

電力双方向制御を可能とする ワンコンバータ方式絶縁型 AC-DC コンバータの検討

細谷 俊太朗, 芳賀 仁, 近藤 正示 (長岡技術科学大学)

Examination of one converter method isolated AC-DC converter that can be Bi-directional power flow control

Shuntaro Hosoya, Hitoshi Haga, Seiji Kondo (Nagaoka University of Technology)

The study of on-vehicle battery charger is performed flourishingly. So far, the authors have studied the circuit of one-converter method which high efficiency and miniaturization can expect. In this paper, furthermore, propose the circuitry which high efficiency can expect. The characteristic of the proposal circuit is the point that applied a bridgeless circuit to the part of the converter. Finally, basic operation was confirmed by the simulation and the actual machine experiment.

キーワード：絶縁型 AC-DC コンバータ, 電力双方向, ワンコンバータ方式, 車載充電器

Keywords : isolated AC-DC converter, bi-directional power flow, one-converter method, on-vehicle battery charger

1. はじめに

近年, 環境問題などの観点から二次電池をエネルギー源とする PHV/EV 等の普及が進んでおり, 二次電池の充電に用いられる車載充電器用 AC-DC コンバータの研究が進められている。車載充電器用 AC-DC コンバータには非絶縁型と絶縁型があり, 安全上の観点から絶縁型が望ましいとされ主流となっている。また, 入力力率改善や高調波電流規制の観点から, 力率改善 (PFC) 機能が必須である。現在は, Fig.1 に示すような昇圧チョップパ PFC 方式を適用した回路構成が一般的である。しかし, この回路構成では電力変換を二段階で行うため, 効率が悪く, 大容量の平滑用コンデンサが二か所に必要であるため回路が大型化する。さらに, 最近では災害時に PHV/EV の二次電池を非常用電源として有効利用するという試みも行われていることから, 車載充電器には双方向性が求められている。

以上のことから, 著者らはこれまでに小型, 高効率化を目的に, Fig.2 に示すワンコンバータ方式の絶縁型双方向 AC-DC コンバータを検討してきた。この回路構成は, 1 次側の電力変換を一段で構成でき, 電解コンデンサを 2 次側の一か所に統合できるので, Fig.1 に示す方式と比較して小型, 高効率化ができる。しかし, 本方式には昇圧インダクタとトランスの漏れインダクタンス, フィルタインダクタの直列接続により, スwitching 素子間にサージ電圧が発生する問題点がある。これには, 各インダクタ間にアクティブクランプを挿入する方法を用いて対処している。

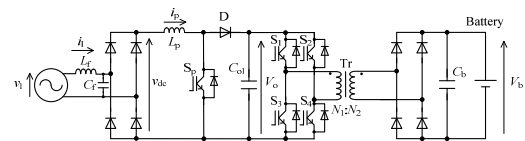


図1 昇圧チョップパ PFC 方式を適用した絶縁型 AC-DC コンバータ
Fig.1. Isolated AC-DC converter with boost chopper PFC

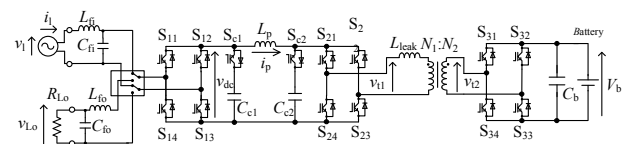


図2 従来のワンコンバータ方式絶縁型双方向
AC-DC コンバータ

Fig.2. Conventional isolated bi-directional AC-DC converter of one-converter type

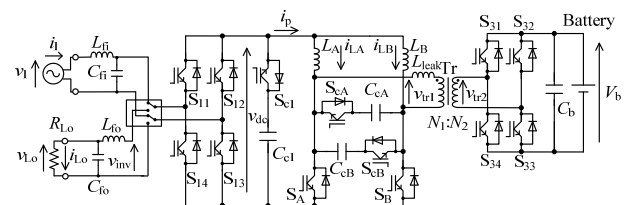


図3 提案するワンコンバータ方式絶縁型双方向
AC-DC コンバータ

Fig.3. Proposal isolated bi-directional AC-DC converter of one-converter type

本稿では、更なる高効率化と入力フィルタの小型化が期待できる、新しいワンコンバータ方式の回路構成を提案し、シミュレーションによる動作確認の結果と実機実験の結果を比較し同様の結果を確認したので報告する。

