la tension fournie par une batterie de 1,5 V afin de produire une lampe de poche de faible puissance [6].

Les convertisseurs Boost peuvent également fournir des tensions beaucoup plus élevées pour alimenter les tubes cathodiques froids présents dans le rétro-éclairage des écrans à cristaux liquides ou les flashes des appareils photo, par exemple.

I.5. Transistor

Le transistor est un composant électronique qui est utilisé dans la plupart des circuits électroniques (circuits logiques, amplificateur, stabilisateur de tension, modulation de signal, etc.) à basse et haute tension. Un transistor (fig.I.8) est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes actives, qui permet de contrôler un courant ou une tension sur l'électrode de sortie (le collecteur pour le transistor bipolaire et le drain sur un transistor à effet de champ) grâce à une entrée d'électrode (la base sur un transistor bipolaire et la porte pour un transistor à effet de

champ). Le circuit étant connecté aux bornes « collecteur » et « émetteur », le transistor est isolant sans tension sur la borne de base, et conducteur avec une tension sur la borne de base. En d'autres termes, il s'agit d'un interrupteur à commande électronique, sans pièce mécanique. C'est un composant fondamental des appareils électroniques et des circuits logiques. La figure 1 montre la forme générale du transistor [8].

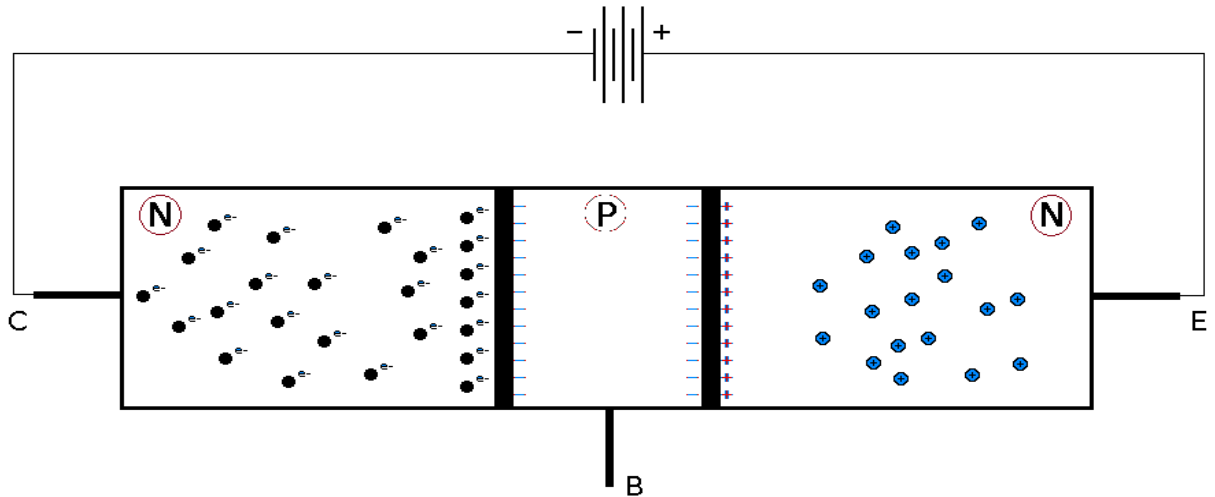


Fig.I.8 : Transistor avec une source [8].

Il existe plusieurs types de transistors, nous citerons deux types, à savoir :

- **IGBT**
- **MOSFET**

I.5.1. La différence entre l'IGBT et le MOSFET

Un MOSFET est un composant qui permet de commuter le courant, c'est-à-dire de laisser passer plus ou moins d'électrons entre deux électrodes en fonction de la troisième. Il peut être vu comme un interrupteur (comme un relais) ou une résistance variable.

IGBT signifie transistor bipolaire à grille isolée. C'est un transistor bipolaire avec une borne de porte isolée. L'IGBT combine, dans un seul appareil, une entrée de contrôle avec une structure MOS et un transistor de puissance bipolaire qui agit comme un commutateur de sortie. Les IGBT conviennent aux applications à haute tension et à courant élevé [9].

I.5.2. Présentation d'une MOSFET

Le MOSFET se présente comme un composant à trois ports :

- Le « drain » (noté D)
- La « grille » (notée G)
- La « source » (notée S)

Les tensions sont mesurées par rapport à la source. On mesure ainsi :

- V_{DS} la tension entre le drain et la source.
- V_{GS} la tension entre la grille et la source.

Enfin, pour un MOSFET idéal, aucun courant ne peut entrer par la grille. Ainsi, le courant qui entre par le drain ressort par la source et vice versa. On note donc ce courant I_{DS} car il est le même en D et en S.

Il existe deux types de MOSFET :

- Le MOSFET « canal n » ou NFET ;
- Le MOSFET « canal p » ou PFET ;

Ces deux types ont la même importance, pour des raisons expliquées plus bas. Dans un premier temps, nous nous intéresserons uniquement au NFET [10].

I.6. La pile à combustible

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte. L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.

L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même, une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ». Les piles à combustible se

différencient d'abord par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons H^+) de l'anode à la cathode, soit basique (anions OH , O_2 , CO_2) en sens contraire [11].

I.6.1 Les différents types de pile à combustible

Les électrolytes doivent être des isolants électroniques et des conducteurs ioniques. Il peut être liquide ou solide. La présence de plaques bipolaires qui permettent au gaz de passer à travers les canaux, vers le site de réaction. Il existe 6 types de piles à combustible, qui fonctionnent à des températures différentes selon l'électrolyte [12]:

- Pile alcaline (Alkaline Fuel Cell AFC)
- Pile à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEMFC)
- Pile à membrane fonctionnant au méthanol (Direct Methanol Fuel Cell DMFC)
- Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell PAFC)
- Pile à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell MCFC)
- Pile à oxyde solide (Solid Oxid Fuel Cell SOFC)

I.6.2 Pile à combustible à hydrogène

Le fonctionnement d'une pile dihydrogène-dioxygène est particulièrement propre puisqu'il ne produit que de l'eau et consomme uniquement des gaz. Mais jusqu'en 2006, la fabrication de ces piles est très coûteuse, notamment à cause de la quantité non négligeable de platine nécessaire.

Une des difficultés majeures réside dans la synthèse et l'approvisionnement en dihydrogène. Sur Terre, l'hydrogène n'existe en grande quantité que combiné à l'oxygène (H_2O , c'est-à-dire l'eau), au soufre (sulfure d'hydrogène, H_2S) et au carbone (combustibles fossiles de types gaz naturel ou pétroles). La production de dihydrogène nécessite donc soit de consommer des combustibles fossiles, soit de disposer d'énormes quantités d'énergie à faible coût, pour l'obtenir à partir de la décomposition de l'eau, par voie thermique ou électrochimique.

Ensuite, le dihydrogène peut être comprimé dans des bouteilles à gaz (pression en général de 350 ou 700 bars), ou liquéfié ou combiné chimiquement sous forme de méthanol ou de méthane qui seront ensuite transformés pour libérer du dihydrogène. Les rendements

énergétiques cumulés des synthèses du dihydrogène, de compression ou liquéfaction, sont généralement assez faibles. Le dihydrogène n'est donc pas une source d'énergie primaire, c'est un simple vecteur d'énergie difficile à produire et à stocker [12] [11].

I.6.3 Présentation d'une pile à combustible

Les piles à combustibles sont des dispositifs qui convertissent directement l'énergie libérée par une réaction chimique en énergie électrique, la figure (I.9) représente ce principe de Conversion :

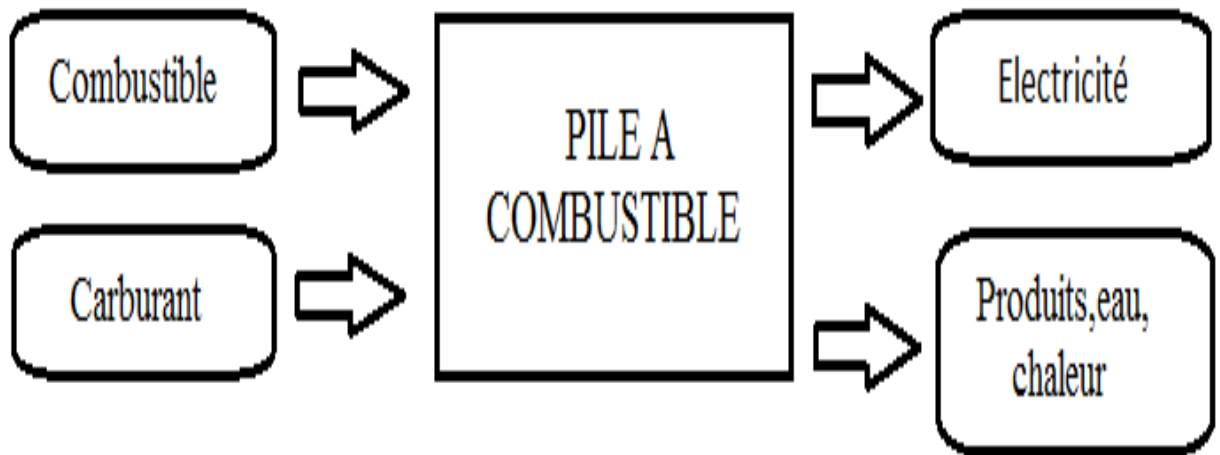


Fig.I.9 : Schéma de principe de conversion direct en électricité.

En effet, la génération directe d'énergie électrique par conversion électrochimique de combustible (H_2) et de carburant (O_2) pour former de l'énergie électrique, de la chaleur et de l'eau (H_2O).

Le fonctionnement d'une pile à combustible est particulièrement propre puisqu'il produit de l'eau et de l'électricité et consomme uniquement des gaz [13].

I.6.4 Principe de fonctionnement

Le schéma de principe général d'une pile à hydrogène est montré sur la figure (I.10) :

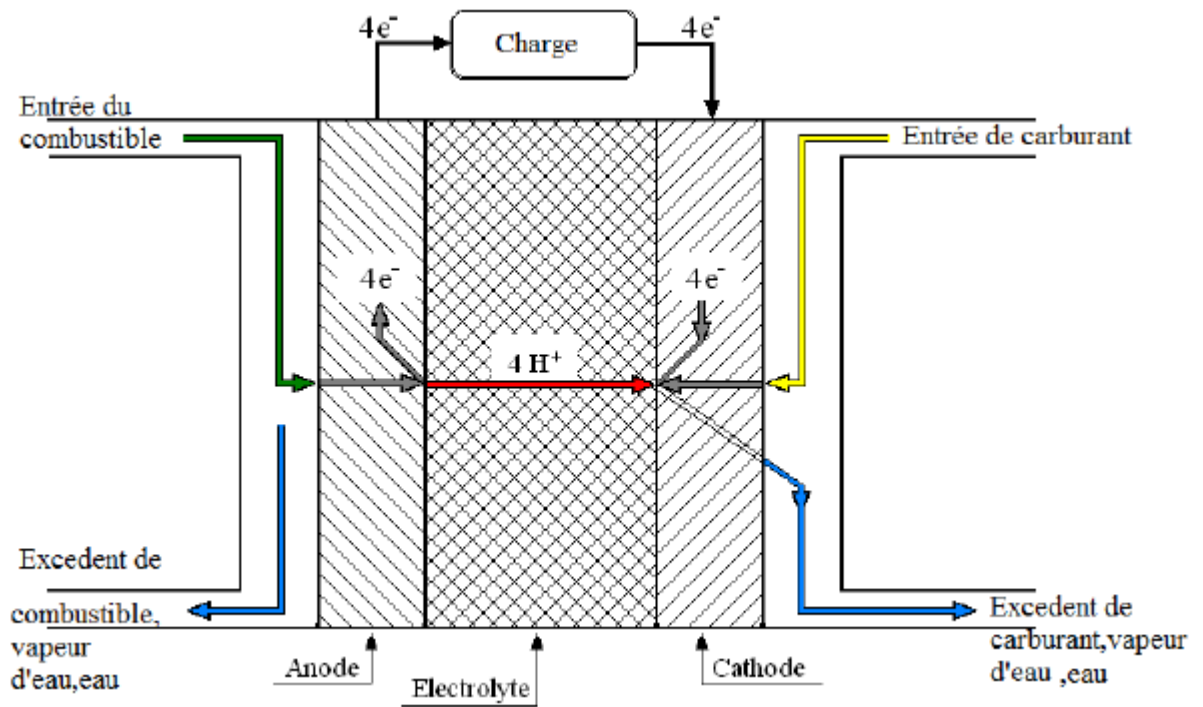


Fig.I.10 : Pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC).

Dans le cœur d'une pile à hydrogène du type PEMFC à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement :

À l'anode : oxydation catalytique, en présence de platine, de l'hydrogène qui se dissocie de ses électrons : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ I.4

À la cathode : réduction catalytique, en présence de platine, de l'oxygène qui capture les ions H^+ qui ont traversé la membrane électrolyte et les électrons arrivant du circuit extérieur. La réaction produit de la chaleur et de l'eau :



Dans le cœur d'une pile à électrolyte basique comme les SOFC, ces réactions deviennent :

à la cathode : réduction catalytique de l'oxygène :



À l'anode : oxydation catalytique de l'hydrogène qui capture les ions O_2^- qui ont traversé l'électrolyte pour donner de la chaleur et de l'eau :



Dans les deux cas, les électrons sont libérés sur l'anode puis, bloqués par l'électrolyte, passent par le circuit extérieur de la pile et fournissent de l'énergie électrique (force électromotrice) avant de se recombinaison sur la cathode avec l'oxygène.

