

高効率・双方向絶縁型 DCDC コンバータ

小池 直希 大田原 祐樹 星野 哲馬 長井 真一郎
(ポニー電機)

High Efficiency Bi-directional Isolated DCDC Converter

Naoki Koike, Yuki Otabara, Tetsuma Hoshino, Shin-ichiro Nagai
(Pony Electric co., Ltd.)

This paper proposes an isolated 8 kW bi-directional chopper circuit which includes an auxiliary resonant commuted pole (ARCP) soft switching circuit. Isolation is achieved with a current resonant isolated DCDC converter. The ARCP soft switching circuit uses transformer instead of smoothing capacitor in the input DC voltage. The proposed ARCP soft switching circuit can achieve the zero voltage soft switching in the main switch, and the current resonant isolated DCDC converter is enable to zero current soft switching transition. As a result of experiments on the 8 kW system, it was indicated that the proposed system could attain the conversion efficiency 95 % at 40 kHz switching.

Keywords : ソフトスイッチング, 零電圧・零電流スイッチング, ARCP, LC 共振

1 まえがき

近年, EV や HEMS などの普及に伴い大容量のバッテリーを必要とする場面が増えてきている。用途によってバッテリーの種類も多様化してきており, 中でも双方向の電力変換を実現するバッテリー充電器には様々な充電電圧規格に対応できる広い汎用性が求められている。また, これら EV や HEMS などが普及する背景には環境問題と電力エネルギー問題が存在し, 同様にバッテリー充電器も例外ではなくエネルギーロスの少ない製品が求められる。しかし, 高周波スイッチングが主流となってきた現在ではスイッチングによる損失が大きくなり, この問題を解決するためいくつかの方法⁽¹⁾⁽²⁾が検討されている。

本文では双方向チョッパ回路を適用したソフトスイッチング回路によって広電圧範囲, 高効率の回路を実現している。ソフトスイッチング方式は数多く提案されているが, 共振回路での損失が大きいため, 効率改善が難しい。そこで本文では回路が簡単で高効率を実現できるソフトスイッチング方式としてトランスを利用した補助共振転流ポール型(以下, ARCP 型)を適用した双方向チョッパ回路を提案する。ARCP 型ソフトスイッチングは主回路に直列接続されず, スイッチの転流時にのみ動作するため共振回路での損失が少ない。さらにチョッパ回路に適用することで広い電圧範囲で使用することができる。また, ARCP 回路部分ではトランスの中性点を使用しているため, 従来の平滑用コンデンサを必要とせず寿命による劣化が起きにくい。⁽³⁾

本システムでは ARCP 型ソフトスイッチングを付加した双方向チョッパ回路にさらに絶縁型とするため電流共振型絶縁コンバータを接続した構成となっている。ARCP 型のチョッパ回路ではメインスイッチの Turn on の直前に ARCP 用のスイッチを ON にすることで高周波の部分共振現象が生じ, 零電圧&零電流スイッチング(ZVS)を可能にする。また, Turn-off 時はメインスイッチに並列接続されたコンデンサによって零電圧スイッチングにする。

上述のソフトスイッチング動作により, 双方向チョッパ回路と絶縁 DCDC コンバータの本システムにおいて 8kW の実験を行った結果, 放電時で最大 95.4%, 充電時で最大 95.5%の変換効率を達成した。

2 回路構成

図 1 へ提案する回路構成図を示す。主回路は直流コンデンサ(Clink)を接続して ARCP 型双方向チョッパ回路, 電流共振型絶縁 DC/DC コンバータを接続した 2 コンバータ構成となっている。

ARCP 型双方向チョッパ回路は一般的な非絶縁の DC/DC コンバータへ転流用スイッチ(Qr1, Qr2), 補助共振用リアクトル(Lr1), コンデンサ(Cr1, Cr2), 電流を回生するトランス(Tr1)で構成している。

電流共振型絶縁 DC/DC コンバータは一次側に Q11~Q14, 二次側に Q15~Q18 のスイッチを接続したフルブリッジ構成となっており, 共振用リアクトル(Lr2), 絶縁トランス(Tr2), 共振用コンデンサ(Cr1, Cr2)が直列接続された回路

