

# 直並列補償方式を用いた 燃料電池用 DC-DC コンバータの構成と制御法

折川 幸司 伊東 淳一

長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1  
E-mail: orikawa@stn.nagaokaut.ac.jp, itoh@vos.nagaokaut.ac.jp

## あらまし

本論文ではバッテリーと燃料電池のハイブリッド電源用の DC-DC コンバータを提案する。定常時は、燃料電池電圧と出力電圧の差分電圧のみを直列コンバータが直列補償することにより、高効率で負荷へエネルギーを供給する。一方、負荷変動時には、バッテリーが負荷の増減に伴う急峻な電力変化を補償し、燃料電池の出力電流応答をゆるやかにするように並列コンバータを制御する。

シミュレーションと実験により負荷変動時の提案回路の良好な動作を確認し、直列補償時において最高効率 96.7%を得たので、報告する。

**キーワード** 燃料電池, DC-DC コンバータ, 直列補償, 並列補償

## Circuit Configuration and Control Method of a Series-Parallel Compensation Type DC-DC Converter for Fuel Cell

Koji ORIKAWA Jun-ichi ITOH

Nagaoka University of Technology 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan  
E-mail: orikawa@stn.nagaokaut.ac.jp, itoh@vos.nagaokaut.ac.jp

## Abstract

This paper proposes a novel DC-DC converter for hybrid system using both fuel cell and battery as power supplies. The output voltage is controlled by the series converter regulates only difference voltage from fuel cell voltage to reference when output power is constant. As a result, the proposed circuit supplies power to load at high efficiency. When load condition is changed, the fuel cell current fluctuation is suppressed by the battery through the parallel converter operation.

The principle and control method of the proposed circuit is described in this paper. In addition, the valid of the proposed circuit are confirmed with experiment and simulation results.

**Keyword** Fuel cells, DC-DC converter, Series compensation, Parallel compensation

# 1. はじめに

近年、バッテリーを用いた携帯機器の高性能、高機能化が進み、携帯機器の電力消費が大きくなっている。その一方で、長時間動作への要求が高まっている。そこで、従来のバッテリーよりも長時間運転が可能な燃料電池の携帯機器への利用が検討されている。しかし、燃料電池は自分自身で出力電力を負荷に応じて高速に制御することは難しい。そこで、バッテリーにより負荷変動や始動時のエネルギー補償を行い、燃料電池は定常的にエネルギーを供給する、バッテリーと燃料電池のハイブリッドシステムの研究が盛んに行われている<sup>(1)(2)</sup>。システムに要求されることとして、高効率、小型、燃料電池の電力変動を小さくすることがあげられる。特に燃料電池の電力変動が大きいと燃料電池の寿命が著しく劣化する。

このような回路としては、例えば、2電源の間にDC-DCコンバータを接続し、負荷に応じて2電源間のパワーフローを制御し、バッテリーもしくは燃料電池から直接負荷に電力を供給する方式が簡単である<sup>(3)</sup>。しかし、この方式は出力電圧がバッテリーもしくは燃料電池の電圧に依存するため、回路設計が制限される問題がある。

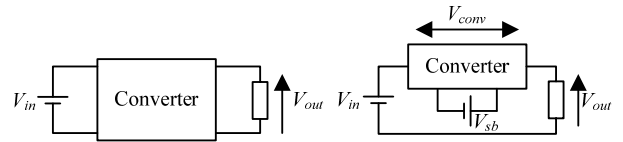
本論文では、高効率でかつ、負荷が変動しても、燃料電池の電力変動をゆるやかに保つことができる電力システムを実現することを目的として、直並列補償方式の燃料電池用DC-DCコンバータを提案する。従来では入出力電圧の関係にかかわらず全電力を変換するが、本方式では直列コンバータにより入出力の差分電圧のみを入力電圧に直列補償するため、直列コンバータの容量を小さくすることができ、小型化、高効率化できる。一方、負荷変動に対しては並列コンバータによって、負荷電力の増減に伴って燃料電池の電流を補償する。このような考え方は交流の無停電電源装置では提案されている<sup>(4)(5)</sup>が燃料電池とバッテリーを有する2電源のDC-DCコンバータ<sup>(6)</sup>への応用は著者らの知る限りない。本論文では直列補償方式と並列補償方式の原理について述べ、シミュレーションと実験により動作を確認した。その結果、直列補償については、効率の改善効果を確認し、並列補償については、負荷変動が起きても入力電流をわずかな変動に抑えられ、ゆるやかに変化させられることを確認したので報告する。