Le rôle du catalyseur dans l'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de la réduction de l'oxygène à la cathode est essentiel dans le rendement de la pile. On utilise encore aujourd'hui principalement le platine, qui est déposé en couches minces sur la surface des deux électrodes, mais en plus grande quantité sur la cathode, la réaction de réduction y étant plus difficile à catalyser. Or le platine est un métal rare, très coûteux, qui pèse lourdement sur la compétitivité des piles à combustible actuelles [11][13].

I.7.Applications des piles à combustibles

On distingue habituellement trois grands types d'applications :

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

I.8. Modèle électrique de la pile à combustible (PEMFC) :

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est basé sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau.

Une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur selon les équations des réactions électrochimiques se produisant aux électrodes d'une cellule PEMFC comme nous l'avons observé la réaction qui a lieu avec l'hydrogène inséré et l'électrolyte à l'anode [14] [12].

Chapitre I Généralité sur les convertisseurs DC-DC et la pile à combustible

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible . Il existe un grand nombre de travaux que proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM.

En citant trois modèles les plus utilisés :

- Le modèle statique de Larminie et Dicks.
- Le modèle d'Amphlet.
- Le modèle de Chamberlin-Kim.

Pour le modèle de Larminie et Dicks, Ce modèle décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E_0 , la surtension d'activation V_{act} , la surtension ohmique V_{ohm} et la surtension de concentration V_{conc} .

$$V_{FC} = E_0 - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad I.8$$

Les pertes d'activation V_{act} , la relation entre les pertes d'activation et la densité de courant et donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = A \log\left(\frac{i_{FC} - i_n}{i_0}\right) \quad I.9$$

Les pertes ohmique V_{ohm} , la chute de tension correspondante s'écrit:

$$V_{ohm} = R_m (i_{FC} - i_n) \quad I.10$$

Les pertes de concentration V_{conc} , ces pertes et donnée par l'équation suivante :

$$V_{conc} = B \log\left(1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{Lim}}\right) \quad I.11$$

Tel que i_{FC} , et le courant de PaC, i_n et le courant interne de PaC , i_0 et le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte, A et la pente de la droite de Tafel.

R_m et la résistance totale de la pile à combustible, R_m et la densité de courant limite et B un constante de transport ou de transfert de masse.

I.9. Conclusion

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques qui utilisent des semi-conducteurs de puissance à l'état découplé pour gérer l'électricité à haut rendement et le convertisseur élévateur (boost) est un type qui a un rendement élevé et est utilisé dans de nombreux domaines et l'utilisation d'interrupteur à semi-conducteurs permet d'obtenir des convertisseurs boost présentant de nombreux avantages.

**Chapitre II: Modélisation et
simulation d'un convertisseur
Boost entrelacé a 2 bras**

II.1 Introduction

En raison de ses performances supérieures par rapport aux autres convertisseurs, les convertisseurs boost sont largement utilisés dans l'industrie, en particulier dans l'alimentation (Microprocesseurs, Intel,...), systèmes de production d'énergie renouvelable (photovoltaïque, pile à combustible, etc.) et moteurs d'entraînement. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur le convertisseur à deux phases, celui-ci a été proposé pour pallier certaines limitations des convertisseurs boost classiques.

Tout d'abord, nous allons examiner en détail le convertisseur Boost entrelacé (modélisation, avantages ...)

Ensuite, nous allons parler sur le principe d'entrelacement du convertisseur et les avantages qui peuvent être apportés par cette technologie.

II.2. Entrelacement des convertisseurs

L'introduction de la technologie d'entrelacement vise essentiellement à résoudre le problème de la grande ondulation du courant d'entrée et de sortie du convertisseur. En fait, l'entrelacement peut réduire considérablement ces ondulations, augmentant ainsi l'efficacité et réduisant la taille des composants actifs et passifs du convertisseur. Dans cette section, nous démontrerons les principes et les avantages de l'application de cette technique à un convertisseur de boost [3].

II.2.1. Avantage de l'entrelacement

La réduction des ondulations du courant d'entrée et de sortie, qui à son tour réduit la taille des inducteurs et la capacité de sortie, est l'avantage le plus important des convertisseurs entrelacés. Si l'on veut obtenir la même ondulation de courant des entrées et des sorties, il faut utiliser des inductances et des condensateurs de valeurs inférieures à celles utilisées dans la structure classique. Les principales motivations des convertisseurs entrelacés sont [3]:

- Réduction du coût total du convertisseur, en utilisant des composants de faibles calibres.
- Amélioration du rendement de la conversion, car les pertes des semi-conducteurs et dans les inductances sont réduites en raison du partage du courant sur plusieurs bras.
- Possibilité d'atteindre des puissances inaccessibles avec les structures classiques.

- Modularité du convertisseur qui permet notamment de répondre à des éventuelles modifications du cahier de charges.
- Amélioration des formes d'ondes à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

II.2.2. principe de technique d'entrelacement

La technique d'entrelacement consiste à connecter en parallèle n branches d'un convertisseur classique et à décaler leurs signaux de commande de T/n , où T est la période de commutation.

La figure (II.1) illustre l'entrelacement des deux bras du convertisseur élévateur, respectivement.

L'introduction de cette technique modifie les formes d'onde de courant à l'entrée et à la sortie de ces bras (n bras, tel que n est les nombres de bras), réduisant ainsi les niveaux d'ondulation du courant d'entrée et de sortie, réduisant ainsi la taille des composants passifs et les contraintes sur les éléments actifs.

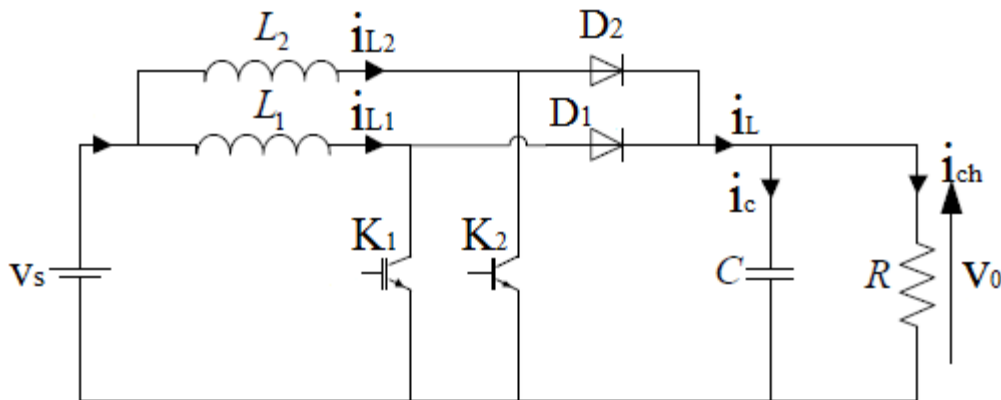


Fig.II.1 : Topologies d'un convertisseur boost entrelacés [3].

II.3. Convertisseur Boost entrelacé :

L'entrelacement permet de résoudre le problème lié au fort courant des convertisseurs basse tension. Il consiste en la mise en parallèle de cellules boost dont les commandes sont régulièrement décalées entre elles. Ainsi, ce principe permet réduire l'ondulation du courant dans chaque branche, d'augmenter la fréquence apparente en entrée et en sortie. L'analyse sera faite sur le boost entrelacé à branches mais les résultats sont valables pour les autres structures entrelacées. La technologie de l'entrelacement est réalisée par deux inductances, MOSFET et diode identiques (Figure II.2) hacheur entrelacé à 2 branches.

Les commandes des MOSFET de chaque branche sont décalées de $T/2$ de façon régulière avec un même rapport cyclique pour chaque branche.

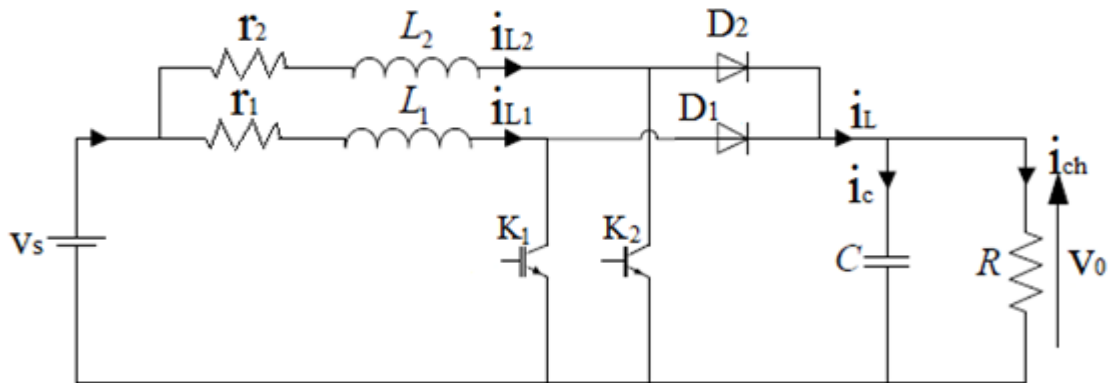


Fig.II.2 : Schéma de boost entrelacé à 2 bras.

II.4. Domaine d'utilisation des convertisseurs boost

Le convertisseur boost entrelacé est utilisé dans plusieurs domaines, notamment :

- Applications automobiles.
- Applications d'amplification de puissance.
- Applications de contrôle adaptatif.
- Systèmes d'alimentation par batterie.
- Electronique grand public.
- Applications de communication

II.5. Les avantages d'un convertisseur boost entrelacé

Les avantages du convertisseur élévateur entrelacé par rapport au convertisseur élévateur classique sont une faible ondulation du courant d'entrée, un rendement élevé, une réponse transitoire plus rapide, une émission électromagnétique réduite et une fiabilité améliorée.

II.6. Modélisation d'un convertisseur boost entrelacé à 2 bras

Le convertisseur peut fonctionner en mode de conduction discontinue (MCD) ou en mode de conduction continue (MCC), mais les performances avec MCC offrent un meilleur fonctionnement des dispositifs d'alimentation, des pertes de conduction plus faibles et moins d'ondulation du courant d'entrée [15].

L'IBC biphasé est illustré à la (Fig.II.2). L'IBC biphasé se compose d'inductances d'entrée séparées L_1 et L_2 , Commutateurs K_1 et K_2 , Diodes D_1 et D_2 et le même condensateur de filtrage C en sortie. Les interrupteurs S_1 et S_2 avoir la même commutation fréquence et déphasage de 180 degrés. La charge est représentée par une résistance R . L'inductance stocke et libère de l'énergie lorsque l'interrupteur est sur ON et OFF.

Le condensateur est utilisé pour filtrer l'ondulation de la tension de sortie V_o . Les interrupteurs S_1 et S_2 sont représenté par u_1 et u_2 . Les valeurs possibles des commutateurs sont $u_1 \{0,1\}$ et $u_2 \{0,1\}$ dans lequel 0 et 1 sont représentant les états OFF et ON des interrupteurs de puissance. Et le signal de porte des commutateurs u_1 et u_2 sont appliqués un déphasage de 180 degrés

II.6.1.Modèle à fonction commutée :

Le système a quatre modes de fonctionnement. La résistance de l'inductance est considérée mais les éléments parasites tels que la résistance, la chute de tension de la diode et la résistance parasite du condensateur ne sont pas appliqués en fonctionnement. On peut supposer que les valeurs de deux inductances d'entrée sont identiques [16].

Mode1: $u_1=1$ et $u_2=0$. La figure (II.3) illustre le circuit équivalent du mode 1.

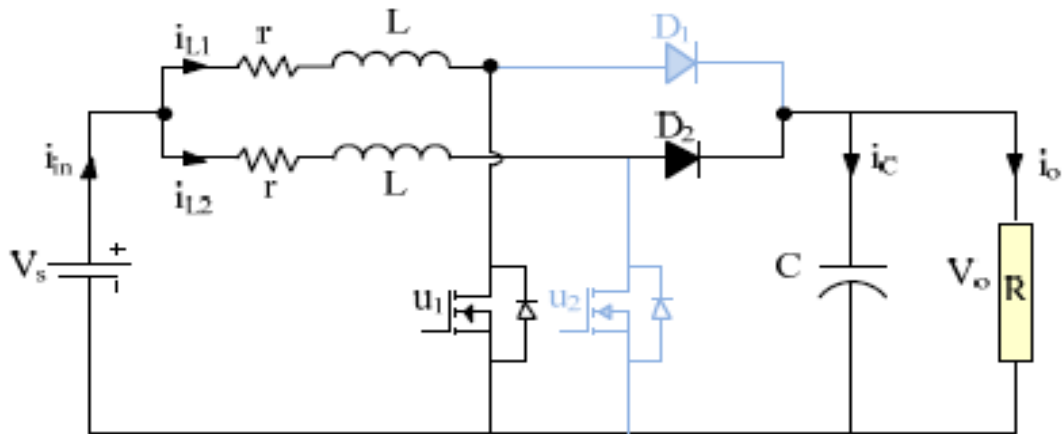


Fig.II.3 : Circuit équivalent pour le Mode 1 [16].

Pour le circuit équivalent du mode 1, les équations différentielles sont obtenues en appliquant Lois de tension et de courant de Kirchhoff.

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} \tag{II.1}$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} \quad (II.2)$$

$$C \frac{dv_0}{dt} = i_{L2} - \frac{V_0}{R} \quad (II.3)$$

Mode 2 : $u_1=0$ et $u_2=1$. La figure (II.4) montre le circuit équivalent du mode 2.

