

# DC-DC Converter with AC Internal Heating Capability for Lithium-Ion Batteries

Masatoshi Uno, Yuta Sasama, Motoki Sato

4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511 Japan

## *Abstract:*

Lithium-ion batteries in electric vehicles need to be adequately heated at low temperatures to avoid the decrease in discharge capacity. AC heating techniques utilizing Joule heat generated by the internal resistance of batteries have been proposed. Although these techniques achieve higher heating efficiency and uniform heating, an ac heating inverter is separately necessary to produce the ac current, likely resulting in increased system complexity and cost. This paper proposes a dual active bridge (DAB) converter integrating an inverter for ac heating in electric vehicles. The proposed converter is derived by sharing two legs of both converters, achieving the simplified system and low-cost. Experimental results of a prototype with a charge-discharge power rating of 300 W demonstrated that in addition to the bidirectional power flow, the proposed converter heated up the twelve-cell battery from  $-11^{\circ}\text{C}$  to  $0^{\circ}\text{C}$  within 10 min.

# リチウムイオンバッテリーの交流内部加熱機能を有する DC-DC コンバータの開発

茨城大 鶴野将年、笹間裕太、佐藤元基

## 1. はじめに

人工衛星や探査機で用いられるリチウムイオンバッテリー (LIB) は、低温環境下で内部抵抗が増加することに起因して放電容量が大幅に低下する。したがって、低温環境下での使用が想定される場合、LIB の適切な加熱が不可欠である。汎用的に用いられる外部加熱手法では電熱線ヒータ等を用いて熱伝導により LIB の加熱を行う。しかし、熱伝導の過程において熱漏れが生じるため加熱効率低下し、更には LIB の表面と内部の間で加熱ムラが生じるため LIB の早期劣化を引き起こす恐れがある。

これらの課題の一解として内部加熱手法が提案されている(1)。LIB に電流を流すことで内部抵抗より生じるジュール熱を利用する。熱媒体を介した熱伝導を要しないことから加熱漏れが発生せず、外部加熱と比較して高い加熱効率を達成できる。また、LIB 自身が内部から発熱するため加熱ムラが生じず、均一な加熱が可能である。

交流加熱方式を適用した LIB システムを Fig. 1 に示す。このシステムでは LIB の充放電を担う双方向コンバータに加えて、交流電流を生成するためのインバータが別途必要となる。インバータは複数個のスイッチを必要とするため、交流加熱方式はシステムの複雑化や高コスト化が課題となる(8)。

システムの簡素化と低コスト化を目的に、本論文では交流加熱インバータを統合した双方向コンバータを提案する。双方向コンバータである DAB (Dual Active Bridge) コンバータと交流加熱インバータのレグを共有させ、1 台に統合することで提案回路を導出する。2 つのコンバータの統合によりスイッチ数を削減し、システムの簡素化と低コスト化を実現する。

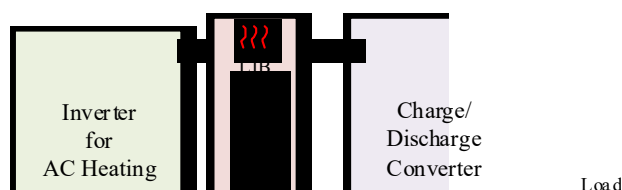


Fig. 1. LIB system using ac heating inverter.

## 2. 提案回路

### 2.1 回路構成

本稿で提案するコンバータを Fig. 2 に示す。本回路は 2 台のコンバータの  $Q_{1H}$ - $Q_{1L}$  と  $Q_{2H}$ - $Q_{2L}$  を共有させ 1 台に統合することで導出される。双方向コンバータと交流加熱インバータを別々に使用する従来の回路構成と比較し、統合によりシステムを簡素化しつつスイッチ数を 4 つ削減することで低コスト化を達成する。

### 2.2 動作原理

本回路は交流加熱モードと電力伝送モードのいずれかで動作する。2 つのモード非干渉となるよう、それぞれ異なるスイッチング周波数  $f_s$  で動作させる。交流加熱モードでは、LIB の充放電を引き起こさないよう  $f_s$  を数 kHz とする。トラ

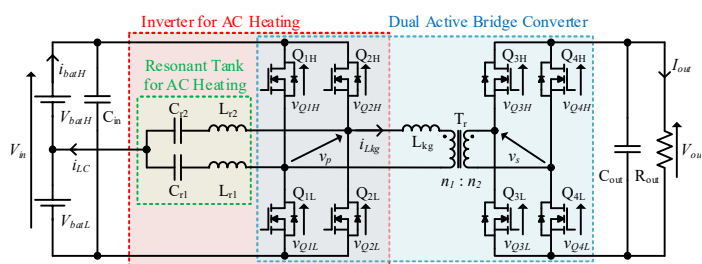


Fig. 2. Proposed DAB converter.