2. 回路構成

〈2・1〉従来のワンコンバータ方式絶縁型双方向 AC-DC コンバータ

Fig.1 に昇圧チョップ PFC 方式を適用した絶縁型 AC-DC コンバータを示す。Fig.2 に従来のワンコンバータ方式絶縁型双方向 AC-DC コンバータを示す。Fig.1 の回路では、PFC 動作は PFC コンバータで、絶縁は DC-DC コンバータで行う。これに対して、Fig.2 の回路では、PFC 動作と絶縁の二つの動作をワンコンバータで行う。これによって、電力変換段を一段にでき、大容量の平滑用コンデンサを一か所に統合できることから小型、高効率化が期待できる。

しかし、バッテリー充電動作（系統からバッテリーまでのパワーフロー）のとき、エネルギーをトランスの二次側に伝送する際に昇圧インダクタ L_p とトランスの漏れインダクタ L_{leak} の直列接続により、スイッチング素子間にサージ電圧が発生する。対処としては、スナバ回路を挿入する方法があるが、RCD スナバなどのパッシブ型のスナバでは、抵抗による損失が発生する。そこで、各インダクタの間にアクティブクランプ回路 (S_{c2} と C_{c2}) を挿入することによって、低損失でサージ電圧を抑制している。また、バッテリー放電動作（バッテリーから負荷までのパワーフロー）のときも、昇圧インダクタ L_p とフィルタインダクタ L_{fo} の直列接続によるサージ電圧が発生する。これに関しても、アクティブクランプ回路 (S_{c1} と C_{c1}) を挿入して対処している。

〈2・2〉提案するワンコンバータ方式絶縁型双方向 AC-DC コンバータ

Fig.3 に提案するワンコンバータ方式絶縁型双方向 AC-DC コンバータを示す。提案回路は Fig.2 の従来回路と同様に PFC 動作と絶縁の二つの動作をワンコンバータで行う。これによるメリットは同様である。

提案回路でも昇圧インダクタとトランスの漏れインダクタ、フィルタインダクタ直列接続によるサージ電圧が発生するので、それぞれの間にアクティブクランプ回路 (S_{cA} と C_{cA} , S_{cB} と C_{cB} , S_{c1} と C_{c1}) を挿入し従来回路と同様に対処している。

本回路の特徴は、コンバータ部にブリッジレス回路を適用することで、従来回路と比較して電流経路に入る IGBT の数を 2 つ減らすことができる。また、昇圧インダクタに流れる電流を半分にすることができるので、(1)式より提案回路のインダクタの導通損失 P_{L_loss} は従来回路の半分になる。ここでは、インダクタの巻線抵抗 R_L はすべて等しいものとする。

$$P_{L_loss} = \left(\frac{1}{2}i_p\right)^2 R_L \times 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに、コンバータ部を系統側から見ると、トランスを介したインターリーブ型の昇圧チョップのように見えることから、入力電流リップルの低減と高周波化による入力フィルタの小型化が期待できる。以下にパワーフローごとの回路動作の説明を行う。

3. 提案回路の動作

〈3・1〉系統からバッテリーへの充電動作

Fig.4 にバッテリー充電動作制御ブロック図を示す。バッテリー充電動作では、スイッチ S_A , S_B を同時 ON してインダクタにエネルギーを貯める蓄積モード t_{on} , 相補にスイッチ S_A , S_B を ON することによりトランスを介して二次側にエネルギーを伝送する伝送モード t_{off} の二種類がある。

提案回路は、 S_A , S_B を 180° 位相シフトさせて動作させるだけで昇圧チョップと同じ動作を行うことができるので、Fig.1 の昇圧チョップ PFC 方式の制御を適用して Fig.4 のような制御で入力力率改善制御と出力電圧制御を同時に行うことができる。また、昇圧比は(2)式で求められるが、トランスを介して二次側へエネルギーを伝送するためには、 S_A , S_B が同時に ON する蓄積モードが必要であるので、通流率 α が 0.5 以上に制限される。

$$V_b = \frac{1}{1-\alpha} \frac{N_2}{N_1} v_{dc} \quad (0.5 \leq \alpha) \quad \dots\dots\dots (2)$$

