

燃料電池用直並列補償方式 DC-DC コンバータの リアクトル設計法

学生員 折川 幸司 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Reactor Design Method of a Series-Parallel Compensation Type DC-DC Converter for a Fuel Cell

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

This paper introduces two types of series-parallel compensation type DC-DC converter for two power supplies, which consists of a fuel cell and a battery. The experimental results confirmed that the proposed circuit could achieve maximum efficiency point of 98.8% and 99.1% in the small differential voltage region, respectively. Finally, the design of a reactor in the proposed circuit is described.

キーワード : DC-DCコンバータ, 直並列補償, リアクトル, リプル電流

Keywords : DC-DC converter, Series-Parallel compensation, Reactor, Ripple current

1. はじめに

近年, バッテリーを用いた携帯機器の需要が大きく伸びており, その電源には, 小型化, 軽量化さらには長時間駆動が求められている。一方, 現在バッテリーのエネルギー密度を飛躍的に増大させることは困難となってきた。そこで, 次世代エネルギー源として, 燃料電池の携帯機器への実用化が強く求められている。しかし, 燃料電池は化学反応を利用するため負荷に応じて高速に発電電力を制御することが難しい。そこで, バッテリーにより負荷変動や始動時の電力補償を行い, 燃料電池は定常的に電力を供給する, バッテリーと燃料電池のハイブリッドDC-DCコンバータの研究が盛んである^(1,2)。このようなDC-DCコンバータには, 高効率, 小型に加え, 燃料電池の電力変動を小さくすることが燃料電池の長寿命化の観点から要求されている。

著者らは, これまでにそれらの要求に応えるために直並列補償方式DC-DCコンバータを提案している⁽³⁾。まず, 高効率を実現する手法として, 燃料電池電圧の変動に対してバッテリー電圧を変換して直列に電圧補償を行う。この直列補償方式では, 特に燃料電池電圧と出力電圧が等しいときに補償電圧が非常に小さくなるため, 高効率が得られる。さらに, 直列補償方式に電力変動分を補償する並列補償器を付加し, 負荷変動時の燃料電池の電流変動をバッテリーが補償する。この結果, 燃料電池の長寿命化が可能である。これまで, 著者らはこの原理に基づいて 2 つの回路方式を提案している。1 つは, 燃料電池と出力にそれぞれ直列にリアクトルを接続する。これは, 燃料電池のリプル電流を低減できる利点を有する。2 つ目は, 出力側に直列と, 並列電流

補償部にリアクトルを接続する回路構成を提案している。これはリアクトルに流れる電流を低減することで, 損失を低減する。そして, これまでに, 効率測定および損失解析によりリアクトルの損失を低減できることを確認している。しかし, 2 つ目の方式では, リアクトルの損失を低減できる反面, 燃料電池のリプル電流が増加する。

本論文では, 2 つの回路構成について, 燃料電池の長寿命化の観点からリプル電流を中心にして, リアクトルの相違を明らかにし, その設計方法を示す。まず, 提案する直並列補償回路の特徴および動作を紹介する。実機検証では, 期待通り燃料電池電圧と目標出力電圧に近い領域でそれぞれ最高効率 98.8%, 99.1%を達成し, 電流変動補償も所望の動作を得ている。最後に, 燃料電池の寿命に影響を与える燃料電池の最大リプル電流に着目したリアクトルの設計法について述べる。

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。従来の構成では, 入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。この結果, 効率の低下が懸念される。

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力は小さく, 高効率が得られる。

〈2-2〉 直並列補償方式

図 1(c)に本論文で示す直並列補償方式回路の概念を示す。

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する。このとき、出力電圧は、(1)式で表される。

$$V_{out} = V_{fc} \pm V_{conv} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 V_{fc} は燃料電池電圧、 V_{conv} は直列コンバータの出力電圧である。

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を補償する。負荷の急速な増減に伴う電力は、バッテリーが補償する。