ンス1次側のスイッチのみを使用し、直列共振により交流電流  $i_{LC}$  を生成する。共振周波数  $f_r$  は  $f_s$  の2倍程度に設定して動作させる。

電力伝送モードでは汎用のDABコンバータと同様、 $f_s$  は数十kHzとする。全てのスイッチを使用し、位相シフト制御により双方向の電力伝送を行う。

提案回路では交流加熱モードと電力伝送モードは非干渉、つまり電力伝送時は交流加熱を行うことはできない。しかし、電力伝送時にはLIBに直流電流が流れるため、直流電流によるジュール熱でLIBの温度をある程度維持することができる。また、一般的に温度の時間的変化は緩やかであり、LIBを一旦加熱した後に低温まで冷えるには長い時間を要するため、加熱と電力伝送を同時に行う必要性は高くない。

### 2.3. 加熱モード

本稿では紙面の都合上、加熱モードについてのみ解説する。交流加熱モードにおける動作波形をFig. 3に、動作モードをFig. 4にそれぞれ示す。 $V_{batH}$ と $V_{batL}$ の電流をそれぞれ $i_{batH}$ 、 $i_{batL}$ とする。ハイサイドスイッチ $Q_{1H}$ 、 $Q_{2H}$ 、ローサイドスイッチ $Q_{1L}$ 、 $Q_{2L}$ はそれぞれ同期させる。

**Mode 1 [Fig. 4(a)]:**  $i_{LC} = 0$  の状態で  $Q_{1H}$  と  $Q_{2H}$  にゲート信号  $v_{gs1H}$  と  $v_{gs2H}$  を与えてターンオンする。共振タンクの電圧は  $v_{LC1} = v_{LC2} = V_{batH}$  となり  $i_{LC}$  が流れる。 $i_{LC}$  は  $i_{batH}$  と  $i_{batL}$  に分流し、LIBの内部抵抗より生じるジュール熱が  $V_{batH}$  と  $V_{batL}$  をそれぞれ加熱する。 $Q_{1H}$  と  $Q_{2H}$  を介してトランスの1次巻線が短絡するため、1次巻線電圧  $v_p$  は0である。 $i_{LC}$  の極性は正から負に切り替わる。 $i_{LC}$  が再び0になる前に  $v_{gs1H}$  と  $v_{gs2H}$  を0にする。

**Mode 2 [Fig. 4(b)]:**  $i_{LC} = 0$  になるとMode 2に移行する。電流は  $C_{in}$  にのみ流れる。

**Mode 3 [Fig. 4(c)]:**  $i_{LC} = 0$  の状態で  $Q_{1L}$  と  $Q_{2L}$  にゲート信号  $v_{gs1L}$  と  $v_{gs2L}$  を与えてターンオンする。 $v_{LC1} = v_{LC2} = -V_{batH}$  となり  $i_{LC}$  が流れる。 $Q_{1L}$  と  $Q_{2L}$  を介してトランスの1次巻線が短絡するため、 $v_p$  は0である。 $i_{LC}$  の極性は負から正に切り替わる。 $i_{LC}$  が再び0になる前に  $v_{gs1L}$  と  $v_{gs2L}$  を0にする。

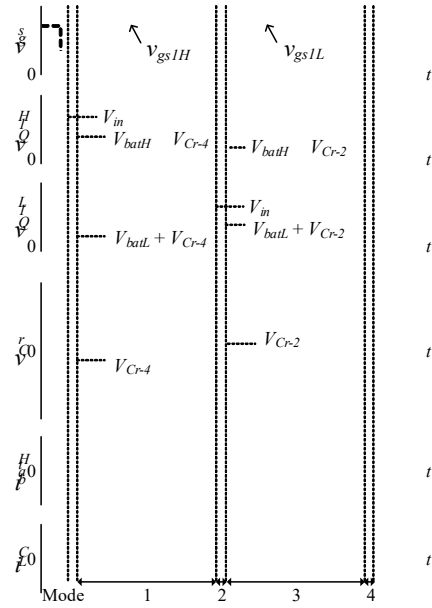


Fig. 3. Proposed DAB converter.