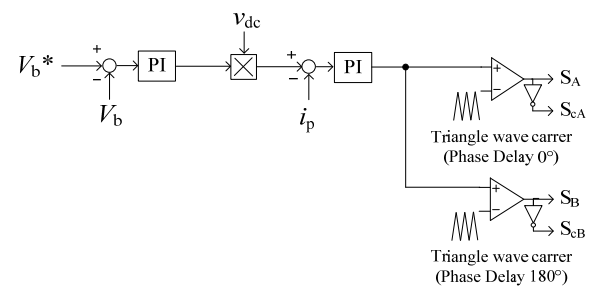


図 4 バッテリー充電動作制御ブロック図

Fig.4. Control block diagram of battery charge operation

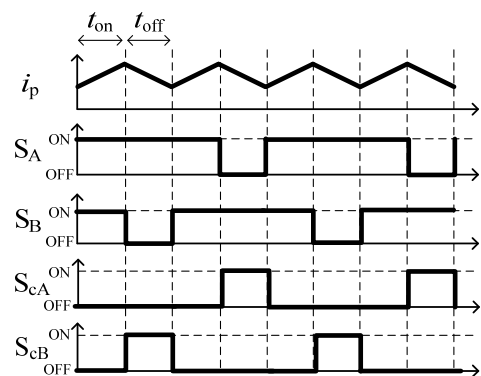


図 5 バッテリー充電時のスイッチング動作

Fig.5. Switching operation when charging the battery

Fig.5 にバッテリー充電時のスイッチング動作を示す。充電動作では、蓄積モードから伝送モードに切り替わる瞬間、昇圧インダクタ L_A , L_B とトランスの漏れインダクタンス L_{leak} の直列接続によるサージ電圧が発生する。そのため、昇圧インダクタ L_A と漏れインダクタンス L_{leak} の直列接続のときは、スイッチ S_{cA} を ON してサージ電圧を抑制している。同様に昇圧インダクタ L_B と漏れインダクタンス L_{leak} の直列接続のときは、スイッチ S_{cB} を ON している。

〈3・2〉バッテリーから負荷への放電動作

Fig.6 にバッテリー放電動作制御ブロック図を示す。放電動作では、 $S_{31} \sim S_{34}$ を方形波駆動し、トランスに方形波電圧を印加して二次側にエネルギーを伝送する。その後、 S_A , S_B , L_A , L_B によって倍電流整流する。このとき、整流後の電圧 v_{dc} はバッテリー電圧の半分の電圧になる。その後、商用周波数の基本波を変調波としてインバータ $S_{11} \sim S_{14}$ を PWM 駆動させ負荷にエネルギーを供給する。

また、インバータ $S_{11} \sim S_{14}$ において、昇圧インダクタとフィルタインダクタが直列接続されるモードがあるので、このモードのときにアクティブクランプスイッチ S_{cl} を ON してサージ電圧を抑制している。インダクタの直列接続を防ぐ方法として、交流フィルタ (L_{fo} , C_{fo}) を、C→L の順番で接続する方法もあるが、この場合は C_{fo} の短絡防止の為に、 $S_{11} \sim S_{14}$ に逆流阻止ダイオードを挿入する必要があるが、導通損やコストの観点から見て不利のため上記のようにアクティブクランプによる方法を適用した。

4. シミュレーション結果

Table 1 にシミュレーション条件を示す。

〈4・1〉系統からバッテリーへの充電動作

Fig.7 にバッテリー充電動作のシミュレーション結果、Fig.8 に各インダクタ電流と入力電流をそれぞれ示す。

このシミュレーションでは、入力電流リプルの低減、高周波化を確認するために、入力フィルタは使用していない。出力電圧指令値は DC300[V]とした。また、出力容量は 1[kW]となるように、バッテリーは 90[Ω]の抵抗負荷 R_b としてシミュレーションを行った。

Fig.7 より、入力電圧 v_1 と入力電流 i_1 の位相が一致しており、力率改善が正常に行われていることがわかる。また、出力電圧 V_b も DC300[V]となっていることがわかる。さらに、サージ電圧も抑制できていることが確認できる。次に、Fig.8 をみると昇圧インダクタ L_A , L_B の電流リプルが打ち消しあい、入力電流リプルが低減されリプル周波数が 2 倍になっていることが確認できる。

〈4・2〉バッテリーから負荷への放電動作

Fig.9 にバッテリー放電時のシミュレーション結果を示す。出力電圧指令値は AC100[Vrms], 50[Hz]とした。Fig.9 より、指令値通りの電圧が出力できている。また、電流波形も正弦波で出力できている。さらに、サージ電圧も抑制されていることが確認できる。

