

リチウムイオンバッテリー向け交流加熱インバータを統合した 電動車両用 DAB コンバータの実機検証

笹間 裕太* 佐藤 元基 鵜野 将年 (茨城大学)

Experimental Verification of DAB Converter Integrating AC Heating Inverter for Lithium-Ion Battery of Electric Vehicles

Yuta Sasama*, Motoki Sato, Masatoshi Uno, (Ibaraki University)

Lithium-ion batteries in electric vehicles need to be heated at low temperatures to avoid the decrease in discharge capacity. AC heating techniques achieving higher heating efficiency and uniform heating have been proposed. However, these techniques increase system complexity and cost. This paper proposes a dual active bridge (DAB) converter integrating an ac heating inverter. This converter is derived by sharing two legs of converters. 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 the twelve-cell battery from -11°C to 0°C within 10 min.

キーワード：リチウムイオンバッテリー，DAB コンバータ，交流加熱，電動車両，低温環境
(Lithium-ion battery, dual active bridge converter, ac heating, electric vehicle, low temperature)

1. はじめに

近年，環境問題への意識の高まりから温室効果ガスを排出しない電動車両が注目を集めている。電動車両は電力源として，高エネルギー密度，長寿命といった利点を持つリチウムイオンバッテリー (LIB: Lithium-Ion Battery) を用いる。しかし，実用では低温環境下での内部抵抗の増加が課題となる。例として，C/3 の放電レートにおける LIB 放電特性の温度依存性を Fig. 1 に示す。氷点下では内部抵抗の増加に起因し，電圧の低下に加えて放電時間が大幅に短縮される。これは航続距離の減少に直結するため，寒冷地では LIB の適切な加熱が不可欠となる。

これまでに提案されている加熱手法は，外部加熱手法と内部加熱手法の 2 つに大別される⁽¹⁾。外部加熱手法では空気や水を熱媒体とし，電熱線ヒータ等により加熱を行う。しかし，熱伝導の過程で加熱漏れが生じることで加熱効率が低下するのみならず，加熱ムラにより LIB が早期に劣化する恐れがある。

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⁾。本手法では 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の過程を必要としないことから加熱漏れが発生せず，外部加熱と比較し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。

内部加熱手法は直流加熱と交流加熱の 2 方式に分けられる。2 方式の電流経路の違いを LIB の等価回路を用いて Fig. 2 に示す。等価回路は開放電圧 V_{cell} ，電解液抵抗 R_{sol} ，電気二重層容量 C_{dl} ，電荷移動抵抗 R_{ct} から構成され， R_{ct} を経由

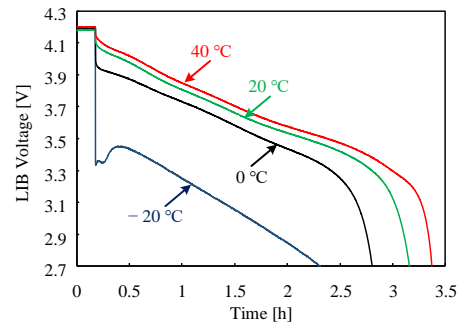


Fig. 1. Discharge characteristics of LIB with C/3 rate at four temperatures.

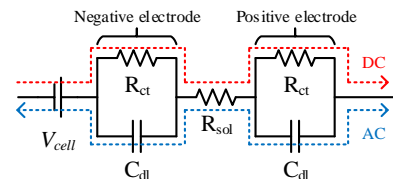


Fig. 2. Current flow directions in LIB using internal heating techniques.

する電流は LIB の充放電反応に寄与する⁽²⁾。直流電流は R_{ct} を経由するため，直流加熱方式では充放電反応を伴う。しかし，低温環境下における充電時には電極表面でリチウムが析出し，早期劣化や内部短絡を招く恐れがある。一方，周波数が数 kHz 以上の交流では C_{dl} を経由する電流が支配的となる⁽³⁾。これにより交流加熱は LIB の充放電反応を伴わないため，劣化を引き起こすことなく加熱可能である⁽⁴⁾。しかし，交流加熱方式を適用した LIB 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，交流電流生成を担うインバータを別途必要とする。インバータは複数のスイッチ