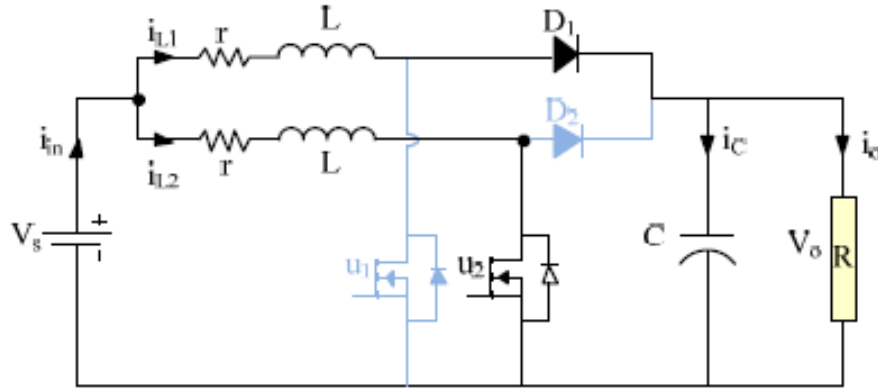


Fig.II.4 : Circuit équivalent pour le mode 2 [16].

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} - V_0 \quad (II.4)$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} \quad (II.5)$$

$$C \frac{dv_0}{dt} = i_{L1} - \frac{V_0}{R} \quad (II.6)$$

Mode 3 : $u_1=u_2=1$. La figure (II.5) illustre le circuit équivalent du mode 3.

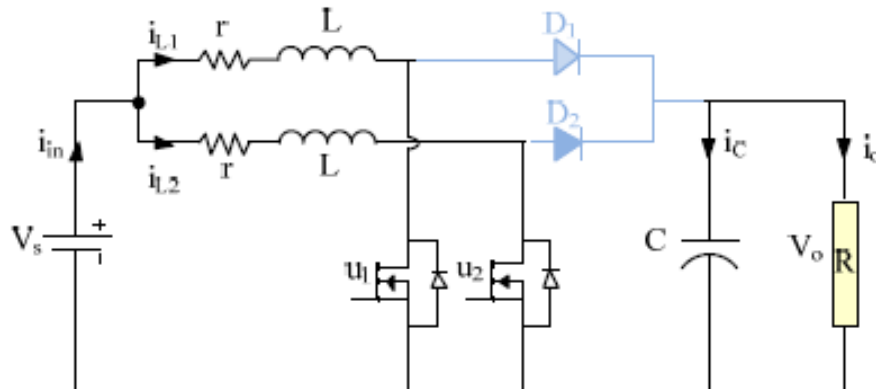


Fig.II.5 : Circuit équivalent pour le mode 3 [16].

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} \quad (II.7)$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} \quad (II.8)$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.9})$$

Mode 4 : $u_1=u_2=0$. La figure (II.6) montre le circuit équivalent du mode 4.

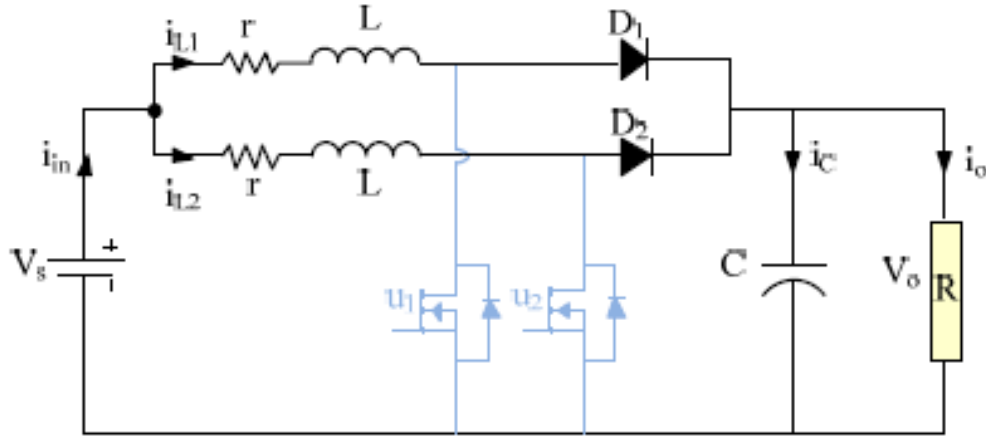


Fig.II.6 : Circuit équivalent pour le mode 4[16].

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} - V_0 \quad (\text{II.10})$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} - V_0 \quad (\text{II.11})$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = i_{L1} + i_{L2} - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.12})$$

Les équations différentielles suivantes sont présentées en utilisant fonction commutée.

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} - (1 - u_1)V_0 \quad (\text{II.13})$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} - (1 - u_2)V_0 \quad (\text{II.14})$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = (1 - u_1) i_{L1} + (1 - u_2) i_{L2} - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.15})$$

II.6.2. Équations d'état stationnaire du système

Le modèle moyen du système est utilisé pour obtenir les équations d'état stationnaire. Les positions moyennes d_1 et d_2 remplacent les positions de l'interrupteur u_1 et u_2 en (II.13)-(II.15)

$$L \frac{di_{L1}}{dt} = V_s - ri_{L1} - (1 - d_1)V_0 \quad (\text{II.16})$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt} = V_s - ri_{L2} - (1 - d_2)V_0 \quad (\text{II.17})$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = (1 - d_1) i_{L1} + (1 - d_2) i_{L2} - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.18})$$

Alors que $\overline{u_1} = d_1 \in \{0,1\}$ et $\overline{u_2} = d_2 \in \{0,1\}$ sont la moyenne position des interrupteurs. Les valeurs de d_1 et d_2 sont l'addition de la valeur moyenne et petite du signal [16].

$$d_1 = D_1 + \widetilde{d}_1 \text{ et } d_2 = D_2 + \widetilde{d}_2 \quad (\text{II.19})$$

Si $\widetilde{d} \ll D$, \widetilde{d} est négligé en utilisant le petit signal approximation. d_1 et d_2 sont égaux à D en régime permanent. Par conséquent, $d_1 = d_2 = D$.

$$0 = V_s - r i_{L1} - (1 - D) V_0 \quad (\text{II.20})$$

$$0 = V_s - r i_{L2} - (1 - D) V_0 \quad (\text{II.21})$$

$$0 = (1 - D) i_{L1} + (1 - D) i_{L2} - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.22})$$

Les équations (20) à (22) sont représentées en utilisant la notation matricielle suivante.

$$\begin{pmatrix} r & 0 & (1 - D) \\ 0 & r & (1 - D) \\ (1 - D) & (1 - D) & -\frac{1}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_s \\ V_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.23})$$

L'équation (II.24) est dérivée en utilisant (II.23). Il représente le (II.12) valeur en régime permanent du système.

$$\begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2R(1-D)^2 + r} \\ \frac{1}{2R(1-D)^2 + r} \\ \frac{2R(1-D)^2}{2R(1-D)^2 + r} \end{pmatrix} V_s \quad (\text{II.24})$$

II.6.3. Sélection des paramètres

La résistance de charge est calculée à partir de la puissance de charge. La valeur de l'inductance peut être choisie en définissant la valeur de l'inductance (II.15) ondulation de courant dans (II.25) [16].

$$\Delta_{i_L} = \frac{V_s D}{L f_s} \quad (\text{II.25})$$

La valeur de l'ondulation de la tension de sortie est définie pour trouver la valeur du condensateur en (II.26).

$$\Delta V_0 = \frac{P_0 D}{2CV_0 f_s} \quad (\text{II.26})$$

En régime permanent, la valeur de la tension de sortie pour le cas idéal est obtenue à partir de (II.27).

$$V_0 = \frac{1}{1-D} V_s \quad (\text{II.27})$$

Le tableau I montre les paramètres de l'IBC biphasé. Ces paramètres sont obtenus à partir de (II.25)-(II.27). La valeur de D est définie à 0,5 pour obtenir la tension de sortie 24 Volts. La résistance de la bobine d'inductance a 0,2 [16].

symbole	valeur
V_s	12[V]
V_0	24[V]
i_{L1}, i_{L2}	2[mH]
r	02[Ω]
C	470[μF]
R	18[Ω]
D	50%, 70%
f_s	2[kHz]

Tableau II.1 : Paramétré de convertisseur.

II.7. Simulation du convertisseur

L'IBC diphasique est simulé dans MATLAB à partir d'un modèle moyen pour valider les résultats en régime permanent. La construction de la conception du convertisseur de puissance prend plus de temps et le coût.

La simulation est la meilleure façon d'étudier l'IBC avant la construction.

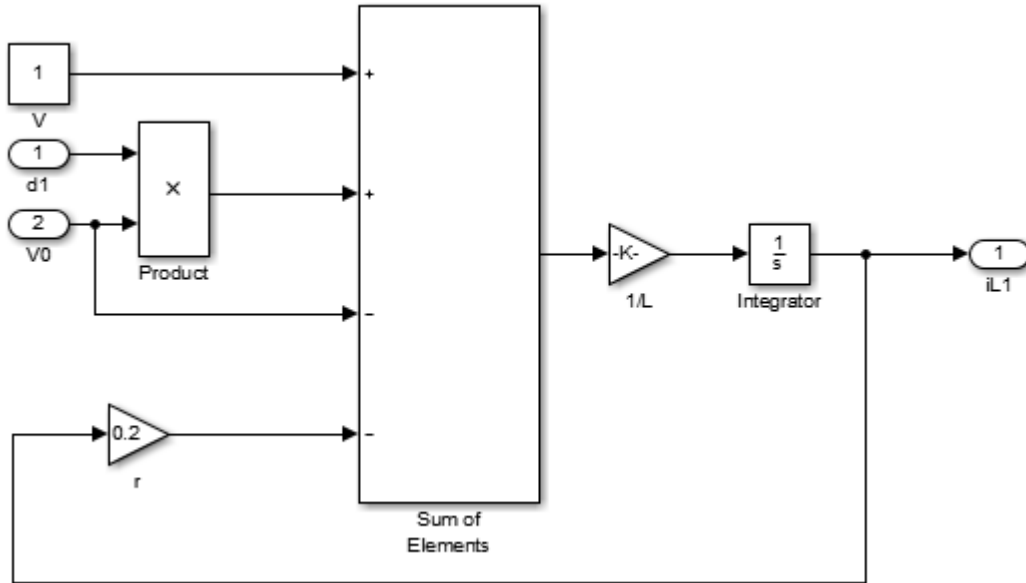


Fig.II.7 : Schéma fonctionnel du courant d'entrée i_{L1} de l'inductance

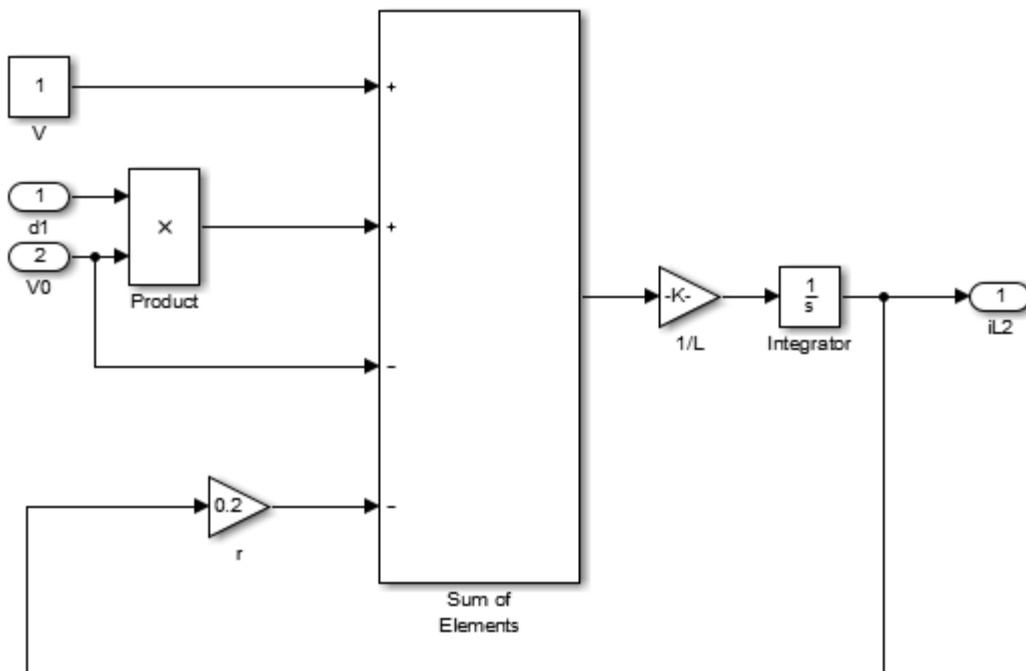


Fig.II.8 : Schéma fonctionnel du courant d'entrée i_{L2} de l'inductance.

Selon (II.16), le schéma fonctionnel du courant d'entrée de l'inductance (i_{L1}) est représenté sur la Fig.II.7. La Fig.II.8 est le schéma fonctionnel de courant d'entrée de l'inductance (i_{L2}) pour (II.17). Le schéma fonctionnel de la tension de sortie est décrit à la Fig.II.9 en utilisant (II.18).