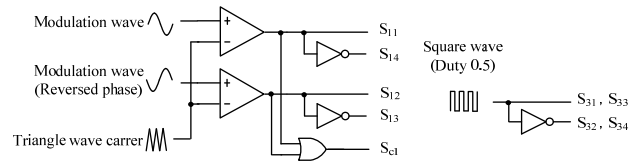


図 6 バッテリー放電動作制御ブロック図

Fig.6. Control block diagram of battery discharge operation

表 1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation conditions

Switching frequency	f_s	50[kHz]
Line voltage	v_1	100[V]
Boost inductor	L_A, L_B	1[mH]
Output capacitance	C_b	2200[μF]
Clamp capacitance	C_{cl}, C_{cA}, C_{cB}	6.6[μF]
Filter inductor	L_{fo}	2[mH]
Filter capacitance	C_{fo}	6.6[μF]
Output resistance	R_b	90[Ω]
Load resistance	R_{Lo}	100[Ω]
Transformer ratio	N_1/N_2	1
Battery voltage	V_b	300[V]

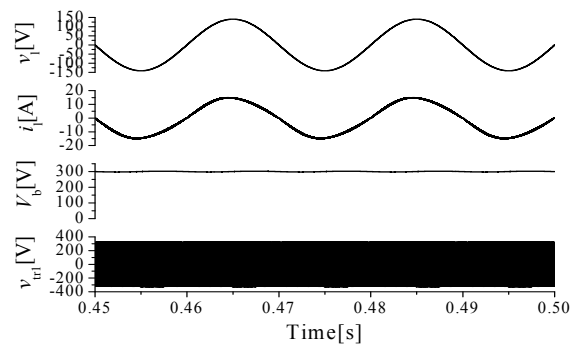


図 7 バッテリー充電動作のシミュレーション結果

Fig.7. Simulation result at the time of the charge movement

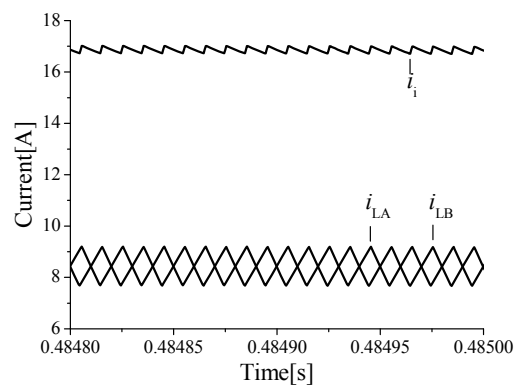


図 8 入力電流と各インダクタ電流

Fig.8. Input current and each inductor current

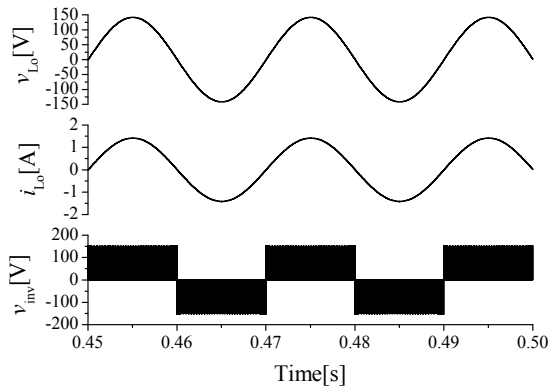


図9 バッテリ放電時のシミュレーション結果
Fig.9. Simulation result at the time of the discharge movement

5. 実機実験結果

〈5・1〉系統からバッテリーへの充電動作 Table 2 に実験条件を示す。Fig.10 にバッテリー充電動作の実験結果を示す。Fig.11 に i_i の最大値付近の拡大図を示す。 i_{LA}, i_{LB} はインダクタ電流を示す。実機実験でも、シミュレーションと同様に、入力フィルタは使用していない。入力電圧は 70.7[V_{rms}] (100[V_{peak}])、バッテリー電圧を DC212[V]、約 450[W]として実験した。変換効率は、87.0[%]であった。また、入力力率は 0.998 を確認した。

Fig.10 より、シミュレーションと同様の所望の動作が確認でき、 v_{tr1} のサージ電圧も抑制できていることが確認できた。また、Fig.11 より、 i_i の電流リップルが低減され、高周波化されていることが確認できた。