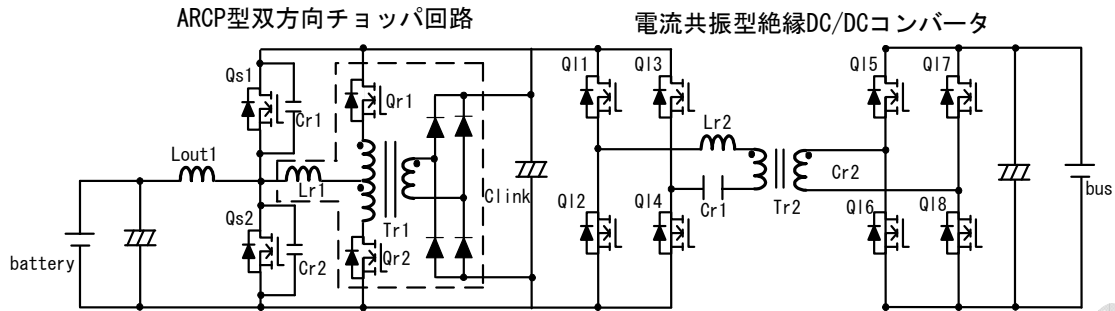


図 1 回路構成図

となる。

3 動作原理

〈3・1〉 ARCP 型双方向チョップ回路

図 2 に ARCP 型双方向チョップ回路の主な動作原理波形を示す。ターンオン時、メインスイッチ(Qs1, Qs2)を ON する直前に共振用スイッチ(Qr1, Qr2)を ON して転流させる。スイッチ端子間に並列に接続されているコンデンサ Cr1, Cr2 とリアクトル Lr で共振が生じるため、メインスイッチ端子間の電圧が 0V になった時にゲートを ON する(ZVS)。ターンオフ時はメインスイッチが切れる瞬間に電流がコンデンサ Cr1, Cr2 へ転流する。このコンデンサの充(放)電によりメインスイッチの両端電圧はゆっくり上昇する。電圧の立ち上がりに対して電流は素早くコンデンサ側へ転流するため、スイッチング損失はほとんど発生しない。

放電時は下側(Qs2, Qr2)、充電時は上側(Qs1, Qr1)をスイッチングする。以下に図 2 波形の各モードにおける電流経路と動作について図 4, 図 5 に示す電流遷移図に従って詳細に述べる。

〈3・1・1〉 ARCP 型双方向チョップ回路放電モード

<mode0:出力リアクトルの放電>

転流動作以前の定常状態である。リアクトルがエネルギーを放出(蓄積)し、bat-Lout-Qs2-link(Qs1-Lout-bat)のループを辿る。

<mode1:転流開始(Turn-on)>

Qr1(Qr2)を Turn-on すると転流が開始する。mode0 で Qs2 を流れていた電流が Qr1 へ徐々に転流し、bat-Lout-Qs2-link(Qs1-Lout-bat)のループで流れていた電流が bat-Lout-Lr-Qr1(link-Qr2-Lr-Lout-bat)へ遷移する。このとき、トランス電圧を $V_{link}/2$ とすると Lr の電流は、 $V_{link}/2L$ の傾きをもつ。

<mode2:LC 共振>

mode1 で Lr を流れる電流が Lout を流れる電流を超えると Cr1, Cr2 が充放電を開始し、Cr1-Lr-Qr1 と Cr2-Lr-Qr1-link(Cr2-Lr-Qr2 と Cr1-link-Qr2-Lr)のループが形成され共振動作を開始する。Cr1(Cr2)の両端電圧が 0 になった時点でスイッチ Qs1(Qs2)を Turn-on にする。

<mode3:定常状態への遷移>

スイッチ Qs1(Qs2)を Turn-on にした時点から Lr 両端へか

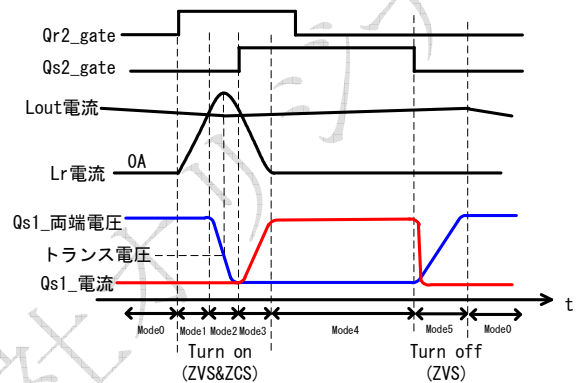


図 2 ARCP 型双方向チョップ回路の動作原理波形(放電時)