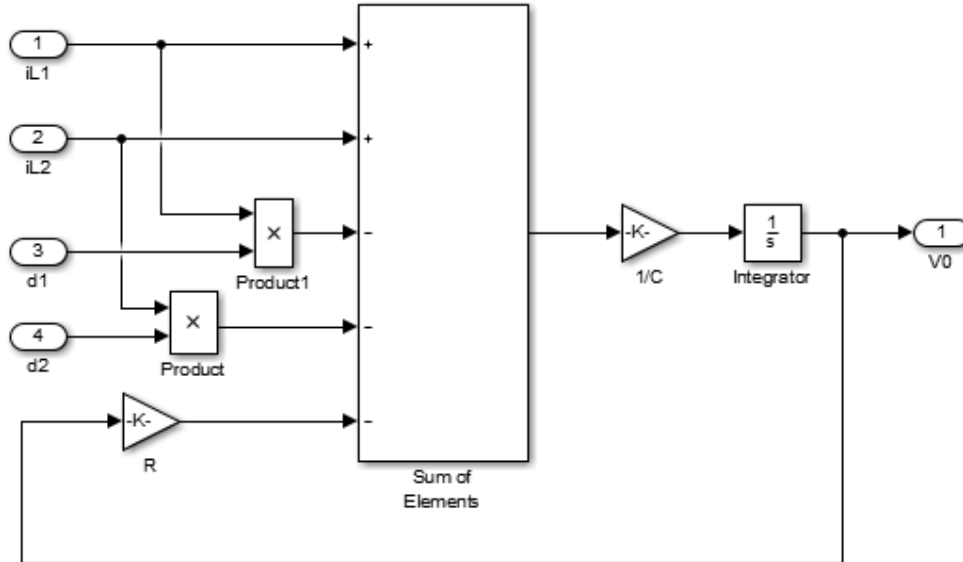


Fig.II.9 : Schéma fonctionnel de la tension de sortie.

La simulation graphique de l'IBC à deux phases est illustrée à la (Fig.II.10). Le système global est obtenu à partir de la combinaison de (II.16)-(II.18). Les paramètres du convertisseur sont utilisés à partir du tableau I. Le temps de simulation est défini à 0,05 seconde. La période de temps pour l'horloge est définie en 1 seconde.

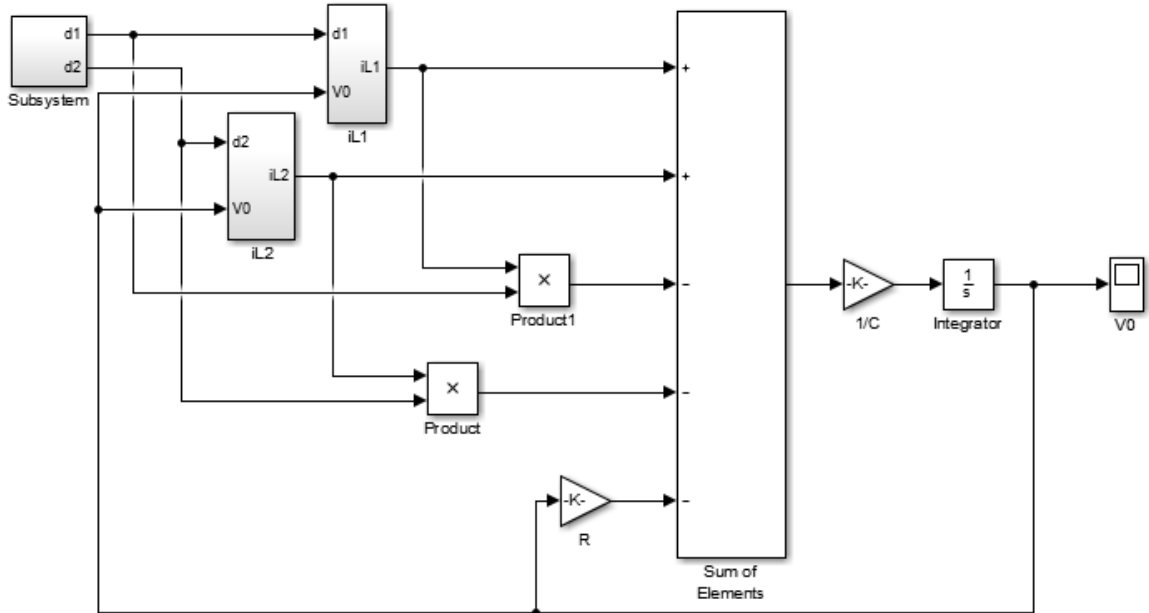


Fig.II.10 : Simulation graphique d'IBC à 2 phases.

Point d'équilibre	D=0.5	D=0.7
V_0	23.9	38
i_{L1}	1.3	3.5
i_{L2}	1.3	3.5
i_{in}	1.3	3.5

Tableau II.2 : Valeur de point d'équilibre.

Le tableau (II.2) présente les valeurs du point d'équilibre de (II.24) pour D=0,5 et 0,7 en utilisant la valeur du paramètre du convertisseur dans le tableau (II.1). Les formes d'onde du courant d'entrée, du courant d'inductance et de la tension de sortie avec un rapport cyclique de 50 % sont illustrées aux Figure (II.11-II.14) Les formes d'onde du courant d'inductance, du courant d'entrée et de la tension de sortie avec un rapport cyclique de 70 % sont décrites dans les Figure (II.15-II.18).

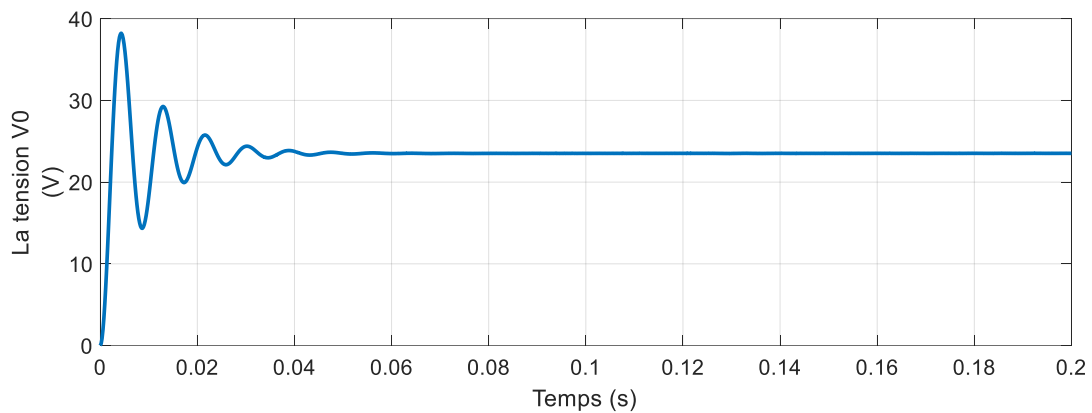


Fig.II.11 : Forme d'onde de la tension de sortie V0 de l'IBC biphasé au rapport cyclique 50 %.

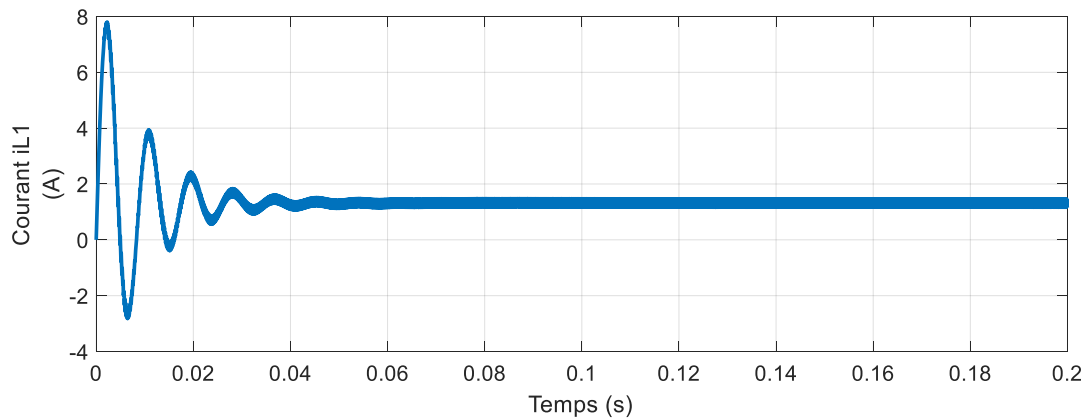


Fig.II.12 : Forme d'onde du courant d'inductance (iL1) à un rapport cyclique de 50 %.

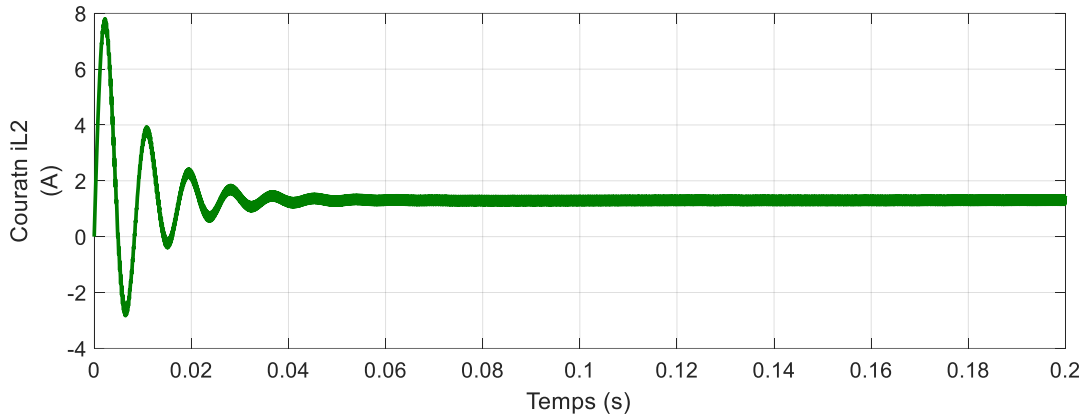


Fig.II.13 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L2}) à un rapport cyclique de 50 %

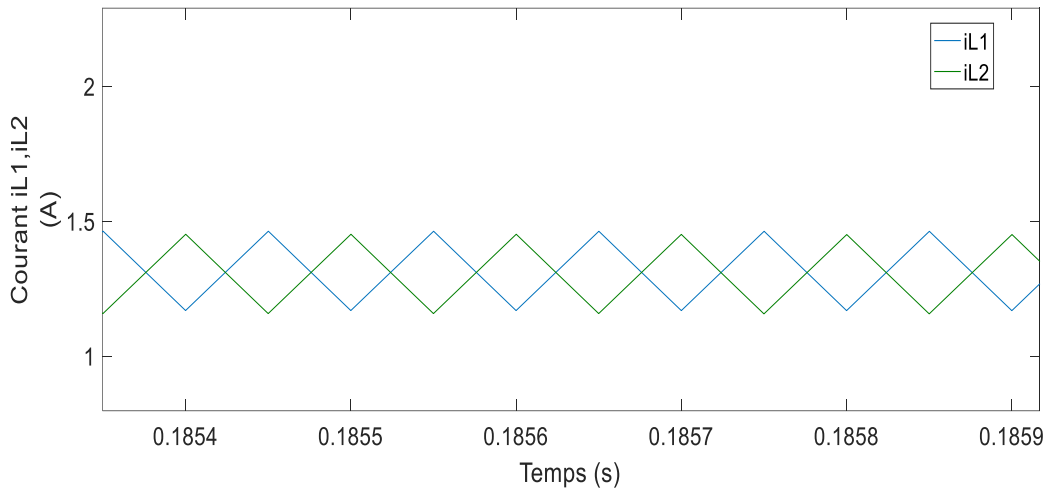


Fig.II.14 : Les formes d'onde en régime permanent du courant d'inductance avec 180 Déphasage degré pour $D=0.5$.

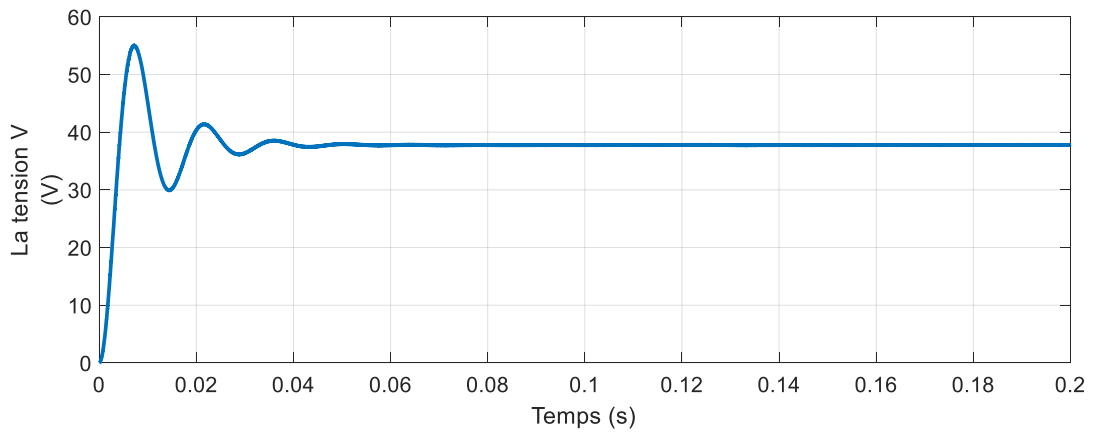


Fig.II.15 : Forme d'onde de la tension de sortie de l'IBC biphasé pour le rapport cyclique 70%.