ング素子を必要とするため、システムの複雑化や高コスト化が課題となる。

本論文では LIB システムの簡素化と低コスト化を目的に、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。12 セル用試作回路を用いて LIB 加熱実験と電力伝送実験を行い、提案回路の有効性を確認したため報告する。

2. 提案回路

〈2・1〉 基礎回路 LIB の交流加熱を目的としたインバータとして、Fig. 3(a)に示す直列共振インバータが提案されている⁽⁴⁾。本回路は2つのレグ Q_{1H} - Q_{1L} と Q_{2H} - Q_{2L} 、2つの共振タンク C_{r1} - L_{r1} と C_{r2} - L_{r2} 、直列接続された2つのバッテリー V_{batH} と V_{batL} から構成される。共振タンクは V_{batH} と V_{batL} の中点と Q_{1H} - Q_{1L} レグと Q_{2H} - Q_{2L} レグの各中点にそれぞれ接続される。レグと共振タンクで構成される共振回路を2相並列化し電流容量を増強することで、大電流による短時間での加熱を可能とする。デューティ $d=0.5$ でスイッチング周波数 f_s を固定し、フィードバック制御を必要としない。また、ゼロ電流スイッチング (ZCS : Zero Current Switching) によりスイッチング損失を低減する。

Fig. 3(b)に示す DAB コンバータは従来回路と同様のものである。トランスの1次と2次巻線間の電圧に位相差を設けることで、双方向に電力を伝送する。すべてのスイッチが広い範囲でゼロ電圧スイッチング (ZVS : Zero Voltage Switching) を達成可能である⁽⁵⁾。

〈2・2〉 回路構成と動作モード 本論文で提案する DAB コンバータを Fig. 4 に示す。本回路は Fig. 3 で示した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した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、レグの共有によりスイッチ数を4つ削減し低コスト化を達成する。

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つのモードが非干渉となるよう、それぞれ異なる f_s で動作させる。

交流加熱モードでは LIB の充放電を伴わない加熱を実現するため、 f_s を数 kHz とする。トランス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 を f_s の2倍程度に設定し、電流不連続モード (DCM: Discontinuous Current Mode) で動作させる。DCM は定電流特性を示すことが知られており、LIB の過電流保護が可能である⁽⁶⁾。

電力伝送モードでは従来の 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。本モードでは、 f_s が f_r よりも十分高くなるよう設定する。これにより共振タンクは

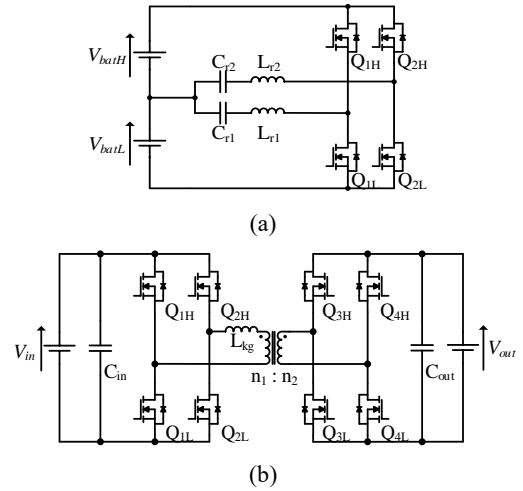


Fig. 3. Key elements. (a) Series-resonant inverter for ac heating. (b) DAB converter.

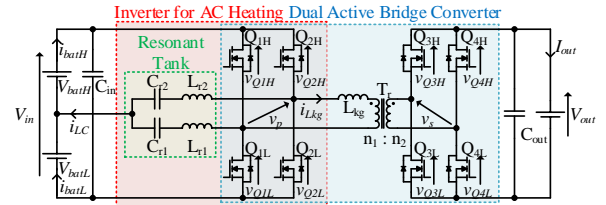


Fig. 4. Proposed DAB converter.