(2・3) 提案回路の構成

図 2 に本論文で示す直並列補償方式を実現する具体的回路例を示す。(a)に、直列コンバータに昇圧チョップと降圧チョップを用いた回路を示す。燃料電池に直列に接続したリアクトルは、燃料電池のリプル電流を低減する。(b)に並列コンバータ部にリアクトルを接続した回路を示す。(b)の回路は、(a)の回路の燃料電池側リアクトル L_{fc} と置き換えて、並列コンバータにリアクトル L_{comp} を接続する。(a)の回路では、 L_{fc} には出力電流と同程度の電流が流れるため、リアクトルの銅損が大きい。が、(b)の回路では、並列コンバータに接続した L_{comp} を流れる電流は出力電流に比べて小さい。このことから(b)の回路は、(a)の回路と比較してリアクトルの損失を低減できることから、リアクトルの小型化が期待できる。なお、2つの回路は、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 3 に、提案回路の制御ブロック図を示す。提案回路の制御は、燃料電池の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ターループで構成する。出力電圧制御は出力電流指令値を生成する。燃料電池の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、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。以下に詳細を述べる。

(a) 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。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。

(b) 降圧時 降圧する場合、 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. 実機検証

(4・1) 並列補償動作の検証

(a) 提案回路 1 出力電力増加時 昇圧モード 図 4(a)に並列コンバータが停止状態の提案回路 1 の出力電力増加

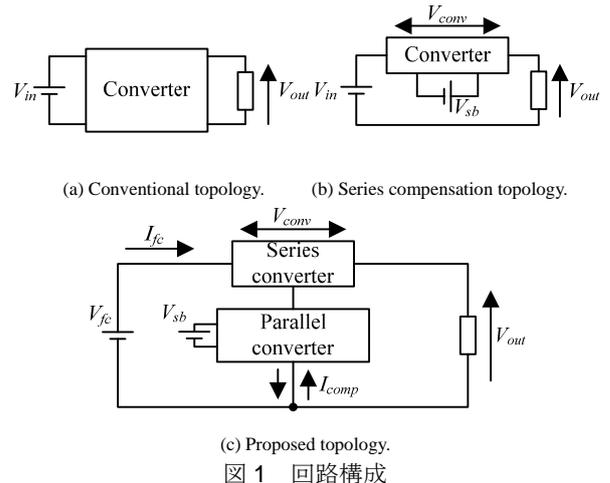


Fig. 1. Construction of conventional, series compensation and proposed circuit.

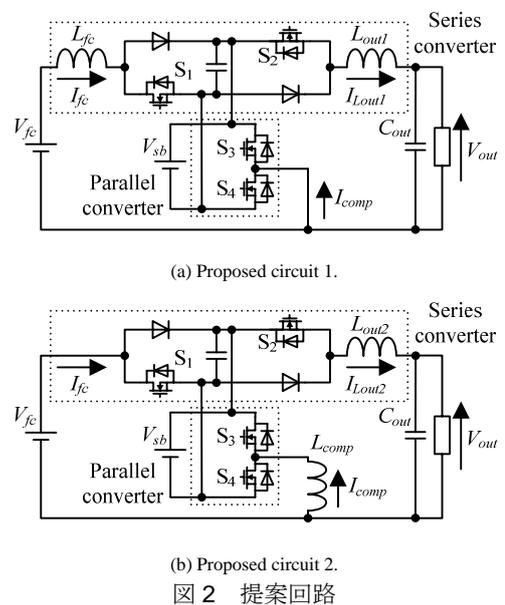


Fig. 2. Proposed circuit.

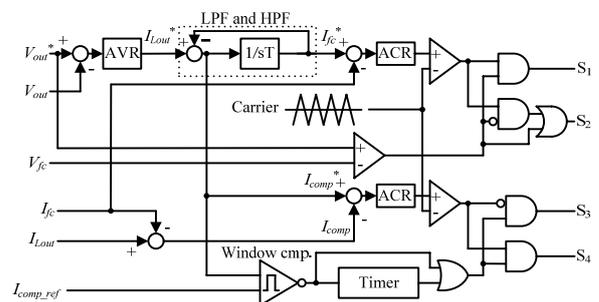


Fig. 3. Control diagrams for the proposed circuit.

