

# 入力電流補償機能を有する直並列補償方式 DC-DC コンバータの一制御法

学生員 折川 幸司 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

## A Control Method of a Series-Parallel Compensation Type DC-DC Converter with an Input Current Fluctuation Compensation

Koji Orikiwa, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a DC-DC converter for two power supplies, which consists of a fuel cell and a battery. The output voltage is controlled by the series converter using the battery and the input current fluctuation is suppressed by the parallel converter. The valid of the proposed circuit are confirmed with experiments and simulations.

キーワード : DC-DC コンバータ, 直列電圧補償, 電流補償, Hブリッジ形コンバータ, 昇圧チョップ, 降圧チョップ

Keywords : DC-DC converter, Series voltage compensation, Current compensation, H-bridge converter, Boost chopper, Step down chopper

### 1. はじめに

近年, バッテリーを用いた携帯機器が普及している。しかし, 携帯機器の高性能, 高機能化により電力消費が大きくなる一方で, 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, 研究が盛んに行われている。燃料電池は化学反応に基づいて電力を供給するため, 出力電力を負荷に応じて高速に制御することは難しい。特に近年, CPUやICの低電圧化高速化にともなって負荷変動時の高速な応答が求められている。そこで, 負荷変動や始動時のエネルギー補償のために, リチウムイオン電池などに代表されるバッテリーの利用が検討されている<sup>(1)(2)</sup>。

バッテリーを併用することで, 高速応答時はバッテリーからエネルギーを供給, 定常的に燃料電池よりエネルギーを供給する。このような回路としては, 例えば, バッテリーと燃料電池をそれぞれ昇圧チョップに接続し, 並列に組み合わせるチョップ並列方式が簡単である。しかし, この方式では常に両方のチョップが動作する必要があり, 効率の低下が問題となる。さらには, リアクトルやスイッチング素子などの数の多さが問題となる。

本論文では, 負荷が変動しても, 燃料電池の電流を一定に保つことができる, 直並列補償方式の高効率 DC-DC コンバータを提案する。従来では入力電圧と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変換する。この結果, 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を

用意し, 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無停電電源装置では提案されている<sup>(3)(4)</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>(5)</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, シミュレーションにより動作を確認した。また直列補償については実験を行い, 効率の改善効果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, コンバータ容量は出力容量以下にすることができる。また, 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・出力電力は小さく, たとえ効率が悪くても損失が小さくなるので高効率を得られる。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, 高周波リ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。回路動作は, 定常時並列コン

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。負荷の増減に伴う電力は、バッテリーが補償する。

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、昇圧チョッパと降圧チョッパを用いる。さらに、直列コンバータと並列にバッテリーと 1 レグを接続する。これを、並列コンバータとする。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。定常状態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。

### 3. 提案回路の制御方法

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、入力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ラープで構成する。出力電圧制御は出力電流指令値を生成する。入力電流制御ループにはローパスフィルタを挿入し、負荷が急変しても、燃料電池から供給する電流はゆるやかに変化させる。一方、並列コンバータの電流指令値は、出力電流指令値と入力電流指令値の差とし、すなわちハイパスフィルタの特性とし、過渡的な出力電圧変動を抑制する。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。

#### (3・1) 直列コンバータの制御法

##### 3・1・1. 昇圧時

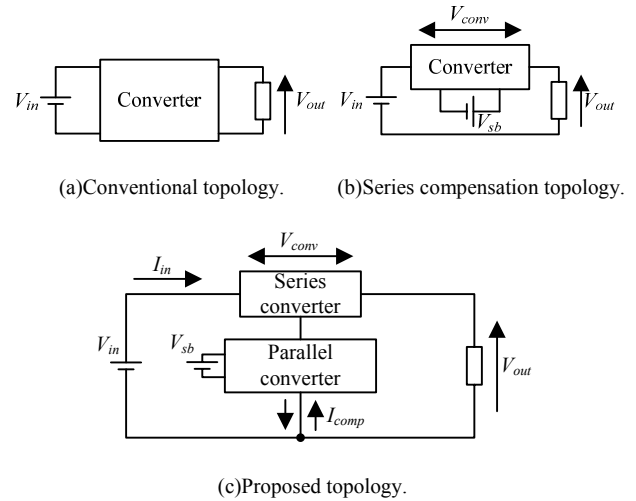
定常時は、並列コンバータを構成する 1 レグを常時オフとし、直列コンバータのみ動作させる。この場合、直列コンバータは昇圧チョッパとして動作する。昇圧する場合、 $S_2$  を常時オンとし、 $S_1$  をスイッチングして差分電圧の直列補償を行う。片方のレグのみスイッチングすることで、スイッチング損失を低減する。このとき、昇圧時は  $V_{out} > V_{fc}$  となるためバッテリーは負荷へと電力供給する。

##### 3・1・2. 降圧時

降圧する場合、直列コンバータは降圧チョッパとして動作させる。具体的には  $S_1$  を常時オフとし、 $S_2$  をスイッチングして差分電圧の直列補償を行う。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。

#### (3・2) 並列コンバータの制御法

並列コンバータの動作は、出力電圧調整器の変化の検出によって開始する。なお、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ことは効



(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.