# 2. 原理

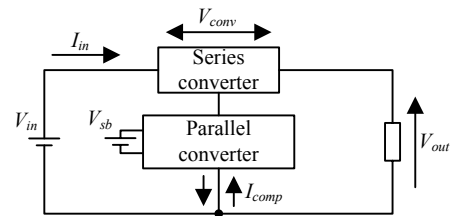
## 2.1. 直列補償方式

図1(a)に従来の昇降圧チョップ回路の概念図を示す。従来の回路構成では、入力電圧と出力電圧の関係にかかわらず出力に必要な全電力を変換するため、効率が悪化する。

図1(b)に直列補償方式コンバータの概念を示す。燃料電池に直列にコンバータを接続し、燃料電池電圧と目標出力電圧の差分の電圧のみをコンバータが出力する。そのため、特に燃料電池電圧と目標出力電圧に近い領域では、直列コンバータの出力電圧と出力電力は小さく、変換器容量が小さいのでたとえ効率が悪くて



(a)Conventional topology. (b)Series compensation topology.



(c)Proposed topology.

図1 回路構成

Fig. 1. Construction of conventional, series compensation and proposed circuit.

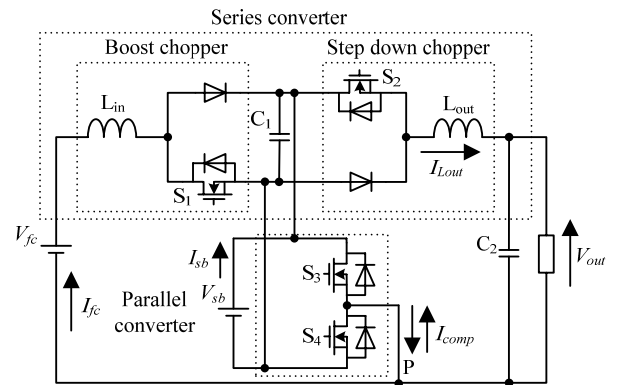
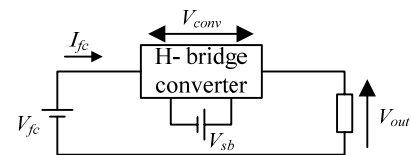
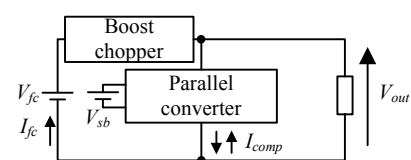


図2 提案回路

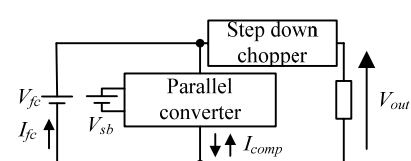
Fig. 2. Proposed circuit.



(a)Series compensation mode.



(b)Boost mode (Load change).



(c)Step down mode (Load change).

図3 各モード時の等価ブロック図

Fig. 3. Block diagram of proposed circuit.