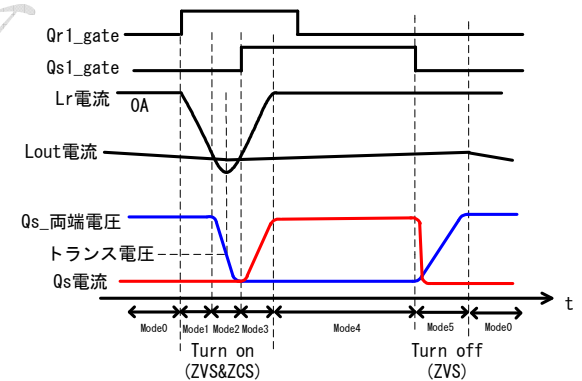


図 3 ARCP 型双方向チョップ回路の動作原理波形(充電時)

かる電圧は $-V_{link}/2$ となるため、Lr へ流れる電流は $V_{link}/2L$ の傾きで減少し、bat-Lout-Lr-Qr1(link-Qr2-Lout-bat)のループで流れていた電流は bat-Lout-Qs1(link-Qs2-Lout-bat)へ遷移する。

<mode4:定常状態>

定常状態である。定常状態に戻ったとき、Qr1(Qr2)を Turn-off する(ZCS)。リアクトルがエネルギーを蓄積(放出)し、Qs1-Lout-bat (bat-Lout-Qs2-link)のループを辿る。

<mode5: 転流開始(Turn-off)>

Qs1(Qs2)を Turn-off すると、スイッチが切れる瞬間に電流がコンデンサ Cr1(Cr2)へ転流する。このコンデンサの充(放)電によりメインスイッチの両端電圧はゆっくり上昇する。この電圧の立ち上がりに対して電流は素早くコンデン

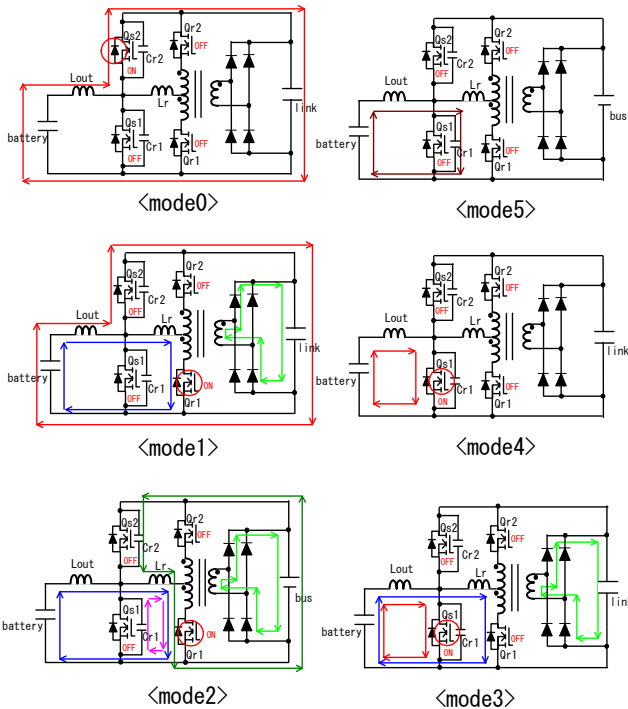


図 4 ARCP 型双方向チョップ電流遷移図(放電時)

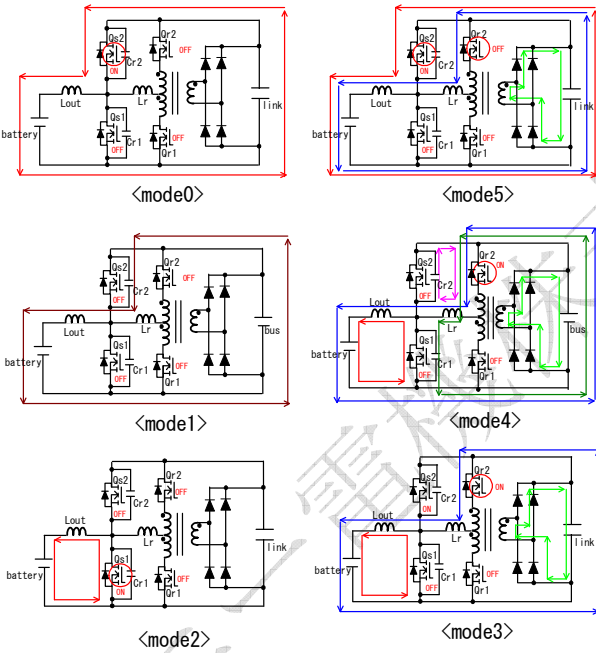


図 5 ARCP 型双方向チョップ電流遷移図(充電時)