高インピーダンスとなるため、共振タンクに i_{LC} を流すことなく1次と2次巻線間での電力伝送を達成する。よって共振タンクの追加は電力伝送に影響せず、従来の DAB コンバータと同様に動作可能である。

3. 動作解析

〈3・1〉 交流加熱モード 交流加熱モードにおける理想動作波形を Fig. 5 に、電流経路を Fig. 6 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. 6(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、ZCS ターンオンを達成する。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となる。 i_{LC} の極性は正から負に切り替わる。 i_{LC} が再度0になる前に、 v_{gs1H} と v_{gs2H} を0にする。 Q_{1H} と Q_{2H} がターンオフするとボディダイオードが導通し、ZVS ターンオフを達成する。

Mode 2 [Fig. 6(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. 6(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、ZCS ターンオンを達成する。 $v_{LC1} = v_{LC2} = -V_{batH}$ となり i_{LC} が流れる。トランスの1次巻線が短絡するため v_p は0となる。 i_{LC} の極性は負から正に切り替わる。 i_{LC} が再度0になる前に、 v_{gs1L} と v_{gs2L} を0にする。 Q_{1L} と Q_{2L} がタ

ーンオフするとボディダイオードが導通し、ZVS ターンオフを達成する。

Mode 4 [Fig. 6(b)]: Mode 2 と同様の動作となり、 $i_{LC} = 0$ である。

1 周期を通じて v_p は常に 0 である。よって、2 次側に電力を伝送することなく LIB の加熱を行うことが可能である。また、すべてのスイッチで ZCS ターンオン及び ZVS ターンオフを達成可能である。

(3.2) 電力伝送モード 1 次側から 2 次側へ電力伝送する状態を放電、逆方向を充電と定義する。 Q_{1H} - Q_{1L} と Q_{4H} - Q_{4L} 間の位相差 ϕ を 360° で正規化した位相シフトデューティを ϕ_d ($\phi_d = \phi/360^\circ$) と定義する。各スイッチのデューティ d は電力伝送量が最大となるよう 0.5 で固定し、デッドタイムは十分短く無視できるものとする。

(2.2) 節で述べた通り、 f_r と比較し f_s を十分大きい値とすることで従来の DAB コンバータ⁽⁵⁾と同様の原理で動作する。 V_{bath} と V_{batL} の和を V_{in} 、1 周期を T_s 、トランスの漏れインダクタンスを L_{kg} 、 L_{kg} の電流を i_{Lkg} とすると DAB コンバータの出力電流 I_{out} は以下で与えられる。

$$I_{out} = \frac{2}{T_s} \frac{V_{in}}{V_{out}} \int_{T_0}^{T_2} i_{Lkg} dt$$

$$= \frac{V_{in} n_1}{L_{kg} f_s n_2} \phi_d (1 - |2\phi_d|) \dots \dots \dots (1)$$

出力電力 P_{out} は、

$$P_{out} = I_{out} \cdot V_{out}$$

$$= \frac{V_{in} V_{out} n_1}{L_{kg} f_s n_2} \phi_d (1 - |2\phi_d|) \dots \dots \dots (2)$$

よって、 ϕ_d の操作により I_{out} 、 P_{out} を制御可能である。

4. 実機検証

(4.1) 回路設計 充放電電力定格が 300 W の 12 セル用試作回路を Fig. 7 に示す。実機検証で使用した素子定数を Table 1 に示す。 V_{in} と V_{out} はそれぞれ 48 V と 200 V である。

(2.2) 節で述べた通り、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。

(4.2) LIB 加熱実験 LIB 加熱実験では恒温槽内に 12 セル直列の LIB を設置し、LIB の初期温度を -11°C とした。交流加熱モードの動作波形を Fig. 8 に示す。Fig. 5 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 での動作を確認した。

LIB の温度推移を Fig. 9 に示す。LIB の温度は約 10 分で 0°C まで上昇した。加熱前後における LIB の温度分布を Fig. 10 に示す。Fig. 10(b) より、LIB の温度が不均一であったことが分かる。これは恒温槽内の対流により LIB から外気への放熱が不均一であったことが要因であると考えられ、交流加熱による加熱ムラを意味していない。

(4.3) 電力伝送実験 直流電源と電子負荷を使用し双方向の電力伝送実験を行った。本実験では LIB の代わりに大容量の電解コンデンサを接続した。また共振タンクの有無に