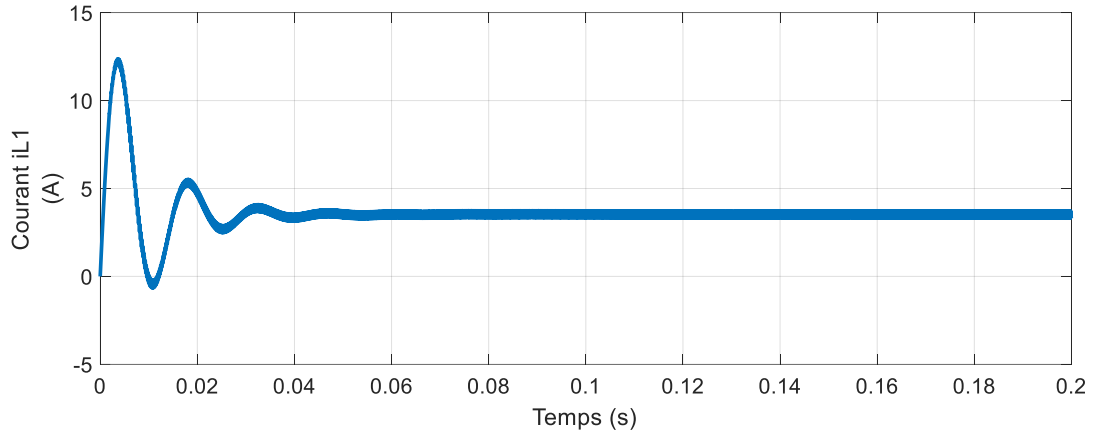


Fig.II.16 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L1}) à un rapport cyclique de 70%.

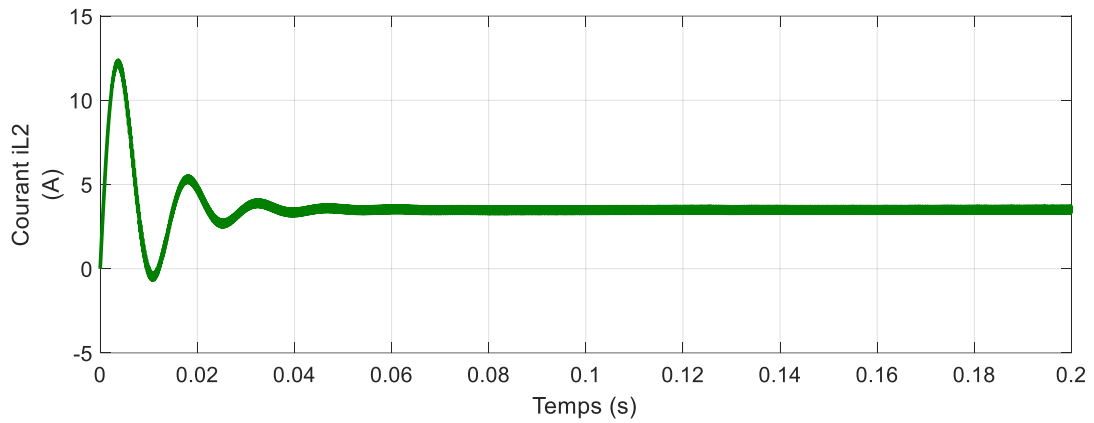


Fig.II.17 : Forme d'onde du courant d'inductance (i_{L2}) à un rapport cyclique de 70 %.

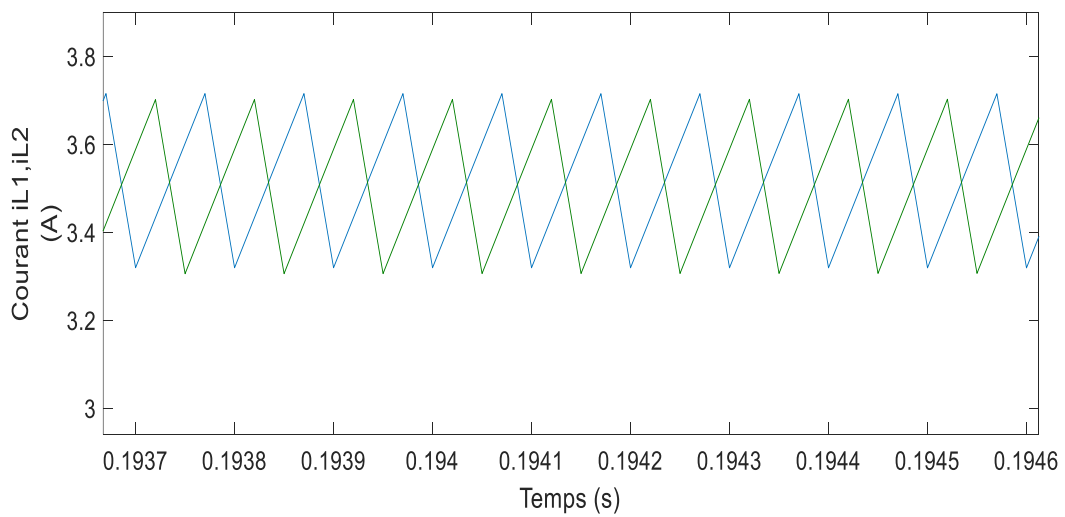


Fig.II.18 : Les formes d'onde en régime permanent du courant d'inductance avec 180 Déphasage degré pour $D=0.7$.

II.7.1. Discussion des résultats

Ces simulations décrivent le comportement dynamique des variables v_o , i_{L1} , i_{L2} . La réponse du système a l'oscillation au temps compris entre 0 et 0,05 seconde et le système atteint son régime permanent après 0,05 seconde.

La valeur du courant d'entrée est élevée au démarrage.

La valeur de l'ondulation du courant d'entrée correspond à la moitié de la valeur du courant de l'inducteur onduleur parce que la fréquence de commutation est deux fois.

La valeur de tension de sortie, courant des inductances et courant d'entrée sont augmenté avec l'augmentation du cycle d'utilisation mais le cycle d'utilisation a une limite dans l'expérience.

La valeur du courant d'entrée et l'ondulation de courant d'inductance sont également augmentées lorsque le cycle de service est augmenté.

L'inducteur d'ondulation de courant peut être réduit en augmentant la commutation de fréquence.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi la modélisation mathématique et la simulation de l'IBC à 2 bras. Le point d'équilibre est présenté pour valider les résultats de la simulation graphique à partir du modèle moyen.

Pour comparer les valeurs de la simulation graphique, le modèle a fonction commutée et la moyenne du modèle sont utilisés pour analyser les performances du convertisseur et simuler sa réponse dynamique.

Chapitre III:

Contrôle du convertisseur

IBC à 2 bras alimenté par pile

à combustible

III.1. Introduction

Dans l'électronique de puissance ils existés plusieurs compétents électronique comme les convertisseurs DC-DC entrelacée, Ce dernier est insuffisamment précis un temps de réponse trop lent, un dépassement trop important, et une grande sensibilité aux perturbations, pour la correction nécessaire de leur comportement, nous utilisons des techniques de contrôle [17].

Dans ce contexte, la topologie du transformateur et la structure de contrôle jouent un rôle important en termes de stabilité et de capacité à empêcher les oscillations provenant du côté DC et de traitement de la puissance [18].

Ce chapitre sera focalisé sur la commande du convertisseur boost entrelacé par le régulateur Proportionnel-Intégral PI qui se caractérise par sa simplicité de mise en œuvre et la possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique.

III.2. Principe de fonctionnement de MLI

Dans cette partie on a appliqué une commande MLI (PWM en anglais) aux 2 cellules de commutation .Les signaux de commande ont le même rapport cyclique D. L'idée est de créer un signal logique (valeur 0 ou 1) avec une fréquence fixe mais un rapport cyclique contrôlé numériquement, la valeur moyenne du signal étant une amplitude analogue égale au rapport cyclique multiplié par l'amplitude maximale du signal.

La modulation de largeur d'impulsions MLI, est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de circuits numériques (tout ou rien, 1 ou 0), ou plus généralement à des états discrets comme la figure(III.1) [19] [20].

Le signal de sortie de la modulation u (signal PWM) est généré selon l'algorithme

$$\text{Suivant : } \begin{cases} \text{si } D \geq U_p \Rightarrow u = 1 \\ \text{sinon } u = 0 \end{cases} \quad \text{III(1)}$$

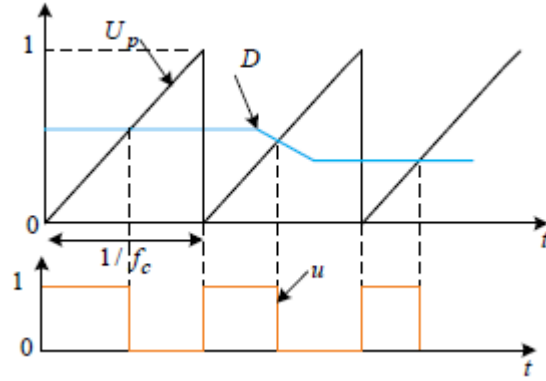


Fig. (III.1): Principe de la modulation de largeur d'impulsion [17].

III.3. La commande classique par régulateur PI

Le régulateur de commande PI c'est un le plus composant nécessaire pour contrôler un système

III.3.1. Correcteur à action proportionnelle P

Une loi de commande proportionnelle prend en compte uniquement la régulation des tensions aux bornes des condensateurs, elle est basée sur une modulation des rapports cycliques.

La relation entre la sortie $U(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est [21] [22] :

$$U(t) = k_p * \varepsilon(p) \quad \text{III(2)}$$

C'est-à-dire : (p)

$$\varepsilon(p) = k_p \quad \text{III(3)}$$

N'importe quelle source d'énergie utilisés et quelques soient mécanisme, le correcteur proportionnel est essentiellement un amplificateur à gain variable.

III.3.2 Correcteur à action intégral I

Le correcteur intégral I n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle [18].

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$\text{Ou encore : } u(t) = k_i \int \varepsilon(p) dt \quad \text{III(4)}$$

$$\text{C'est-à-dire ; } u(t)/\varepsilon(p) = k_i = T. p \quad \text{III(5)}$$

III.3.3. Correcteur à action proportionnelle intégral PI

Le correcteur à action exclusivement Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est en général, associé au correcteur proportionnel correcteur à action proportionnelle et intégrale.

L'intérêt de la correction de type intégrale est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Or, pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate [22].

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \int \varepsilon(t) \cdot dt \quad (\text{III.6})$$

C'est-à-dire :

$$\frac{U(p)}{\varepsilon(t)} = k_p + \frac{k_i}{p} = \frac{k_p}{p} \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right)$$

Ou encore,

$$\frac{U(p)}{\varepsilon(t)} = k_p \left(1 + \frac{k_i}{p} \cdot k_p \right) = k_p \left(1 + \frac{k_i}{p} \cdot T_n \right) \quad (\text{III.7})$$

Avec

$$T_i = \frac{1}{k_i} \quad (\text{III.8})$$

Avec : $T_i = \frac{1}{k_i}$ « constante de temps d'intégrations »

$T_n = \frac{k_p}{k_i}$ « dosage de corrélation d'intégrale »

III.4 Stratégies de commande :

La loi de commande est l'un des aspects les plus importants et les plus complexes dans la conception des convertisseurs statiques. Les principaux objectifs du contrôle de convertisseur boost entrelacés sont :

- Maintenir la tension de sortie du convertisseur V_0 à sa valeur de référence.
- Assurer une répartition équilibrée du courant entre les différentes phases.

- Satisfaire la demande de la charge tout en assurant une dynamique rapide.
- Faible sensibilité à la variation des paramètres.

Dans le but de satisfaire ces objectifs, nous avons développé une stratégie de commande à savoir, la commande classique basée sur des correcteurs PI [23].

III.5. Commande du convertisseur boost entrelacé à deux bras

Dans ce titre, nous étudierons la méthode de la commande classique de régulateur PI pour un convertisseur boost entrelacé. Le circuit électrique du convertisseur Boost entrelacé est présenté par la figure (III.2)

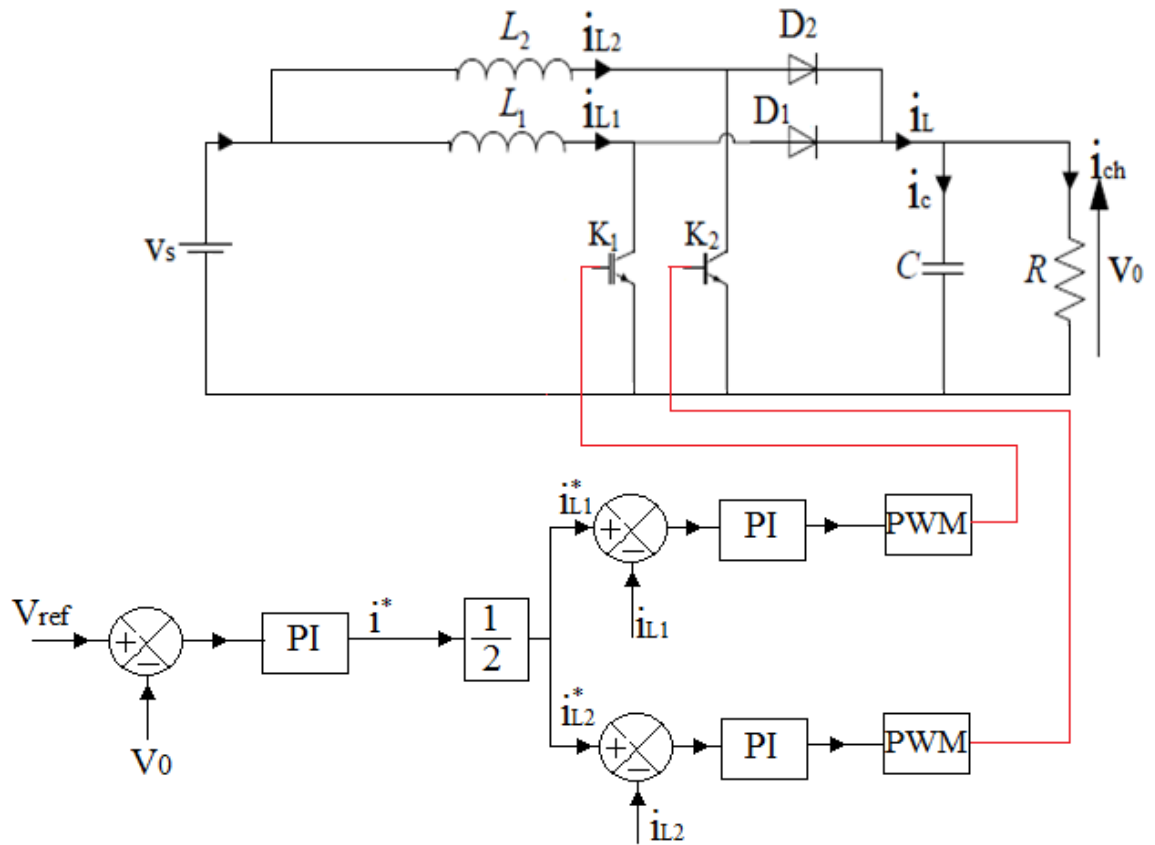


Fig. (III.2): Schéma global de la commande du convertisseur boost entrelacé à deux bras.