時の実験結果を示す。負荷は、昇圧時で出力電力を 2W から 20W に増加させている。図 4(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。また、出力電圧が約 14%以上変動する。

図 4(b)に提案手法を用いた提案回路 1 の昇圧時の出力電力増加時の実験結果を示す。条件は、図 4(a)と同じである。図 4(a)では燃料電池の電流変動が急峻であるのに対して、図 4(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、出力電圧の変動も図 4(a)の約 1/2 に抑えられている。

(b) 提案回路 2 出力電力増加時 昇圧モード 図 4(c)に提案手法を用いた提案回路 2 の昇圧時の出力電力増加時の実験結果を示す。ここでは基本動作確認のため、使用するリアクトルは提案回路 1 と全て同じコア、巻数およびインダクタンスとした。図 4(c)より、提案回路 1 同様、良好な直並列補償を確認できる。今回の条件では、提案回路 2 において、燃料電池のリプル電流低減に寄与するインダクタンス成分が少ないため、燃料電池のリプル電流は提案回路 1 よりも大きい。

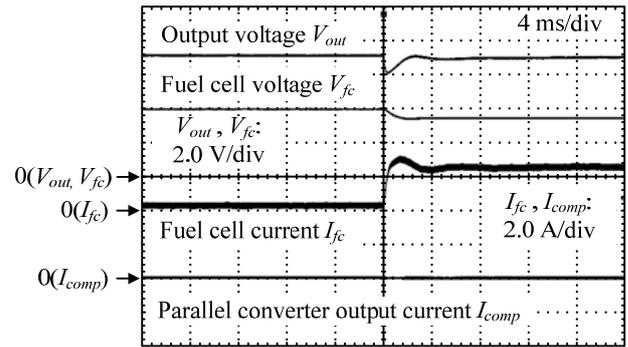
〈4・2〉 提案回路の効率 図 5 に提案回路の効率を示す。ここでの効率は制御回路の使用電力は加味しておらず、電力変換回路のみの効率である。使用するリアクトルは、図 4 と同じである。また、並列コンバータを停止させて効率を測定している。なお、図 2 では直列コンバータにダイオードを使用しているが、高効率化のため、実験回路では MOSFETにより同期整流を行っている。結果より、どちらの場合も燃料電池電圧が目標出力電圧 (7.2V) 付近で 98.8%、99.1%と高効率を達成している。提案回路 2 の最高効率が提案回路 1 の最高効率よりも高いのは、目標出力電圧付近では、直列コンバータはスイッチングせず、回路には直流が流れるが、その経路上のリアクトルが 2 つから 1 つに減少するため、リアクトルの損失が減少するためである。

〈4・3〉 損失解析 図 6 に提案回路の損失の燃料電池電圧に対する変化を示す。結果より、降圧時に提案回路 2 の方が提案回路 1 よりも高効率となることを確認できる。これは、提案回路 2 において、リアクトル L_{comp} に電流が流れず、損失が発生しないためである。図 6 より、狙い通り、燃料電池電圧と目標出力電圧に近い領域で、損失が最小となるメカニズムを明らかにした。

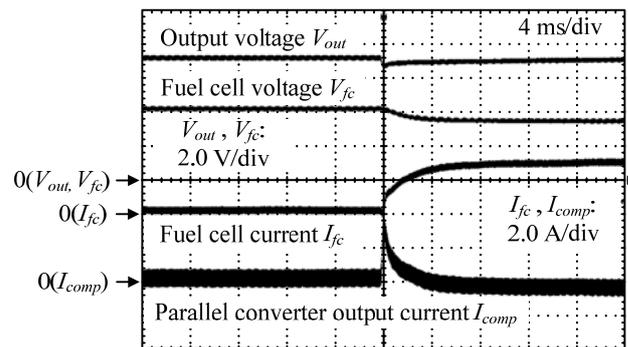
5. リアクトルの設計

提案回路では、燃料電池電圧が変化すると燃料電池のリプル電流が変化する。リプル電流の大きさは、リアクトルの最適設計時の条件、そして燃料電池の寿命に影響する。ここでは、リプル電流の上限を定めリアクトルの設計指針を検討する。提案回路において、最も燃料電池のリプル電流が大きくなるのは差分電圧が最も大きいときであり、今回の設計条件では、燃料電池電圧 4V の昇圧時のときである。