サ側へ転移するため、スイッチング損失はほとんど発生しない(ZCS)。

〈3・2〉電流共振型絶縁 DC/DC コンバータ

図 6 図 7 へ電流共振型絶縁 DC/DC コンバータの動作原理波形，電流遷移図を示す。本コンバータはオープンループにて駆動し，固定周波数の相補スイッチングを行う。共振周波数とスイッチング周波数を一致させることにより，零電流スイッチングを実現させる。

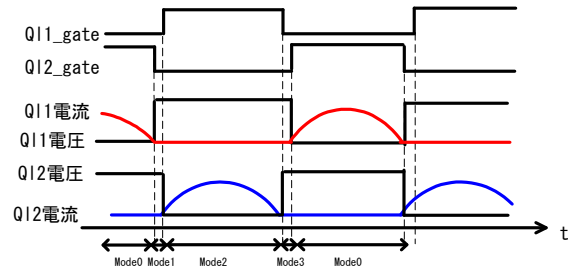


図 6 電流共振型絶縁 DC/DC コンバータの動作原理波形

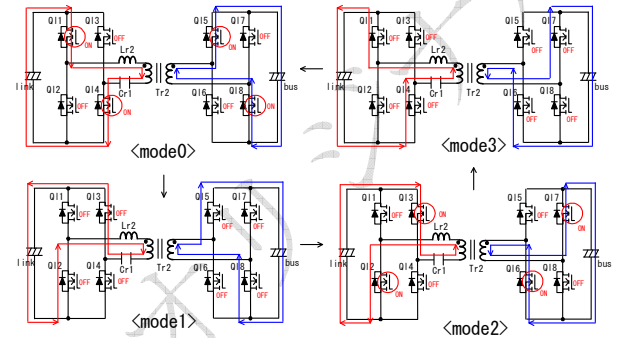


図 7 電共振型絶縁 DCDC コンバータ電流遷移図

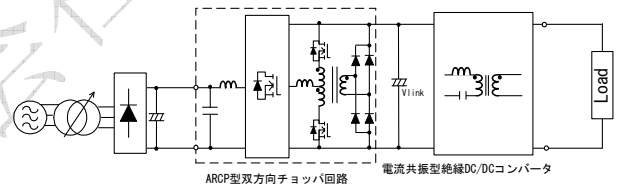


図 8 試験回路図(放電試験)

4 実験結果

〈4・1〉試験条件

装置定格はバッテリー側電圧を 320V，bus 側電圧を 360V，リンク電圧を 420V とした。また，定格容量を 8kW，スイッチング周波数を 40kHz とした。共振用リアクトル L_{r1} ，共振用コンデンサ C_{r1} ， C_{r2} は転流期間がスイッチング周期の 10% 程度となるように設定した。放電時は図 8 の様に ARCP 型双方向チョップ回路から直流電圧を入力し電流共振型 DCDC コンバータ側へ負荷を接続し，充電時は電流共振型 DCDC コンバータ側から DC 電圧を入力し，ARCP 型双方向チョップ回路へ負荷を接続して試験を行った。

〈4・2〉主回路の構造

図 9 に主回路図の構造写真を示す。ARCP 型 DC/DC コンバータ基板が一枚，電流共振型 DC/DC コンバータ基板を 2 並列に接続した計 3 枚の基板で構成する。Tr2 は 2 並列一組となっており，計 4 個の Tr2 をヒートシンクに直接固定している。また，ARCP 型双方向チョップ回路のメインスイッチ(Qs1,Qs2)はそれぞれ TO247 の 3 並列とし，それに対して ARCP 共振回路のスイッチ



図 9 主回路構造

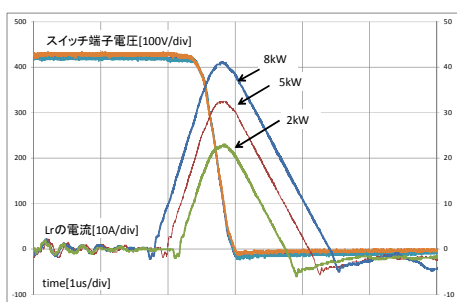
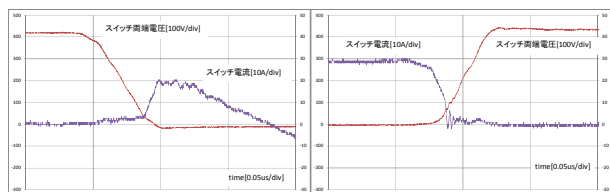