も損失が小さくなるので高効率が得られる。その一方、燃料電池と負荷を直列に接続するため、負荷電流の変動はそのまま入力電流の変動となる。その結果、燃料電池の内部インピーダンスにより電圧変動が生じる。また、負荷変動に伴うリップル電流は燃料電池の寿命にも悪影響を与える。

## 2.2. 直並列補償方式

図 1(c)に本論文で提案する直並列補償方式回路の概念を示す。提案方式は直列補償方式回路に、並列コンバータを燃料電池と並列に接続する。定常時には並列コンバータを停止して、直列補償方式回路として高効率に昇降圧し、負荷変動時には燃料電池の電流を急変させないように並列コンバータで電流補償をする。負荷の急速な増減に伴う電力は、バッテリーが補償する。

## 3. 提案回路の構成

図 2 に本論文で提案する直並列補償方式を実現する具体的回路例を示す。直列コンバータに、昇圧チョップパと降圧チョップパを用いる。燃料電池と並列に接続した並列コンバータの出力は、燃料電池のグラウンドに接続する。

図 3(a)は直列補償時の等価ブロック図を示している。定常時では直列コンバータのみを動作させ、差分電圧の直列補償をする。図 3(b)に昇圧時、(c)に降圧時の負荷変動時の等価ブロック図を示す。負荷変動時には、並列コンバータを動作させ、直列コンバータで電圧制御を行い、並列コンバータで電流制御を行う。また、燃料電池からバッテリーへの突入電流を防止するためバッテリー電圧  $V_{sb}$  は燃料電池電圧  $V_{fc}$  および出力電圧  $V_{out}$  よりも大きい必要がある。

## 4. 提案回路の制御法

図 4 に、提案回路の制御ブロック図を示す。提案回路の制御は、燃料電池電流制御と並列コンバータ電流制御の 2 つのインナーループと出力電圧制御のアウトーループで構成する。制御器には、PI 制御器を用いる。この提案手法では、定常時には並列コンバータは動作しない。直列コンバータの制御は、燃料電池電圧と目標出力電圧の大小関係を求め昇降圧を切り替える。以下に詳細を述べる。

### 4.1. 直列コンバータの制御法

#### 4.1.1. 昇圧時

定常時は、並列コンバータを構成する 1 レグを常時オフとし、直列コンバータのみ動作させる。この場合、直列コンバータは昇圧チョップパとして動作する。昇圧する場合、 $S_2$  を常時オンとし、 $S_1$  をスイッチングして差分電圧の直列補償を行う。このとき、昇圧時は  $V_{out} > V_{fc}$  となるためバッテリーは負荷へと電力供給する。

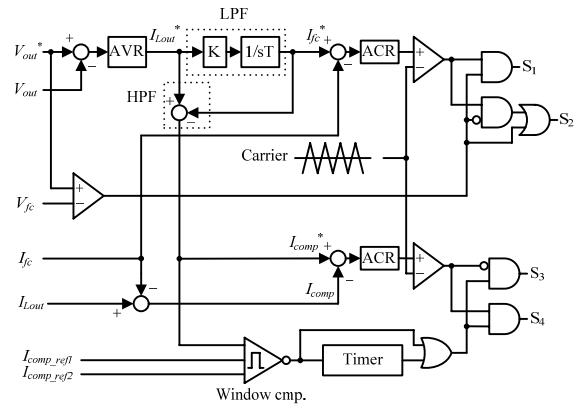


図 4 制御ブロック図

Fig. 4. Control diagrams.

#### 4.1.2. 降圧時

降圧する場合、直列コンバータは降圧チョップパとして動作させる。具体的には  $S_1$  を常時オフとし、 $S_2$  をスイッチングする。このとき、降圧時は  $V_{out} < V_{fc}$  となるためバッテリーは燃料電池から電力を充電する。