〈5・2〉バッテリーから負荷への放電動作 Fig.12 にバッテリー放電動作の実験結果を示す。実験条件は、バッテリー電圧として直流電源を用いて DC200[V]を与え、出力電圧指令を 57[V_{rms}] (80[V_{peak}])として実験した。負荷は 100[Ω]の抵抗負荷で測定した。シミュレーションと同様に正弦波電圧を確認でき、 v_{inv} のサージ電圧も提案するクランプ回路によって抑制できていることが確認できた。

6. おわりに

本稿では、車載充電器用絶縁型 AC-DC コンバータについて、高効率化と入力フィルタの小型化が期待できる回路構成を提案し、シミュレーションと実機実験により動作を確認した。実機実験では、シミュレーション同様の動作を確認でき、変換効率 87.0%と力率 1 動作を確認した。今後は、定格での実機実験と従来法との効率等の比較を行っていく所存である。

文 献

(1) 細谷, 芳賀, 近藤:「ブリッジレス回路を用いたワンコンバータ方式絶縁型双方向 AC-DC コンバータの検討」, 電気学会全国大会, 4-053, Vol.4, pp.93-94 (2013)
 (2) 廣野, 芳賀, 近藤:「電力双方向制御を可能とするアクティブクランプ付き電流形絶縁 AC-DC コンバータ」, 半導体電力変換研究会, SPC-12-035 (2012)
 (3) 山本, 堀井:「トランスリンク方式インターリーブ PFC コンバータ」,

表 2 実験条件

Table 2. Experimental conditions

Switching frequency	f_s	50[kHz]
Boost inductor	L_A, L_B	1[mH]
Output capacitance	C_b	2200[μF]
Clamp capacitance	C_{c1}, C_{cA}, C_{cB}	6.6[μF]
Filter inductor	L_{fo}	2[mH]
Filter capacitance	C_{fo}	6.6[μF]
Output resistance	R_b	100[Ω]
Load resistance	R_{Lo}	100[Ω]
Transformer ratio	N_1/N_2	1

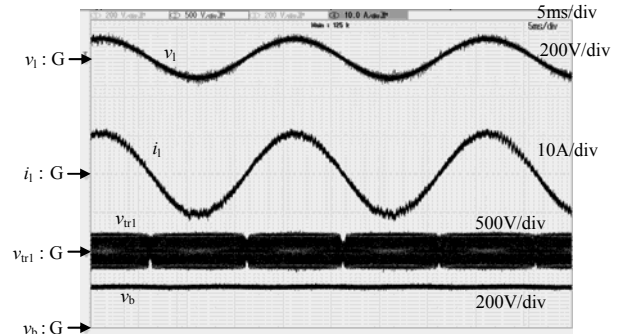


図 10 バッテリ充電動作の実験結果

Fig.10. Experimental result at the time of the charge movement

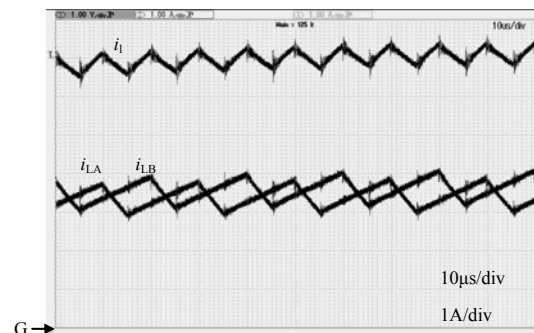


図 11 最大値付近の入力電流と各インダクタ電流

Fig.11. Input current and each inductor current

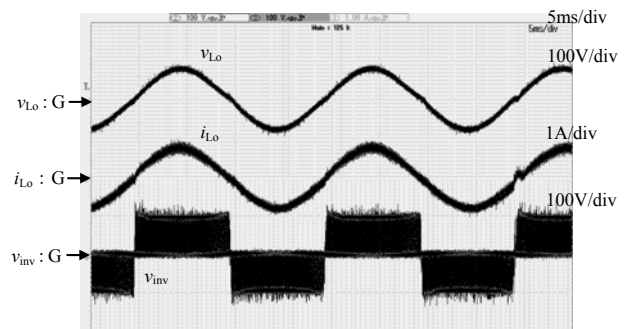


図 12 バッテリ放電時の実験結果

Fig.12. Experimental result at the time of the discharge

電学論 D, 130 巻 6 号, 2010 年

(4) Su-Jin Jang, Chung-Yuen Won, Byoung-Kuk Lee, and Jin Hur: “Fuel Cell Generation System With a New Active Clamping Current-Fed Half-Bridge Converter”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, 2007