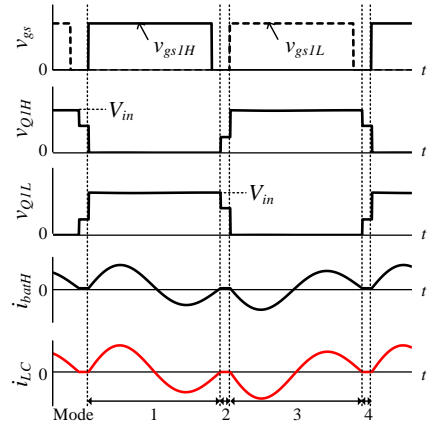


Fig. 5. Key operation waveforms in ac heating mode.

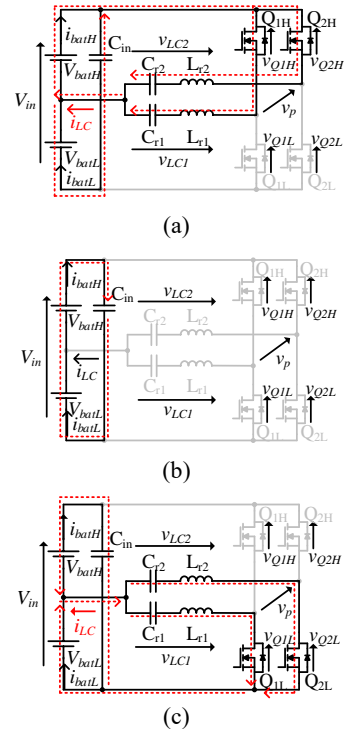


Fig. 6. Current flow directions in ac heating mode. (a) Mode 1, (b) Modes 2 and 4, and (c) Mode 3.

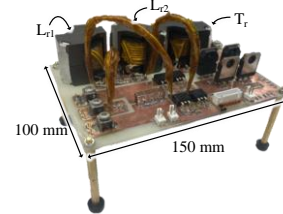


Fig. 7. Photographs of prototype with a charge-discharge power rating of 300 W.

Table 1. Component values.

Component	Symbol	Value
Switch	$Q_{1H}, Q_{2H}, Q_{1L}, Q_{2L}$	FDB110N15A, $R_{on} = 11 \text{ m}\Omega$
	$Q_{3H}, Q_{4H}, Q_{3L}, Q_{4L}$	IXFX98N50P3, $R_{on} = 50 \text{ m}\Omega$
Capacitor	C_{11}, C_{12}	Ceramic capacitor, 15 μF
	C_{in}	Ceramic capacitor, 15 $\mu\text{F} \times 12$
	C_{out}	Aluminum electrolytic capacitor, 220 μF
Inductor	L_{r1}, L_{r2}	57 μH
	L_{kg} (transformer)	1 μH
	L_{kg} (auxiliary)	13 μH
Transformer	T_r	$n_1 : n_2 = 3 : 13$

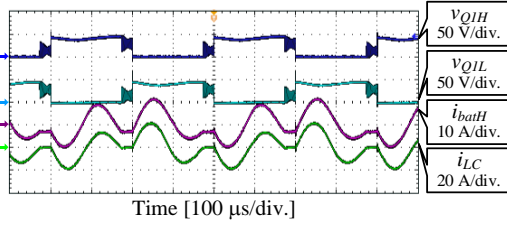


Fig. 8. Measured key waveforms in ac heating mode.

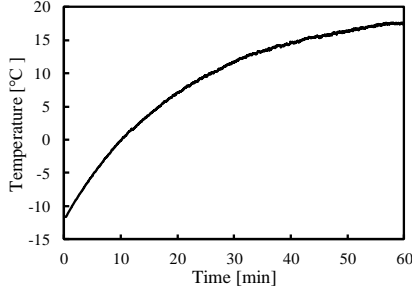


Fig. 9. Temperature evolution of LIB surface.