### 4.2. 並列コンバータの制御法

出力電圧制御は出力電流指令値  $I_{Lout}^*$  を生成する。燃料電池電流制御ループにはローパスフィルタを挿入し、負荷変動時に、出力電流指令値  $I_{Lout}^*$  からゆるやかな変化をする燃料電池電流指令値  $I_{fc}^*$  を生成する。一方、並列コンバータ電流制御ループにはハイパスフィルタを挿入し、負荷変動時に、出力電流指令値  $I_{Lout}^*$  から急峻な変化をする並列コンバータ電流指令値  $I_{comp}^*$  を生成する。なお、フィルタは出力電圧制御の応答には影響しない。理由を以下に述べる。図 2 において、交点 P について各電流の関係を考えると(1)式で表される。また、燃料電池電流指令値  $I_{fc}^*$  と並列コンバータ電流指令値  $I_{comp}^*$  はそれぞれ(2), (3)式で表される。

$$I_{Lout} = I_{fc} + I_{comp} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{fc}^* = \frac{1}{1+sT} I_{Lout}^* \dots\dots\dots (2)$$

$$I_{comp}^* = \frac{sT}{1+sT} I_{Lout}^* \dots\dots\dots (3)$$

このとき、燃料電池電流及び並列コンバータ電流制御の応答、すなわち、電流指令から電流までの伝達関数をそれぞれ  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  とおけば、出力電流  $I_{Lout}$  は(4)式で求められる。

$$I_{Lout} = G_1(s)I_{fc}^* + G_2(s)I_{comp}^* \dots\dots\dots (4)$$

燃料電池電流と並列コンバータ電流の応答を同じに設計することで、 $G_1(s)=G_2(s)=G(s)$  となり (2), (3), (4)式より出力電流  $I_{Lout}$  が(5)式で求められる。

$$I_{Lout} = G(s)I_{Lout}^* \dots\dots\dots(5)$$

よって、出力電流応答は燃料電池電流制御と並列コンバータ電流制御の応答と同じ応答になる。つまり、出力電流および出力電圧の制御にはローパスフィルタの影響が現れない。

並列コンバータの動作は、並列コンバータ電流指令値  $I_{comp}^*$  の変化を検出することによって開始する。負荷変動後負荷が安定しているにもかかわらず、並列コンバータを動作させると効率の悪化の原因となるため、並列コンバータの動作はタイマによって終了させ、直列補償のみを行う。タイマの時間は、定常値が燃料電池電流の出力とほぼ一致するまでの時間とし、ローパスフィルタの時定数の3倍から5倍程度に設定する。

図3(b), (c)に昇圧時と降圧時の並列コンバータの動作を示す。並列コンバータは、昇圧時負荷に並列に接続され、負荷の電流変動を補償する。一方、降圧時は燃料電池に並列に接続され、燃料電池電流の変動を直接補償する。

## 5. 動作検証

### 5.1. 実験による直列補償動作の検証

図5に、直列補償回路の実験回路を示す。実験回路は、提案回路の入力のリアクトルと出力のリアクトルを合成し、 $L_{out}$ としている。

図6に、図5の回路の昇圧時および降圧時それぞれのリアクトル電流波形、差分電圧波形を示す。実験条件は、スイッチング周波数を100[kHz]、出力電圧を7.2[V]、負荷10[W]とした。差分電圧波形は実際、PWM波形となるが、ここではカットオフ周波数5.4[kHz]のローパスフィルタを介して直流分を測定した。昇圧時と降圧時とで、差分電圧  $V_{conv}$  の極性が切り替わっているため、良好な差分電圧の直列補償を確認できる。

### 5.2. 直列補償時の効率

図7に、直列コンバータであるHブリッジ形コンバータ単体での効率を示す。 $V_{sb}$ を一定とし、出力電圧を変化させた。負荷は5.1[Ω]とした。出力電力の増加とともに、効率も損失も増加している。

図8に直列補償時の効率を示す。実験条件は、出力電圧を7.2[V]とし、燃料電池電圧を変化させたときの効率を表している。狙い通り燃料電池電圧と出力電圧が近い領域で最高効率96.7[%]が得られた。なお、差分電圧が大きい領域で効率が上昇しているのは、直列コンバータの出力電力が大きくなり、図7に示した通り、直列コンバータ単体の効率が上昇しているためである。