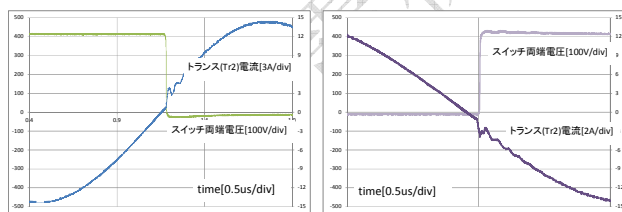
図 10 スイッチ端子電圧と Lark 電流(放電時)



(a)Turn on

(b)Turn off

図 11 ARCP 型双方向チョップ回路波形



(a)Turn on

(b)Turn off

図 12 電流共振型 DC/DC コンバータのスイッチング波形

(Qr1, Qr2)はそれぞれ TO247 一つの SJ-MOSFET で構成している。

〈4・3〉動作確認

図 10 は負荷を変化させたときのスイッチの両端電圧と Lr の電流の関係を示している。LC 共振周波数は LC 値に依存し、負荷の大きさに依存しない。負荷を上げたときに Lr の電流のピーク値が上昇するのは負荷電流(Lout の電流)が大きくなるとその電流が大きくなった分転流時間が増える

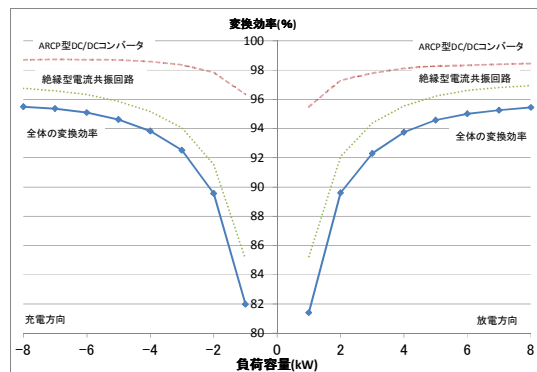


図 13 効率特性

からである。図 10 の波形では共振部分の周期が負荷に依存せず、負荷が大きくなるにつれて共振が起こるまでの時間が増えていることが確認できる。以上のことからこれらの波形の妥当性が確認できる。

図 11, 図 12 へそれぞれ ARCP 型双方向チョップ回路, 電流共振型 DC/DC コンバータのスイッチング波形を示す。これらの波形より、前者では Turn-on で ZVS, Turn-off で ZCS, 後者では Turn-on, Turn-off の両方で ZCS になっていることが確認できた。

〈4・4〉効率特性

図 13 は変換効率の負荷依存性を示したグラフである。実験結果より、ARCP 型双方向チョップ回路は 4kW~8kW 負荷時では充放電共に 98%以上の変換効率を実現できた。また、電流共振型絶縁 DCDC コンバータは 5kW~8kW 負荷試験において充放電で 96%以上の変換効率となった。8kW のシステム全体の変換効率としては充電方向で 95.5%, 放電方向で 95.4%の変換効率を達成できることが分かった。

5 まとめ

双方向チョップ回路と絶縁 DCDC コンバータのシステムで 8kW の実験を行った結果、放電時で最大 95.4%, 充電時で最大 95.5%の変換効率を達成した。10kW のシステムであるため、さらなる効率改善が期待できる。電圧範囲が 10 倍を超える場合でも使用できる双方向コンバータであるため今後様々なバッテリー電圧の EV に対応でき、V2H, HEMS などのシステムにも有用な方式である。

文 献

- (1) 長井, 佐藤, 伊東, 森田:「高効率・低ノイズ DC リンク共振三相インバータと転流制御」, 電気学会論文誌 D, Vol.120, No.3, pp.100 (2000)
- (2) 長井, 佐藤, 伊東, 森田:「高効率・低ノイズ共振型三相変換器」, 電気学会論文誌 D, Vol.122, No.3, pp.100 (2002)
- (3) 山本, 森井, 舟曳:「平滑キャパシタレス ARCP 方式ソフトスイッチングインバータ」, 電気学会論文誌 D, Vol.130, No.2, (2010)
- (4) 清水, 鳥羽, 木村:「補助共振転流ボール型 PWM インバータの損失最小化条件と実用上の問題点」, 電気学会論文誌 D, Vol.118, No.3, (1998)