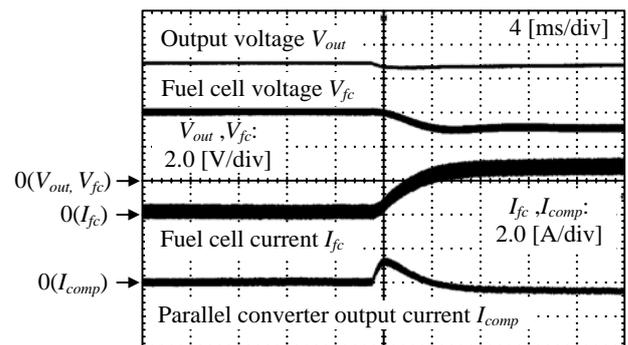
図 7 にそれぞれの提案回路の昇圧時の動作モードを示す。昇圧時は、 S_2 を常時オンとし、 S_1 をスイッチングして差分電圧の直列補償を行う。燃料電池電流は、出力側への電流と並列コンバータに流れる電流との和である。ここで、図 7 の期間中に並列コンバータに流れる不連続な三角波電流のピーク値をそれぞれ Δi_{comp1} 、 Δi_{comp2} 、出力への電流をそれぞ



(a) Series compensation only (proposed circuit 1).



(b) Series-parallel compensation (proposed circuit 1).



(c) Series-parallel compensation (proposed circuit 2).

図 4 出力電力増加時の電圧電流波形

Fig. 4. Voltage waveforms and current waveforms for increasing output power.

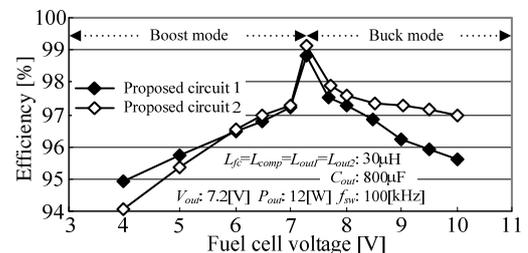


図 5 提案回路の効率

Fig. 5. Efficiency of the proposed circuit.

れ Δi_{Lout1} 、 Δi_{Lout2} としその和を燃料電池のリプル電流 Δi_{fc1} 、 Δi_{fc2} とすると、MOSFETのオン抵抗および還流ダイオードの順方向電圧による電圧降下を無視すれば、燃料電池のリプル電流は(2)、(3)式より得られる。

$$\Delta i_{fc1} = \Delta i_{comp1} + \Delta i_{Lout1} = \frac{1}{L_{fc}} \frac{1}{f_{sw}} \frac{|V_{fc} - V_{out}|}{V_{sb}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta i_{fc2} = \Delta i_{comp2} + \Delta i_{Lout2}$$

$$= \left\{ \frac{V_{fc}}{L_{comp}} + \frac{1}{L_{out2}} (V_{fc} + V_{sb} - V_{out}) \right\} \frac{1}{f_{sw}} \frac{|V_{fc} - V_{out}|}{V_{sb}} \dots\dots\dots (3)$$

(2)式より、提案回路 1 の燃料電池のリプル電流は L_{fc} に反比例する。また、(3)式より、提案回路 2 の燃料電池のリプル電流は L_{comp} および L_{out2} に反比例する。ここで、それぞれの回路の燃料電池のリプル電流を同じにすると、 $\Delta i_{fc1} = \Delta i_{fc2}$ となり(2)、(3)より提案回路 2 において提案回路 1 と同じリプル電流とするリアクトル L_{comp} が(4)式で得られる。

$$L_{comp} = \frac{V_{fc}}{\frac{V_{fc}}{L_{fc}} - \frac{V_{fc} + V_{sb} - V_{out}}{L_{out2}}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、(4)式の分母はゼロよりも大きいという制約があるため、提案回路 2 の L_{out2} には(4)式より、(5)式に示す制限が与えられる。

$$L_{out2} > (V_{fc} + V_{sb} - V_{out}) / V_{fc} \times L_{fc} \dots\dots\dots (5)$$