### 5.3. シミュレーションによる並列補償動作の検証

図9(a)に提案回路の昇圧時の負荷変動時のシミュレーション結果を示す。表1にシミュレーション条件を

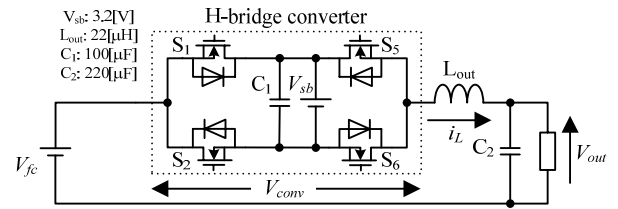
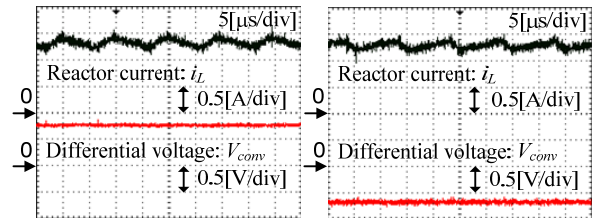


図5 実験回路

Fig. 5. Experimental circuit.



(a)Boost mode. (b)Step down mode.

図6 直列補償回路の動作波形

Fig. 6. Operation waveforms of the series converter.

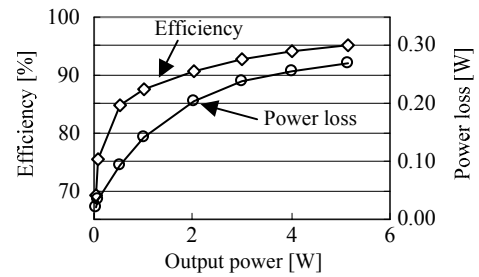


図7 直列コンバータ単体効率出力電力特性

Fig. 7. Output power characteristics of the series without parallel compensation.

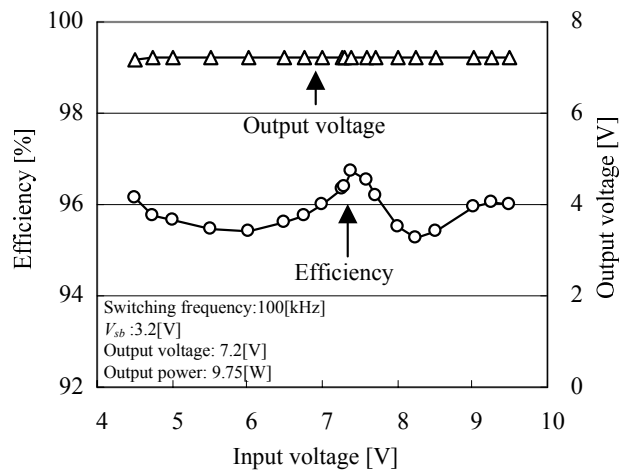


図8 直列補償時の効率

Fig. 8. Efficiency of the proposed circuit (series compensation mode).

示す。負荷条件は、10[ms]の時に出力電力を25[W]から40[W]に増加させた。また、入力電流補償は20[ms]

で終了させている。なお、バッテリー電流はフィルタを設けないと実際 PWM 波形となるが、カットオフ周波数 10[kHz]のローパスフィルタを介して測定した。図 9(a)より、提案手法では負荷が変動しても入力電流をわずかな変動に抑えられ、ゆるやかに変化させられるのが確認できる。また、その間、並列コンバータが動作し、バッテリーが電力を補償しているのが確認できる。入力電流を出力電流と等しくなるまで制御した後、並列コンバータの動作を終了させているが、入力電流、出力電圧に大きな変動は見られない。これは、負荷変動が起きて、再び直列補償が安定に動作できることを示している。