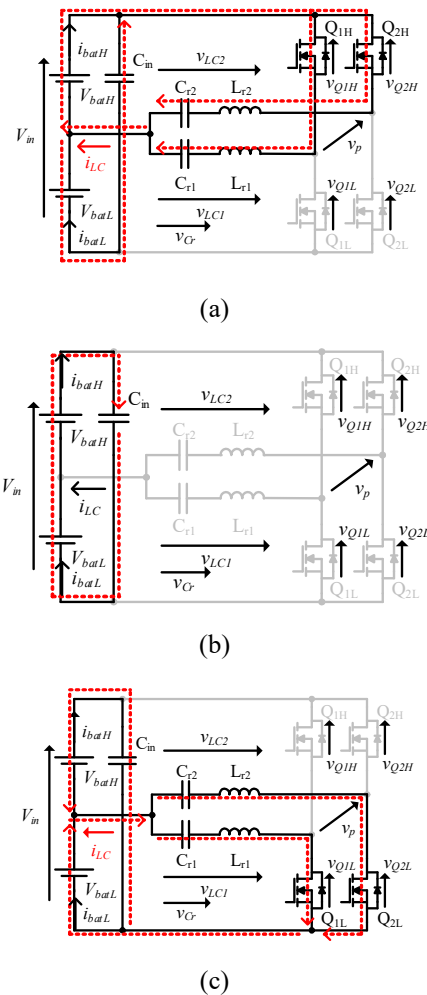


Fig. 4. Operation in ac heating mode. (a) Mode 1, (b) 2 and 4, and (c) 3.

**Mode 4** [Fig. 5(b)]: Mode 2 と同様の動作となり  $i_{LC} = 0$  である。

### 3. 実験結果

充放電電力定格が 300 W の 12 セル用試作回路を Fig. 5 に示す。  $V_{in}$  と  $V_{out}$  はそれぞれ 48 V と 200 V である。交流加熱モードにおいて DCM で動作させるために、  $f_r$  は 5.4 kHz、  $f_s$  は 2.5 kHz とした。電力伝送モードでの  $f_s$  は 50 kHz とした。実験系を Fig. 6 に示す。恒温槽内に 12 セル直列の LIB を設置し、初期温度を  $-11^{\circ}\text{C}$  とした。交流加熱モードの動作波形を Fig. 7 に示す。Mode 2 と 4 を除き Fig. 3 の理論波形と概ね一致し、共振動作による  $i_{LC}$  の生成と DCM 動作を確認した。

LIB の温度推移を Fig. 8 に示す。LIB の温度は約 10 分で  $0^{\circ}\text{C}$  まで上昇した。加熱前後における LIB の温度分布を Fig. 9 に示す。LIB の温度が不均一となっているが、これは恒温槽内の対流により放熱が不均一であったことが要因であり交流加熱による加熱ムラではない。適切な熱設計が施される実用の LIB システムでは放熱がより均一な環境が想定されるため、対流による温度ムラの程度は小さくなると考えられる。

直流電源と電子負荷を用いて双方向の電力伝送実験を行った。本実験では LIB の代わりに電解コンデンサを接続した。また、共振タンクの有無による電力変換効率の比較のため、共振タンクを取り外した状態で DAB コンバータ単体の電力変換効率も取得した。

取得した出力電力特性を Fig. 11 に示す。汎用の DAB コンバータと同様の位相シフト制御を達成した。放電時において取得した電力変換効率を Fig. 12 に示す。定格電力時における電力変換率は、従来の DAB コンバータ単体では 90.7%、提案回路は 90.4%であった。よって、提案回路における共振タンクは、DAB コンバータの電力変換効率にほとんど影響を与えないことが示された。

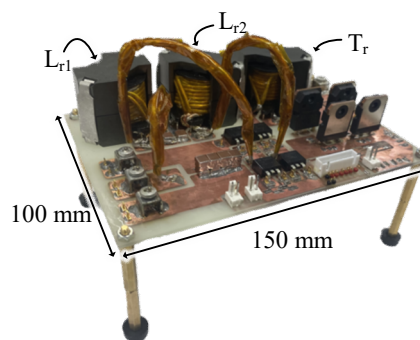


Fig. 5. Prototype with a charge-discharge power rating of 300 W.