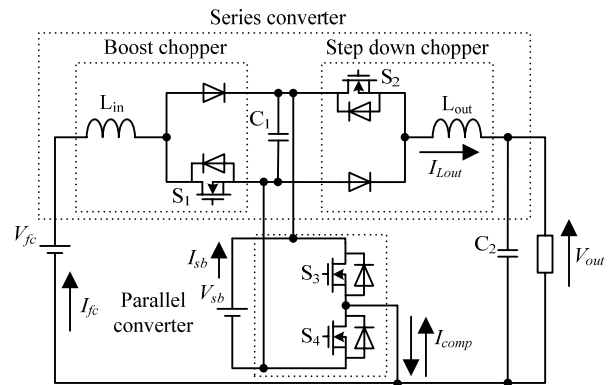
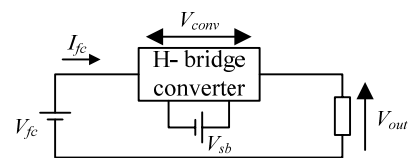
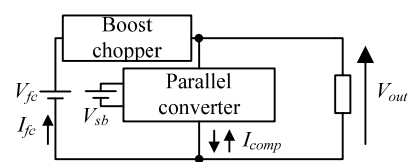


図 2 提案回路

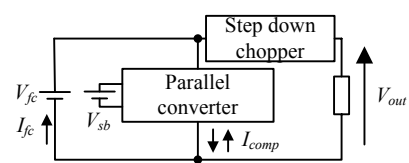
Fig. 2. Proposed circuit.



(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.

率を悪化させる原因となるため、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、ローパスフィルタの時定数に従って設計する。

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。

4. 動作検証

4.1 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。スイッチング周波数は 100[kHz]としている。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、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。

4.2 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 に直列補償回路の効率を示す。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に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、Hブリッジ形コンバータの出力電力が大きくなり、図 7 に示した通り、Hブリッジ形コンバータ単体の効率が上昇しているためである。

4.3 シミュレーションによる並列補償動作の検証

4.3.1 負荷変動時 昇圧モード

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示す。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、負荷変動が起きても、再び直列補償が安定に動作できることを示している。

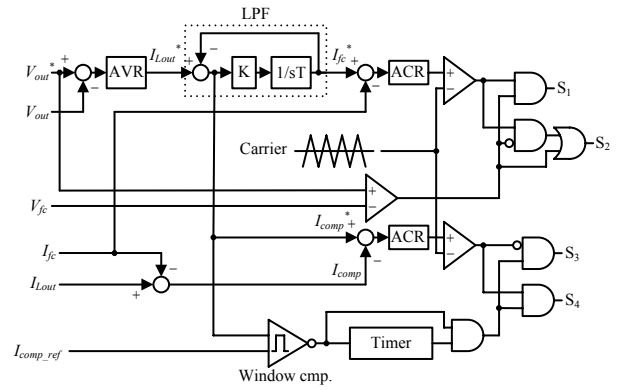


図 4 制御ブロック図

Fig. 4. Control diagrams.

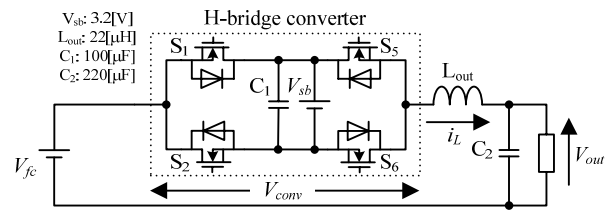
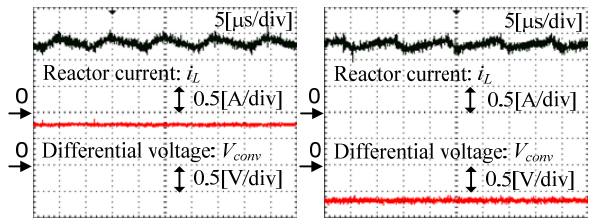


図 5 実験回路

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.