#### 5.4. 実験による並列補償動作の検証

##### 5.4.1. 出力電力増加時 昇圧モード

図 10(a)に、並列コンバータが動作していないときの提案回路の出力電力増加時の実験結果を示す。なお、ローパスフィルタの時定数は電流電圧の変化を観測しやすくするため、2.2[ms]に設定したが、実際には燃料電池の寿命を考慮し、もっと長い時間(数百[ms]から数[s])に設定する。また、負荷条件は、昇圧時で、出力電力を 5[W]から 15[W]に増加させた。図 10(a)より、出力電力が急変動すると、燃料電池の電流も急変動することを確認できる。さらに、電流オーバーシュートを生じている。また、負荷変動時出力電圧が 1[V]以上急峻に低下する。

図 10(b)に提案手法を用いた提案回路の昇圧時の出力電力増加時の実験結果を示す。表 2 に実験条件を示す。条件は、出力電力を 5[W]から 15[W]に増加させた。なお、ここでは並列コンバータによる補償効果を検証するため、並列コンバータは常時動作している。図 10(a)では燃料電池の電流変動が急峻であるのに対し、図 10(b)では燃料電池の電流がゆるやかに抑えられている。また、出力電圧の変動も約 5%以内に抑えられている。負荷変動時に、燃料電池の電流が一瞬小さくなるのは、並列コンバータ制御の PI 制御の積分値の初期値の影響を考慮していないためである。また、図 10(b)の入力電流、並列コンバータ電流、出力電圧の挙動は図 9(a)のシミュレーション結果ともほぼ一致している。よって、提案手法の良好な制御を確認できる。

##### 5.4.2. 出力電力減少時 昇圧モード

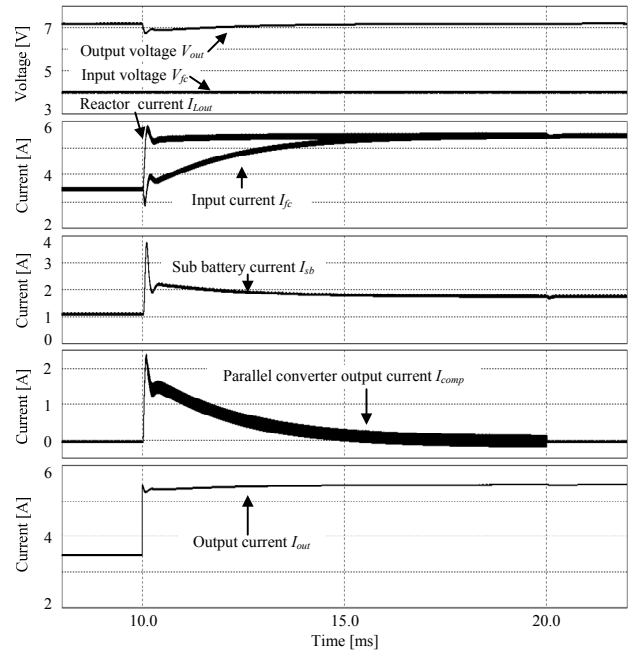
図 11(a)に、並列コンバータが停止しているときに出力電力が減少した時の実験結果を示す。条件は、昇圧時で、出力電力を 15[W]から 5[W]に減少させた。図 11(a)より、出力電力増加時同様、出力電力に応じて、燃料電池の電流も急変動することを確認できる。