III.5.1. régulateur des courants des bras

Afin d’assurer l’équilibrage des courants des bras, le courant de chaque bras est contrôlé en boucle fermée en utilisant un correcteur de type PI comme le représente la figure (III.4). Ce dernier permet de corriger l’erreur entre les courants mesurés i_{L1} et i_{L2} traversant les bobines L_1 et L_1 et leur référence $(\frac{i^*}{2})$ imposée par la boucle externe de la tension de sortie du convertisseur.

La figure (III.4) représente le schéma de régulation du courant de la bobine avec un correcteur PI

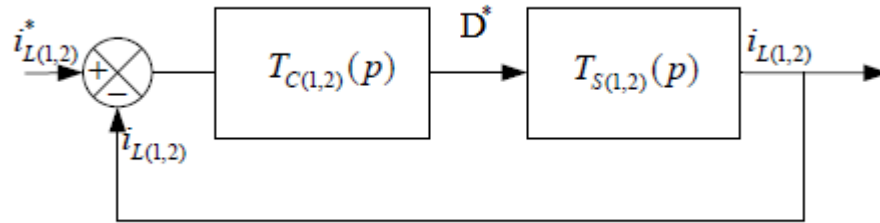


Fig. (III.3): Schéma de régulation du courant dans une bobine par un3 régulateur PI [3].

Où R_L représente la résistance interne de la bobine.

A partir du schéma de la figure (III.4), la fonction de transfert en boucle ouvert de la boucle de courant s’écrit :

$$T_{s1} = (\frac{K_{pi}}{L} p + \frac{K_{ii}}{L}) / (p^2 + \frac{K_{pi}}{L} p + \frac{T_{ii}}{L}) \tag{III.14}$$

L’identification de la fonction de transfert en boucle fermée avec celle d’un système de deuxième ordre conduit à :

$$\begin{cases} k_{pi} = 2\varepsilon_i w_{ni} - R_L \\ T_{ii} = Lw_{ni}^2 \end{cases} \tag{III.15}$$

Où, ε_v , w_{nv} représentent respectivement le facteur d’amortissement et la pulsation du système. Enfin, les rapports cycliques D1 et D2 assurant l’équilibrage des courants des bras [3].

III.5.2. régulateur de la tension de sortie du convertisseur boost entrelacé

Un régulateur du type PI dont la fonction de transfert est symbolisée par $T_c(p)$ est retenu comme correcteur pour la boucle de tension.

La fonction de transfert correspondante est donnée par :

$$T_c(p) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{p} \quad (III.10)$$

Où : p est l'opérateur de Laplace.

La figure (III.3) représente la boucle de régulation de la tension sortie du convertisseur avec un correcteur PI :

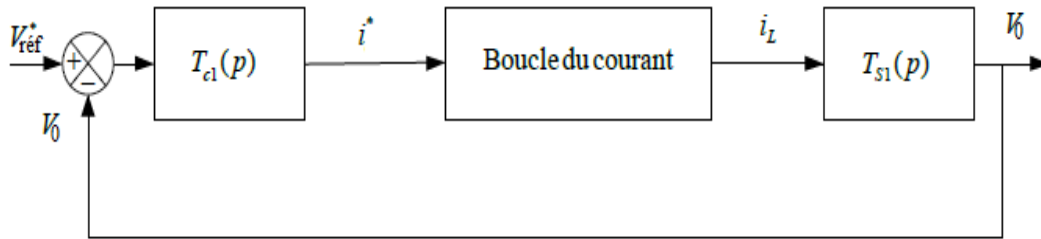


Fig. (III.4): Schéma de régulation de la tension par un PI.

A partir du schéma de la figure (III.3), l'utilisation de modèle de petits signaux nous donne la fonction de transfert en boucle ouvert de la boucle de tension suivant :

$$T_{s2} = \frac{1-D}{Cp + \frac{1}{R}} \quad (III.11)$$

La boucle de courant rapide peut corriger l'erreur de réglage rapidement, par conséquent, dans la conception de la boucle de tension, la dynamique de la boucle interne peut être négligée [3].

III.6. Simulation du système PaC- IBC

La figure III.5 représente le schéma de la simulation de l'IBC à deux phases alimentée par une PaC et contrôlé par une boucle de contrôle de tension et deux boucles internes de contrôle de courants de chaque bras utilisant les régulateurs PI.

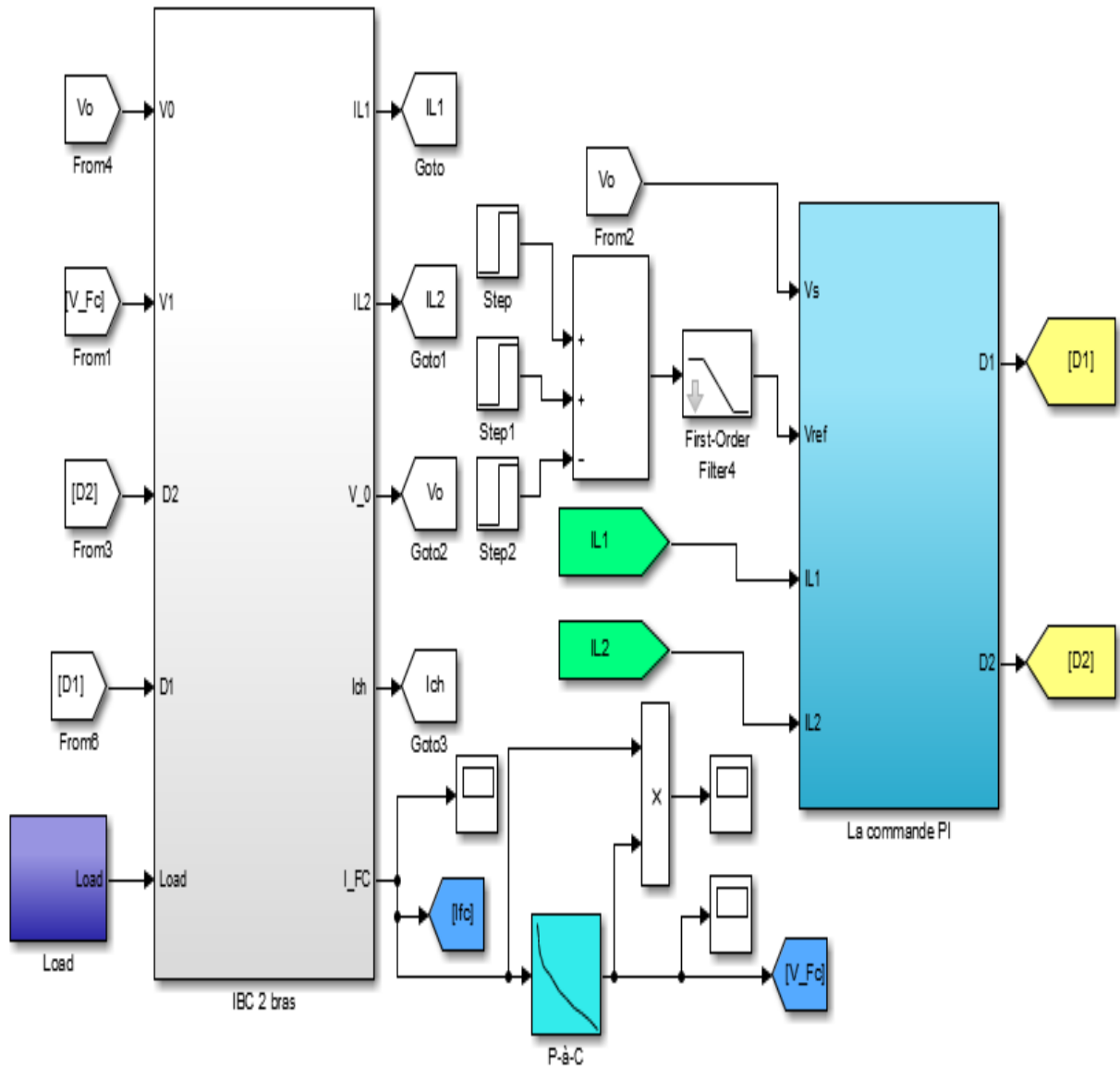


Fig. (III.5) : Graphique de système IBC en MATLAB.

Et en présenter la partie de la commande comme la figure (III.6)

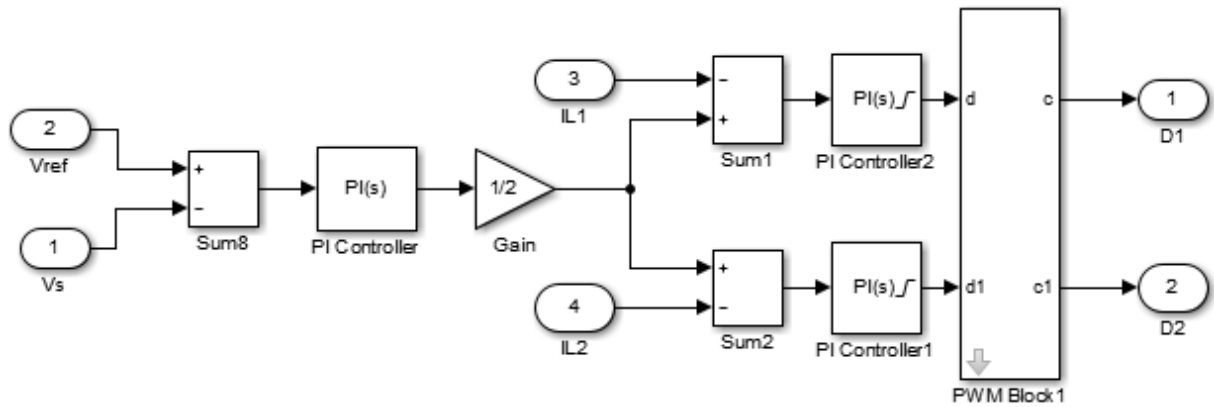


Fig.III.6 : Partie de commande PI en MATLAB.

Paramètre de l'IBC à 2bras	
V_s	100 V
f_s	50 KHz
R_L	0.2Ω
L_1, L_2	8.33×10^{-4}
C	1.8×10^{-4}
R	50 Ω

Tableau III.1 : Paramètre de l'IBC à 2bras

Paramètre de régulateur PI	
ϵ_i	1
w_{ni}	3500 rad/s
ϵ_v	1
w_{nv}	1000 rad/s

Tableau III.2 : paramètre de régulateur

III.6.1. Test de poursuite de tension de bus continu :

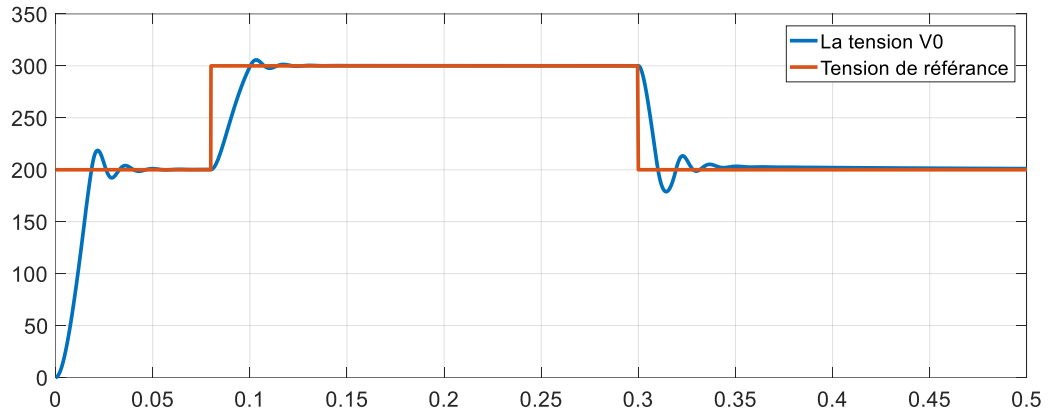


Fig. III.7 : Tension de sortie V_0 du convertisseur boost entrelacé lors d'un changement de référence.