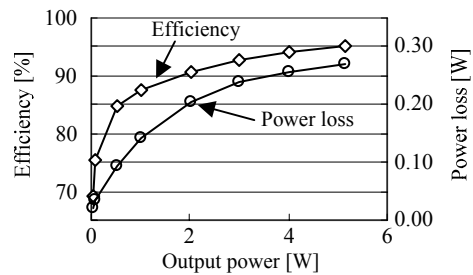


図 7 直列コンバータ単体効率出力電力特性

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

4.3.2 負荷変動時 降圧モード

図 9(b)に提案回路の降圧時の負荷変動時のシミュレーション結果を示す。条件は、10[ms]の時に出力電力を 25[W]から 10[W]に減少させた。バッテリー電流はカットオフ周波数 10[kHz]のローパスフィルタを介して測定した。入力電流補償は 20[ms]で終了させている。昇圧時同様の良好な制御を確認できる。

5. まとめ

本論文では、並列コンバータを用いて負荷電力の増減に伴って入力電流を補償する手法を、2電源を有する DC-DC コンバータへ応用し、直列補償方式との良好な組み合わせを確認した

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が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。

今後は、昇降圧切り替え制御のシミュレーション、実機によるシミュレーション結果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.
- (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.
- (3) 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, No.3, 2001.
- (4) 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 2001 in Chicago.
- (5) 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 (2007)

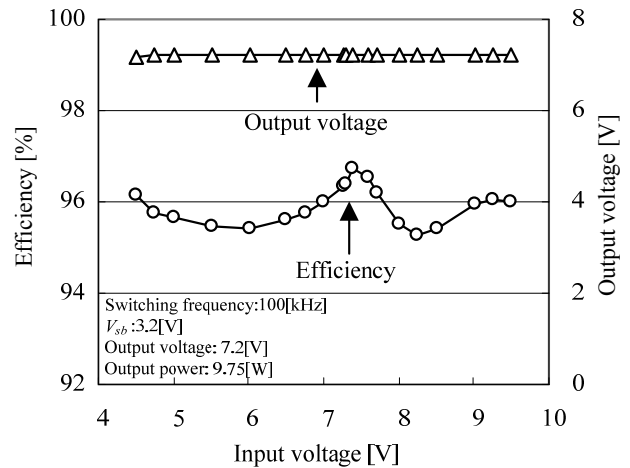
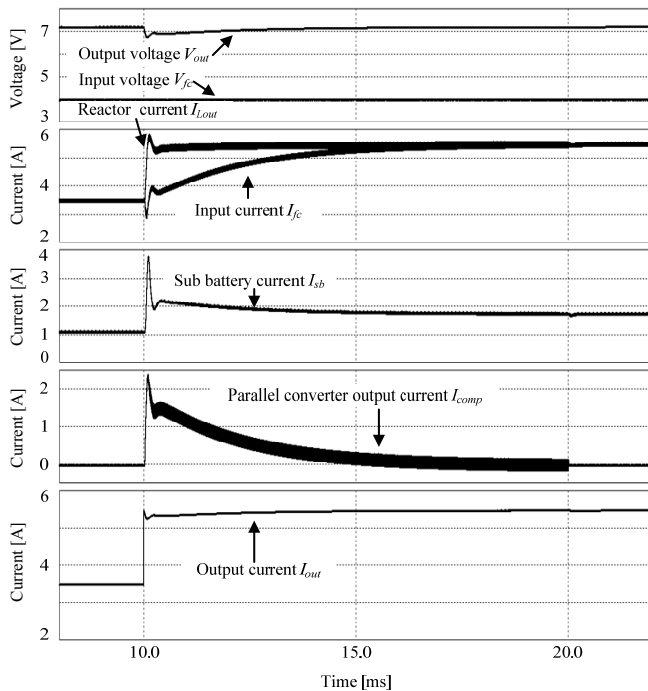


図 8 直列補償時の効率

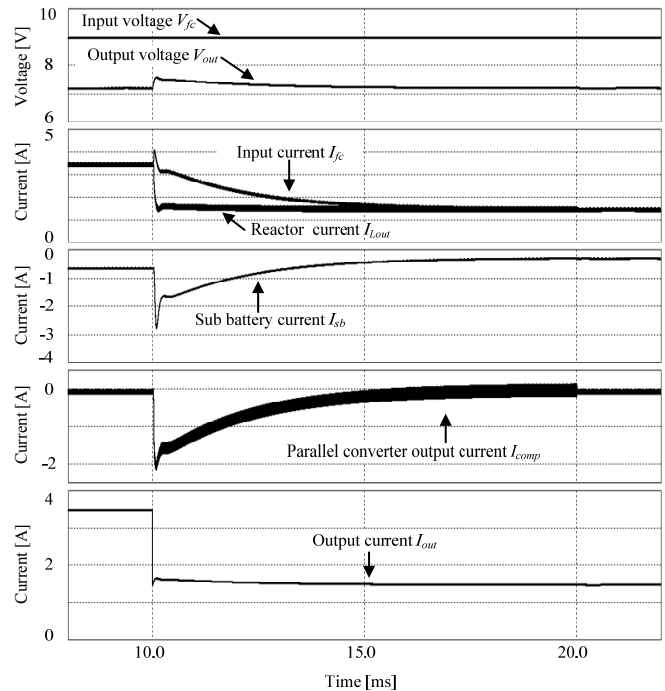
Fig. 8. Efficiency of the proposed circuit (series compensation mode).

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)Boost mode (Output power increased).



(b)Step down mode (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 (Load current change occurs).