図 11(b)に提案手法を用いた提案回路の昇圧時の出力電力減少時の実験結果を示す。実験条件は出力電力増加時と同じである。条件は、出力電力を 15[W]から

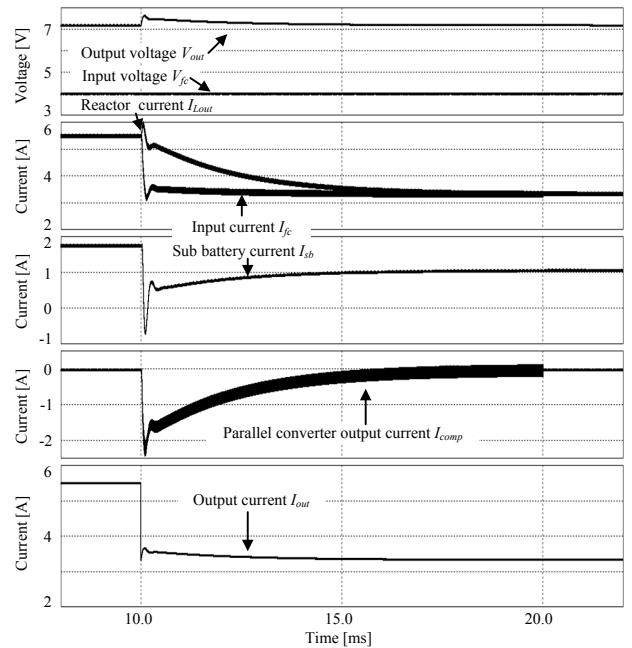
表 1 シミュレーション条件

Table 1. Condition of simulation.

Input voltage $V_{in}$ [V]	4,9	$L_{in}$ [ $\mu$ H]	100
Output voltage $V_{out}$ [V]	7.2	$L_{out}$ [ $\mu$ H]	100
Switching frequency $f_{sw}$ [kHz]	100	$C_1$ [ $\mu$ F]	100
ACR integration time [ms]	0.2	$C_2$ [ $\mu$ F]	220
AVR integration time [ms]	2		
LPF time constant [ms]	2		



(a)Output power increased.



(b)Output power decreased.

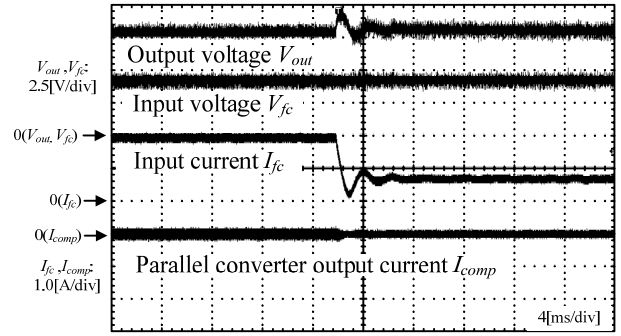
図 9 提案手法による負荷変動時のシミュレーション結果

Fig. 9. Simulation results with parallel compensation (Boost mode: Load current change occurs).

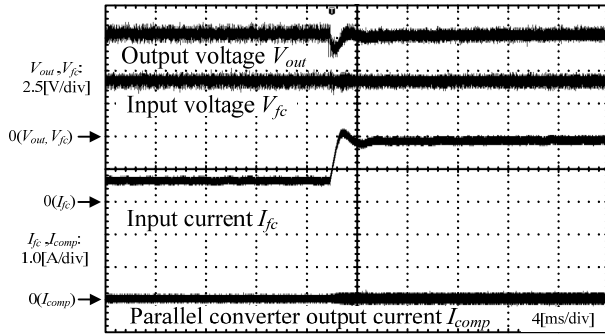
表 2 実験条件

Table 2. Condition of experiment.

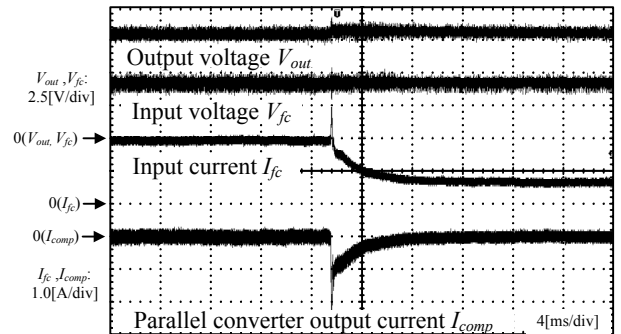
Input voltage $V_{in}$ [V]	4	$L_{in}$ [ $\mu$ H]	100
Output voltage $V_{out}$ [V]	7.2	$L_{out}$ [ $\mu$ H]	100
Switching frequency $f_{sw}$ [kHz]	100	$C_1$ [ $\mu$ F]	100
AVR integration time [ms]	22	$C_2$ [ $\mu$ F]	220
ACR integration time [ms] ( $I_{fc}$ control-loop)	0.22		
ACR integration time [ms] ( $I_{comp}$ control-loop)	0.022		
LPF time constant [ms]	2.2		



(a)With series compensation only.