Fig. 6. Experimental platform using thermostatic chamber for LIB heating.

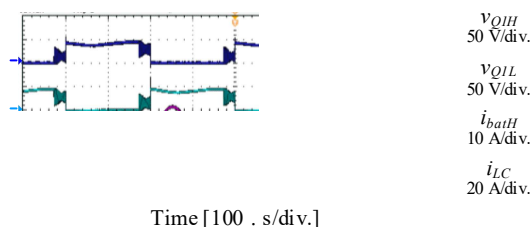


Fig. 7. Measured waveforms in ac heating mode.

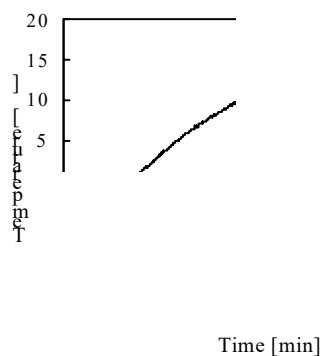


Fig. 8. Temperature evolution of LIB surface.

#### 4. まとめ

LIB 向け交流加熱インバータを統合した DAB コンバータを提案した。提案回路は交流加熱インバータと DAB コンバータを 1 台に統合することで導出される。統合によりシステムを簡素化しつつ、スイッチ数の削減により低コスト化を達成する。提案回路は交流加熱モードと電力伝送モードのいずれかで動作し、2 モードは互いに非干渉である。交流加熱モードでは LIB の劣化を防止するために  $f_s$  を数 kHz とし、LIB の加熱を行う。電力伝送モードでは、従来の DAB コンバータと同様に動作させることを目的に  $f_s$  を数十 kHz とし、双方向に電力を伝送する。

12 セル用試作回路を用いて加熱実験と電力伝送実験を行った。10 分間の交流加熱により LIB を  $-11^\circ\text{C}$  から  $0^\circ\text{C}$  まで昇温できたことから、提案回路による LIB 加熱の有効性が示された。また、従来の DAB コンバータと同等の電力変換効率で双方向の電力伝送を達成した。

#### 参考文献

- [1] Y. Ji and C. Y. Wang. "Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures," *Electrochimica Acta*, vol. 107, no. 30, pp. 664–674, 2013.
- [2] Y. Shang, B. Xia, N. Cui, C. Zhang, and C. C. Mi. "An automotive onboard ac heater without external power supplies for lithium-ion batteries at low temperatures," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 9, pp. 7759–7769, 2018.

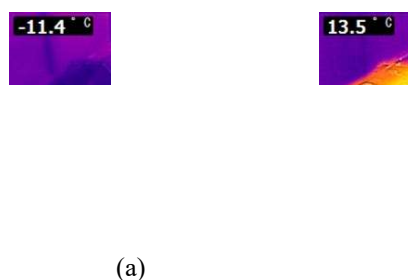


Fig. 9. Temperature distribution (a) before heating and (b) after heating for 60 minutes.

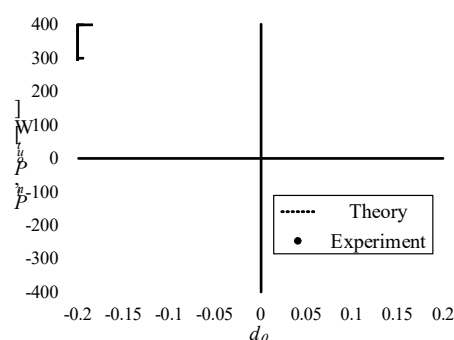


Fig. 10. Measured  $P_{in}$  and  $P_{out}$  as a function of  $d_\phi$ .

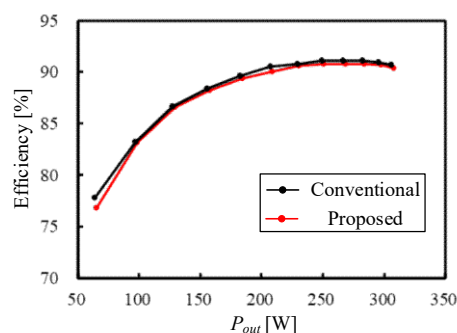


Fig. 11. Power conversion efficiencies.