図 8 に、(5)式の制限下における(4)式で示される提案回路 2 の L_{comp} と L_{out2} の値を示す。表 1 に設計条件を示す。表 1 の条件にて同じリプル電流になるようにリアクトルを設計するとすれば、提案回路 1 の L_{fc} 、 L_{out1} がそれぞれ 30 μ Hに対して、提案回路 2 では L_{comp} は 30 μ H以上、 L_{out2} は 58.5 μ H以上必要となる。したがって、提案回路 2 は、提案回路 1 よりもリアクトル L_{comp} 、 L_{out2} ともに大きくする必要がある。これは、提案回路 2 では L_{comp} はスイッチ S_1 がオンする期間しか燃料電池のリプル電流の抑制に寄与せず、常にリプル電流に寄与する L_{out2} を大きくしなくてはならないことを意味する。しかし、 L_{comp} に流れる電流は直流分が重畳しないため、 L_{comp} には直流電流の流れる L_{out2} よりも飽和磁束密度の小さいコアを使用できる。したがって、提案回路 2 では、 L_{out2} をできるだけ小さくし、 L_{comp} を大きく設計するほうが望ましい。なお、 L_{out2} を小さくすることで、出力側リアクトルのリプル電流が増加するため、リプル電流分による銅損の増加が懸念される。しかし、 L_{out2} が小さくなることで、今回の条件ではリアクトルの銅損のうち支配的である直流分による銅損が減少するため問題ない。

6. まとめ

本論文では、高効率で小型かつ、燃料電池の長寿命化を図る直並列補償方式 DC-DC コンバータの 2 つの回路構成を紹介し、実機検証を行った。その結果、最高効率 98.8%および 99.1%を達成した。また、燃料電池のリプル電流に注目したリアクトルの設計を検討した。その結果、提案回路 2 では、提案回路 1 よりも大きなリアクトルを用いることで、燃料電池のリプル電流を同じにできることを確認した。今後は、損失評価も含めたリアクトル設計を行う予定である。

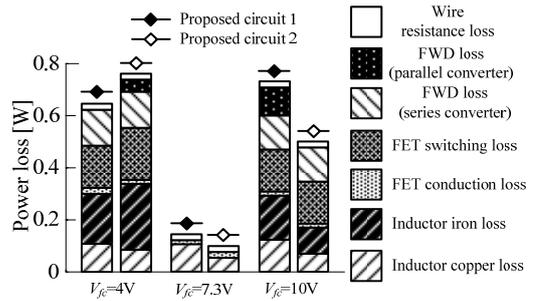
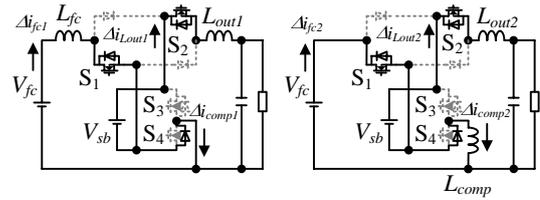


図 6 損失解析結果

Fig. 6. Loss analysis of the experimental result.



(a) Proposed circuit 1. (b) Proposed circuit 2.

図 7 昇圧時の動作モード

Fig. 7. Operation mode (Boost operation).

表 1 設計仕様

Table 1. Specifications for design of a reactor.

Fuel cell voltage V_{fc}	4 to 10 [V]
Output power P_{out}	12 [W]
Output voltage V_{out}	7.2 [V]
Battery voltage V_{sb}	11 [V]
Switching frequency f_{sw}	100 [kHz]
Inductor current ripple Δi_{fc}	30% of output current [A]

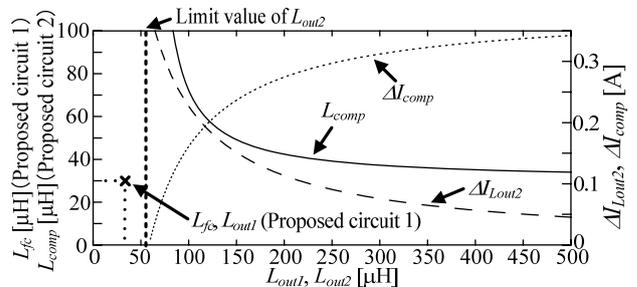


図 8 リアクトルのインダクタンスの関係および提案回路 2 のリアクトルのリプル電流 ($V_{fc}=4V$)

Fig. 8. Relation of inductances of the reactors and ripple current of the proposed circuit 2 ($V_{fc}=4V$).

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) Koji Orikiwa, Jun-ichi Itoh : "High efficiency DC-DC converter using a series-parallel compensation method for a fuel cell", Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conference, pp1-9 (2009)