(a)With series compensation only.

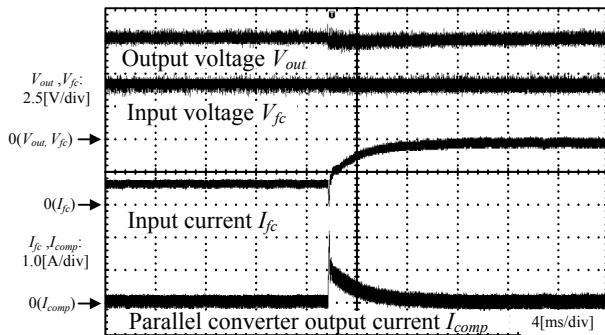


(b)With parallel compensation.

図 11 出力電力減少時の電圧電流波形

Fig. 11. Voltage waveforms and current waveforms

(Output power decreased).



(b)With parallel compensation.

図 10 出力電力増加時の電圧電流波形

Fig. 10. Voltage waveforms and current waveforms

(Output power increased).

5[W]に減少させた。出力電力増加時同様、提案手法の良好な制御を確認できる。

## 6. まとめ

本論文では、高効率で小型でかつ、燃料電池の長寿命化をはかる燃料電池用 DC-DC コンバータを実現することを目的として、定常時は直列コンバータのみで直列電圧補償を行い、負荷変動時は並列コンバータを用いて負荷電力の増減に伴って燃料電池の電流を並列補償する、直並列補償方式 DC-DC コンバータを提案し、提案手法の有効性を確認した。

実験では、提案回路の定常時の直列補償動作、効率を測定した。狙い通り、燃料電池電圧と目標出力電圧に近い領域で最高効率 96.7[%]が得られた。また、シミュレーションと実験により負荷変動時でも燃料電池の電流に大きな電流変動が発生しないことを確認した。また、出力電圧変動も約 5%以内に抑えられることを確認した。

今後は、制御性能の最適化、昇降圧切り替え制御の検証を行う予定である。

## 文 献

- [1] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. Hendrix, "A Soft-Switched Three Port Bidirectional Converter for Fuel Cell and Supercapacitor Applications," Proc. of IEEE-PESC05, pp.2487-2493, Recife, Brazil, June.2005.
- [2] Naehyuck Chang, "Fuel Cell and Battery Hybrid System for Portable Electronics Applications," 10th Annual International Conference SMALL FUEL CELLS 2008 - Portable & Micro Fuel Cells for Commercial & Military Applications, Atlanta, USA, May.2008.
- [3] Zhenhua Jiang, Lijun Gao, and Roger A. Dougal, "Flexible Multiobjective Control of Power Converter in Active Hybrid Fuel Cell/Battery Power Sources," Proc. of IEEE-PESC04, pp.3804-3811, Aachen, Germany, June.2004.
- [4] 伊東, 石隈, 菅野, 飯田, 中島, 渡辺, "単相無停電電源装置における新しい電力変換方式," 電気学会論文誌 平成 14 年 2 月号, Vol. 121-D, pp.169-175, Feb.2002.
- [5] Y. Ito, S. Ishiguma, I. Takahashi, H. Haga, "New Power Conversion Technique to Obtain High Performance and High Efficiency for Single-Phase UPS", IEEE IAS, Chicago, USA, Sept.2001.
- [6] 折川幸司, 伊東淳一, "直列補償形非絶縁 DC-DC コンバータの 2 電源システムへの適用," 平成 19 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-32, Nov.2007.