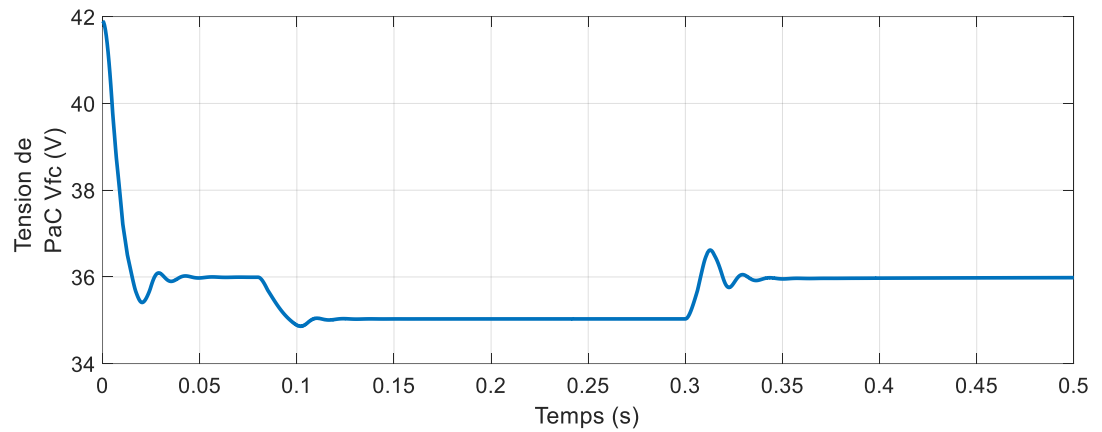


Fig.III.8 : Tension de la pile à combustible V_s .

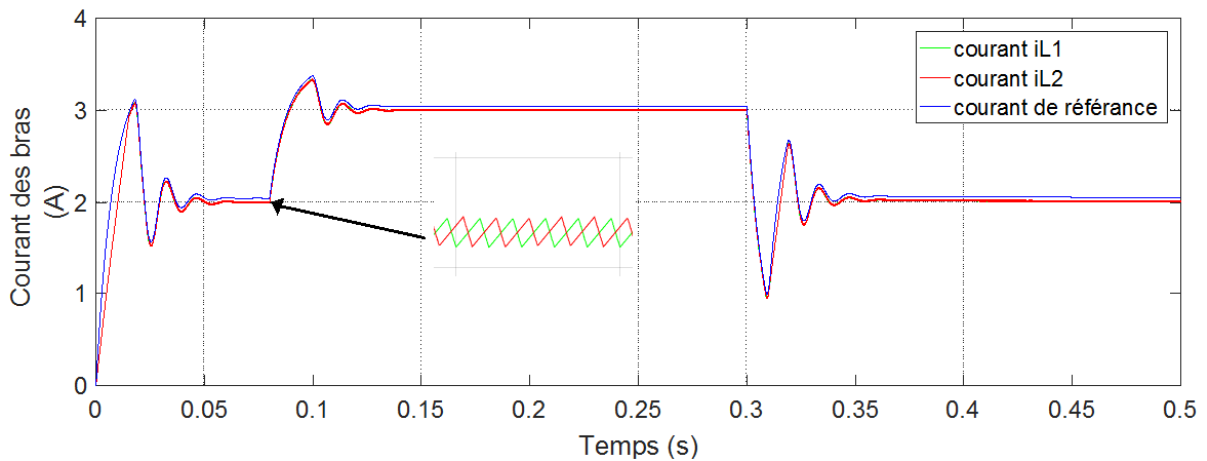


Fig.III.9 : Courants des bras du convertisseur boost entrelacé.

Pour le teste de bus continu. Les figures(III.7), (III.8), (III.9) ils représentée la variation de tension de sortie de convertisseur et la tension de pile à combustible et le courant des bras de convertisseur.

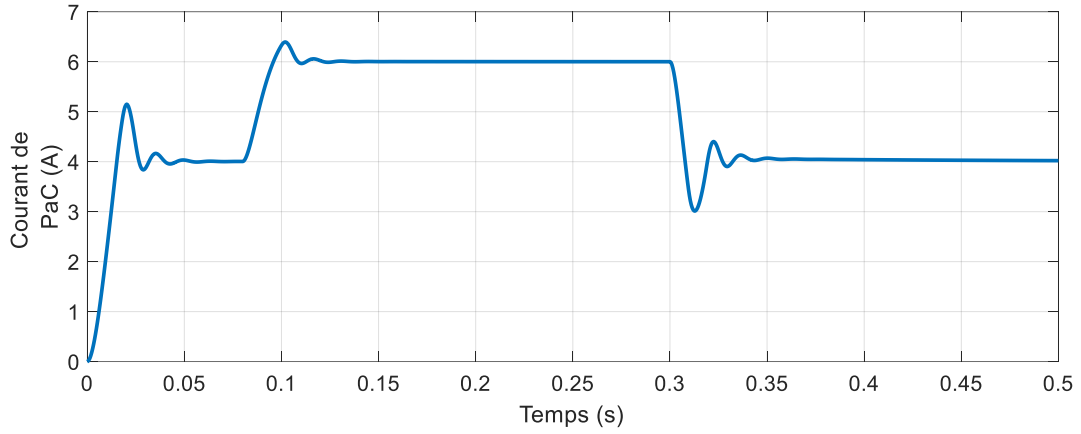


Fig.III.10 : Courant de la pile à combustible(i_{Fc}).

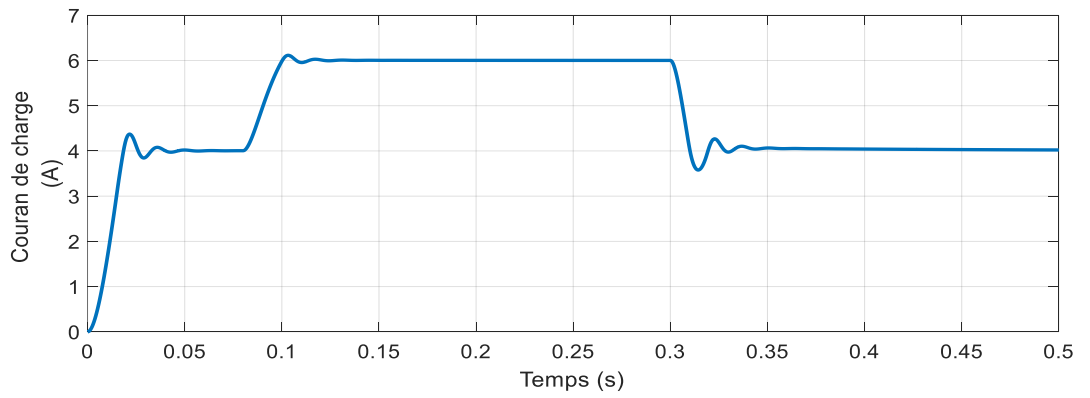


Fig.III.11 : Courant de la charge(i_{ch}).

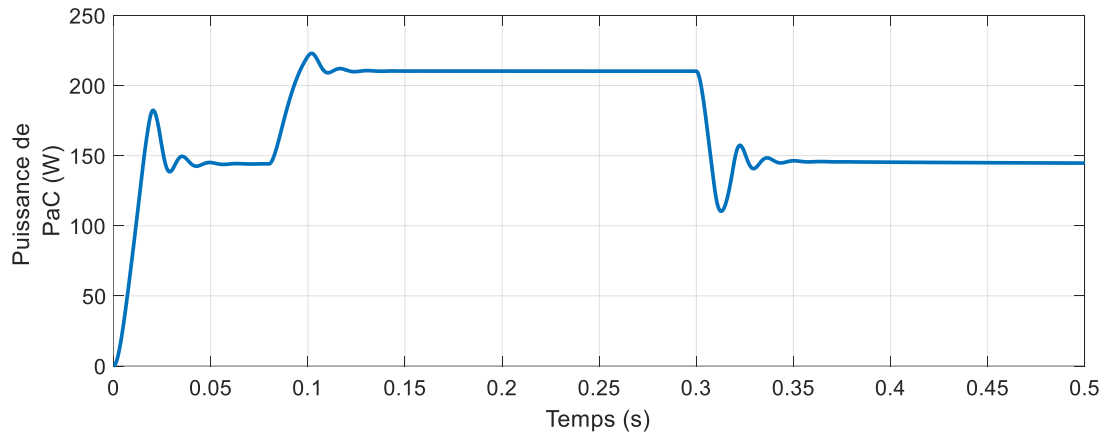


Fig.III.12 : Puissance de la pile à combustible.

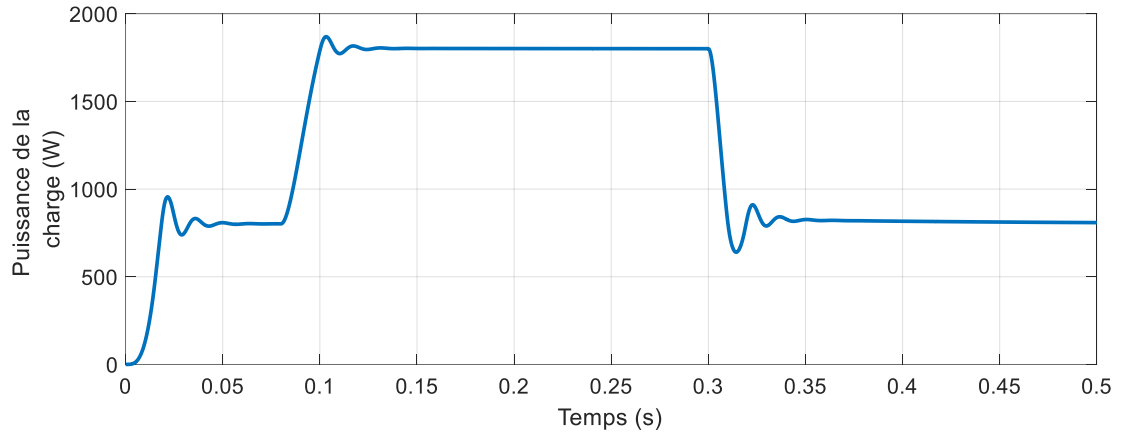


Fig.III.13 : La puissance de la charge.

III.6.2. Test pour variation de la charge :

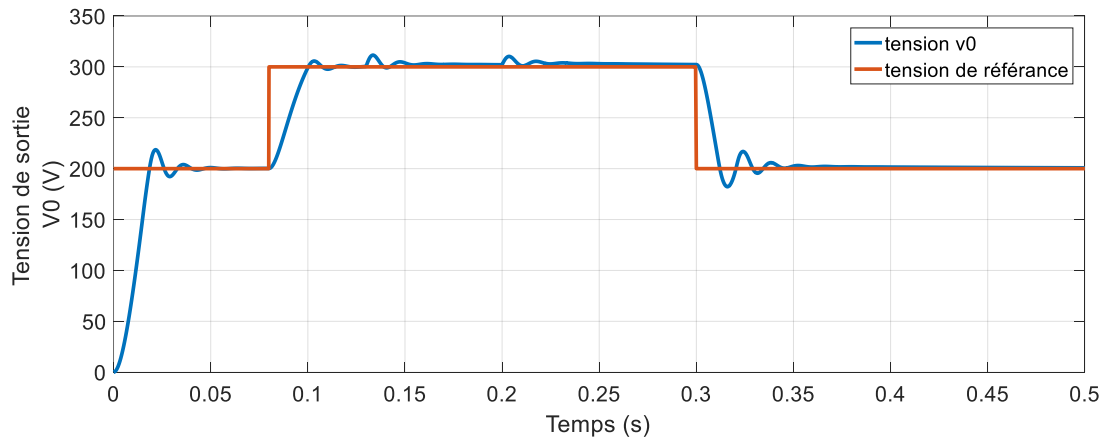


Fig.III.14 : Tension de sortie V_0 du convertisseur boost entrelacé lors d'une variation de la charge et changement de référence.

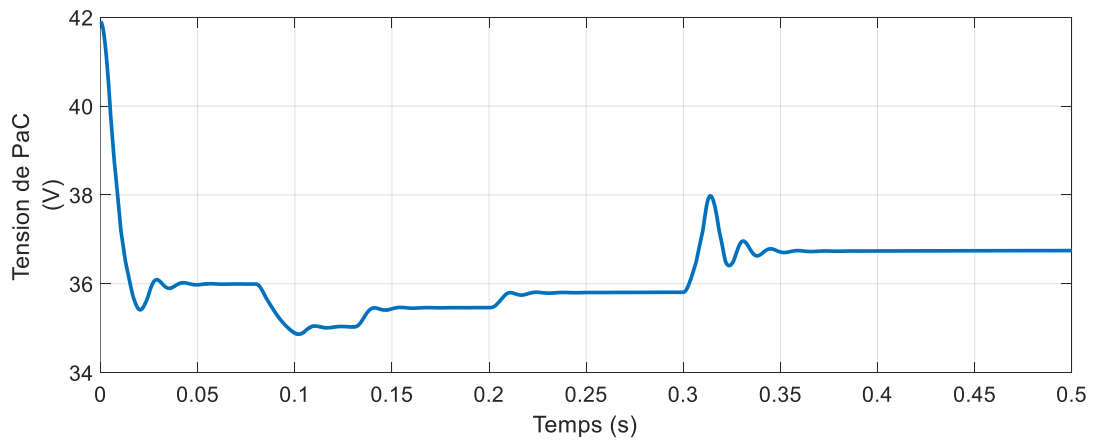


Fig.III.15 : Tension de la pile à combustible Vs d'une variation de la charge.