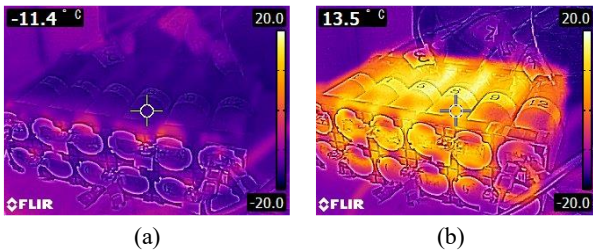


Fig. 10. Temperature distributions (a) before heating and (b) after heating for 60 minutes.

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。

定格時における電力伝送モードの動作波形を Fig. 11 に示す。 i_{LC} が i_{Lkg} に対し十分に小さいことから、共振タンクに電流を流さず電力伝送が可能であることを実証した。

取得した $P_{out}-\phi_d$ 特性を Fig. 12 に示す。 $\phi_d=0.167$ で P_{out} は定格電力 300 W に到達した。デッドタイムや損失による誤差が見られたものの、理論値と概ね一致した。

放電時の電力変換効率を Fig. 13 に示す。定格時における電力変換効率は、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、提案回路において共振タンクの追加は電力変換効率に大きく影響しないことを確認した。

5. まとめ

LIB 向け交流加熱インバータを統合した電動車両用 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 コンバータのレグを共有させ、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、レグの共有に伴う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 モードが非干渉となるよう異なる f_s で動作させる。交流加熱モードでは LIB の劣化を防ぎつつ、電力伝送モードに影響しないよう f_s を数 kHz とし、LIB の加熱を行う。電力伝送モー

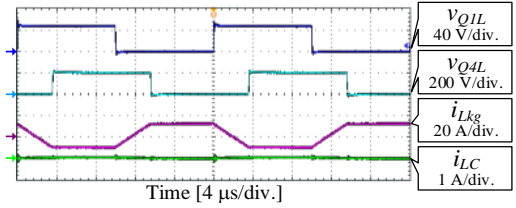


Fig. 11. Measured key waveforms at 300 W in power transfer mode.

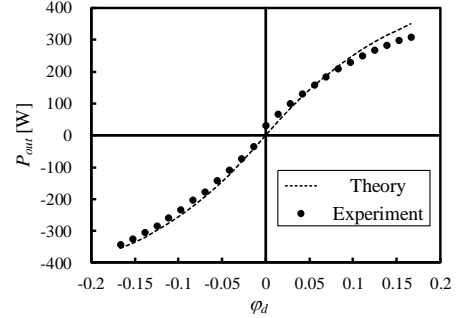


Fig. 12. Measured characteristics of P_{out} as a function of ϕ_d .

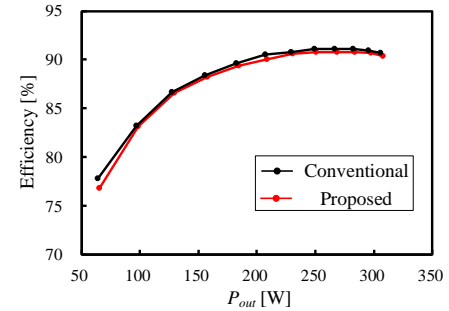


Fig. 13. Measured power conversion efficiencies.

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 LIB 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°C から 0°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 コンバータと比較し、電力変換効率を大きく低下させることなく双方向の電力伝送を達成した。

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) M. Uno and K. Tanaka: "Influence of high-frequency charge-discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cells," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 60, No. 4, pp. 1505–1515 (2011)
- (3) A. Jossen: "Fundamental of battery dynamics," *J. Power Sources*, Vol. 154, No. 2, pp. 530–538 (2006)
- (4) Y. Shang, K. Liu, N. Cui, Q. Zhang, and C. Zhang: "A sine-wave heating circuit for automotive battery self-heating at subzero temperatures," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, Vol. 16, No. 5, pp. 3355–3365 (2020)
- (5) R. W. De Doncker, D. M. Divan, and M.H. Kheraluwala: "A three-phase soft-switched high power density dc/dc converter for high power applications," *IEEE, Trans. Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 1, pp. 63–73 (1991)
- (6) M. Uno and A. Kukita: "Bidirectional PWM converter integrating cell voltage equalizer using series-resonant voltage multiplier for series-connected energy storage cells," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 11, pp. 8500–8513 (2017)