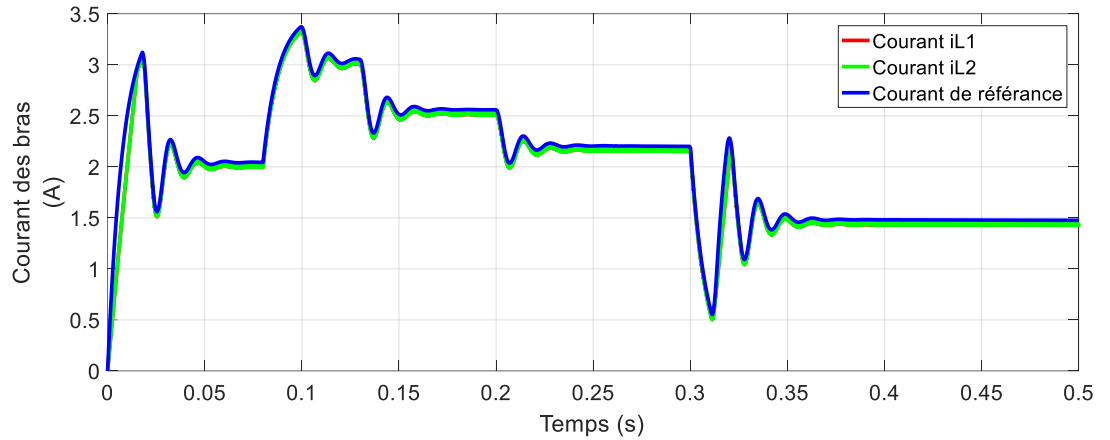


Fig.III.16 : Courants des bras du convertisseur boost entrelacé lors d’une variation de la charge.

Pour le teste de charge variable. Les figures(III.14), (III.15), (III.16) ils représentée la variation de tension de sortie de convertisseur et la tension de pile à combustible et le courant des bras de convertisseur.

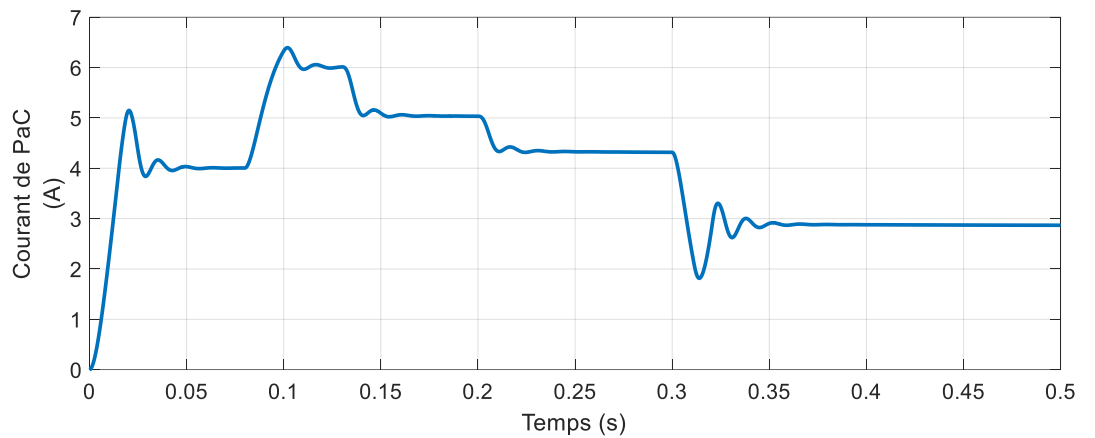


Fig.III.17: Courant de la pile à combustible pour charge variable (i_{Fc}).

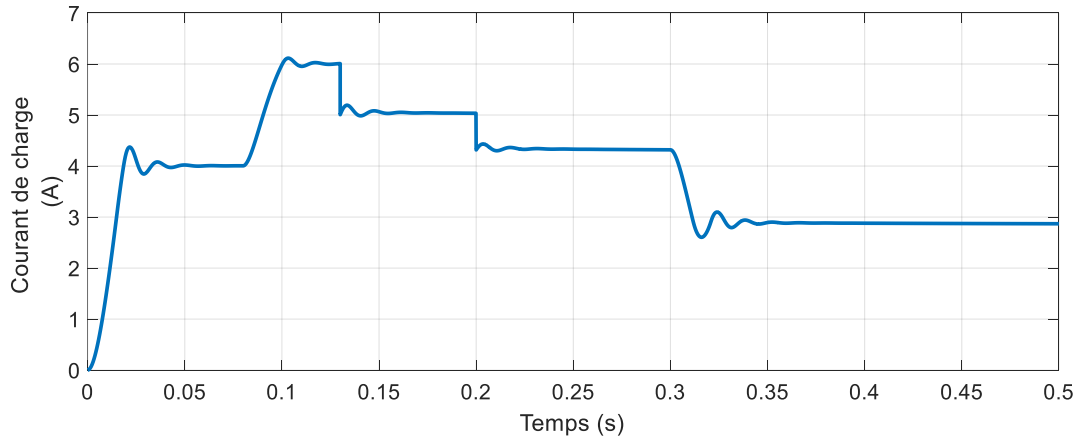


Fig.III.18 : Courant de la charge variable (i_{ch}).

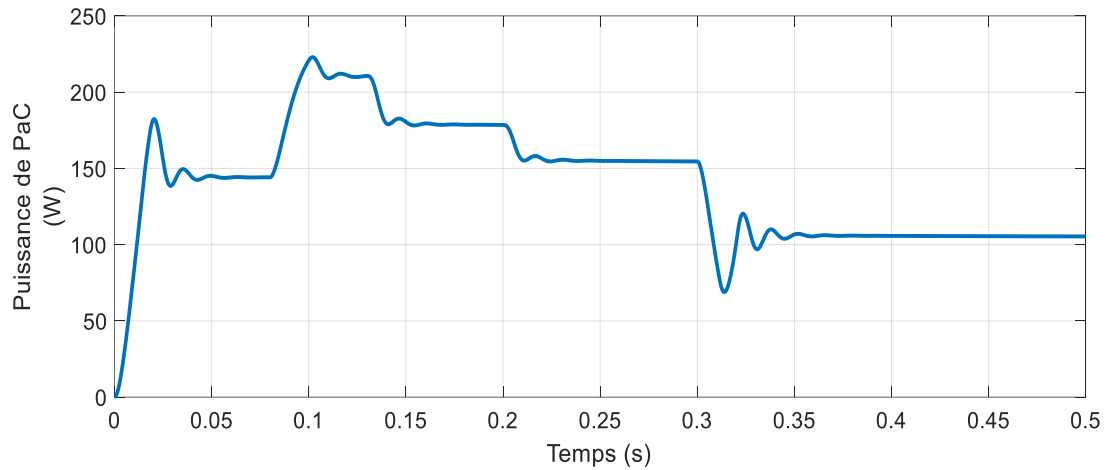


Fig.III.19 : Puissance de la pile à combustible pour charge variable.

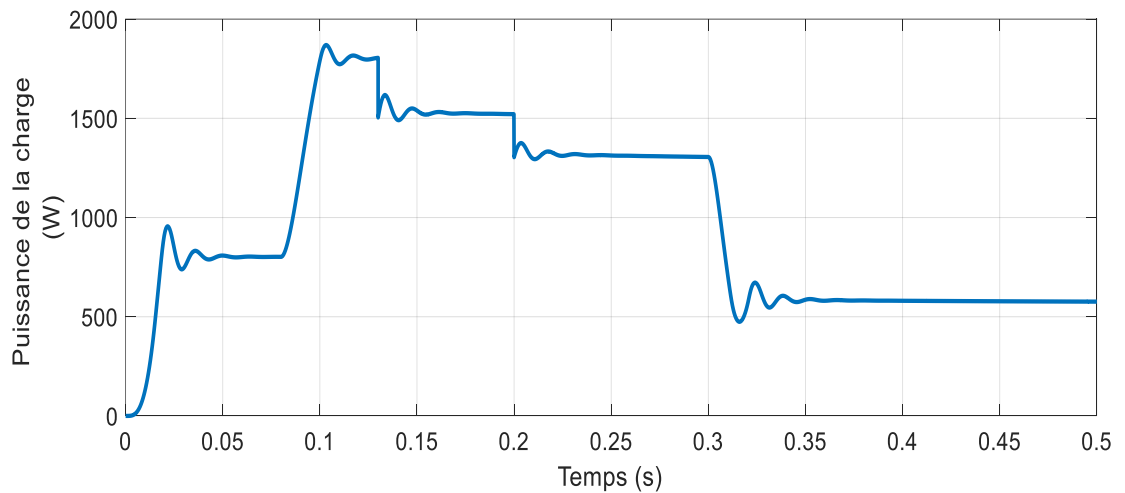


Fig.III.20 : La puissance de la charge variable.

Comme on peut le voir dans la figure (III.10), les courants des bras sont bien équilibrés, Cela confirme l'exactitude du régulateur de commande.

Et en remarque que la tension de sortie de convertisseur et suivi bien la tension de référence lors du changement de consigne dans le temps (0.08 et 0.3)

Dans les figure(III.12),(III.13) en remarque la différence entre la puissance de la pile à combustible et la puissance de charge.

Comme on peut le voir dans la figure (III.17), les courants des bras sont bien équilibrés, Cela confirme l'exactitude du régulateur de commande et suivi bien le courant de référence lors du changement de consigne dans le temps (0.08 et 0.3) et changement de la charge dans le temps (0.14 et 0.23), et en remarque que la tension de sortie de convertisseur et suivi bien la tension de référence lors du changement de consigne dans le temps (0.08 et 0.3) et le changement de la charge dans le temps (0.14 et 0.23), dans les figure(III.19),(III.20) et comme nous avons déjà noté en remarque la différence entre la puissance de la pile à combustible et la puissance de charge

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de commande de convertisseur boost entrelacée à deux bras par la régulateur PI, avec cette commande, la qualité des performances en régimes statique et dynamique est assurée.

L'objectif est d'atteindre un certain niveau de performance une bonne précision, vitesse, et bonne rendement.

Conclusion générale

Les travaux effectués lors de cet mémoire se sont focalisés sur les applications d'une techniques d'automatique avancées à des problématiques actuelles de génie électrique et plus précisément à la commande d'un convertisseur DC-DC de type IBC à deux bras pour les applications pile à combustible.

Afin de situer au mieux notre contribution, un état de l'art a été présenté dans le premier chapitre.

Nous avons d'abord rappelé quelques généralités sur les piles à combustibles, puis une étude sur les convertisseurs DC-DC basse tension et plus particulièrement de type IBC.

L'exploitation de la technique des petits signaux , a nous permet de linéariser notre système étudier autour ces points de fonctionnement . En ce basant sur le régulateur de commande PI, un contrôleur robuste a été construit pour la boucle externe de tension et deux boucle interne de courant.

Les résultats de simulations montrent l'efficacité et les bonne performance (temps de réponse, précise) de la commande proposée.

futurs travaux :

- Modélisation et simulation du convertisseur de convertisseur boost entrelacée à deux bras.
- L'utilisation de la commandes de régulateur PI pour suivi le système PaC-IBC ..

Références Bibliographique

- [1] B.Huang, Convertisseur continu-Continu a rapport de transformation eleve pour applications pile à combustible, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [2] B.Viet Dang, Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [3] Z.Anwar et G.Eddine, Simulation par PIL de la commande par mode glissant de deux convertisseurs buck et boost entrelacés, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019.
- [4] B.Souhaila, Commande en Courant par Hystérésis Numérique pour les Systèmes de l'électronique de Puissance, Université Ferhat Abbas-setif, 2008.
- [5] B.Mohamed Samir, Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque, école supérieure en sciences appliquées, école supérieure en sciences appliquées-Tlemcen, 2020.
- [6] N.Yakoub. Thème. Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC. Université Ferhat Abbas-setif, 2014.
- [7] <https://fr.jf-parede.pt/how-boost-converters-work> .
- [8] <http://couleur-science.eu/?d=775902--cest-quoi-un-transistor-comment-ca-marc>.
- [9] https://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/knowledge/faq/mosfet_igbt/igbt-002.html
- [10] <https://fr.wikiversity.org/wiki/Transistor/Transistor.MOSFET> Transistor à effet de champ (à grille) métal-oxyde.
- [11] B.Ala Eddine, Contribution à la commande d'un convertisseur DC/DC pour l'application pile à combustible, Université Mohamed khider-Biskra, 2016.

- [12] S.RAMZI, Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V) ; Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible, Université Mohamed khider-Biskra, 2015.
- [13] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-pile-combustible-3652>
- [14] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-combustible>
- [15] B.Mueedh, Robust Control of a Multi-phase Interleaved Boost Converter for Photovoltaic Application using μ -Synthesis Approach, Alharbi University of Arkansas, Fayetteville, 2020.
- [16] Y.Phyo et T.Lin Naing. Modeling and Simulation of Two-Phase Interleaved Boost Converter Using Open-Source Software Scilab/Xcos, World Academy of Science, 2018.
- [17] H.Habiba et H.Amina, Commande et réalisation d'un convertisseur DC-DC. (Boost) entrelacé à deux phases, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2021.
- [18] H.F. Fuzato, Cassius R. Aguiar, Renan F. Bastos, Ricardo Q. Machado, Evaluation of an interleaved boost converter powered by fuel cells and connected to the grid via voltage source, inverter, IET Journal the institution of engineering and technology, 2018.
- [19] A.Bilal, Modélisation, observabilité et commande de convertisseurs multicellulaires parallèles dans un environnement dédié, École Doctorale Cergy Pontoise, 2013.
- [20] (en) Holmes, Pulse width modulation for power converters: Principles and practice, John Wiley & Sons, 2003.

- [21] P.Djondiné, Étude des comportements chaotiques dans les convertisseurs statiques à l'Université de Cergy - Pontoise École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications, 2015.
- [22] B.Belkacem et L.Mohammed, Commande par backstepping d'un convertisseur DC-DC entrelacé, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019.
- [23] Y.Mohamed Omar, Conception et commande d'un convertisseur de puissance entrelacé embarqué dans un véhicule hybride/électrique, Université de Lorraine Faculté des Sciences et Technologies, 2013.