

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03996

研究課題名（和文）電気自動車に既存する電力変換器を利用した、バッテリー用交流内部加熱手法の開発

研究課題名（英文）Development of AC Internal Heating Technique Utilizing Power Converters Existing in Electric Vehicles

研究代表者

鵜野 将年（Masatoshi, Uno）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：70443281

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：寒冷地における電気自動車では、リチウムイオンバッテリー（LIB）の特性劣化を防止するための加熱が不可欠である。高効率の手法として、交流内部加熱手法が注目を集めている。しかし、インバータが別途必要となるためシステムが複雑化する。また、三角波や正弦波電流による従来の交流内部加熱手法では、低い電流実効値による長い加熱時間が課題となる。本研究では、電気自動車に既存する電力変換器を利用した交流内部加熱手法を開発した。試作回路を用いた実機検証により、本来の電力変換機能に加えて、バッテリーを-10度程度から0度まで数分程度で加熱できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

寒冷地ではバッテリー性能が大幅に劣化することにより航続距離が半減することが報告されており、寒冷地での実用化に際して加熱技術は不可欠である。電気自動車に既存する電力変換器を利用することで最小限の追加コストで加熱機能を付加することができるため、本技術により電気自動車の寒冷地における実用性を大幅に高めることができる。

研究成果の概要（英文）：For electric vehicles in cold regions, heating is essential to prevent the characteristics of lithium-ion batteries (LIBs) from deteriorating. AC internal heating is attracting attention as a highly efficient method. However, this requires a separate inverter, which complicates the system. In addition, conventional AC internal heating methods using triangular or sine wave currents suffer from long heating times due to low effective current values. In this study, we developed an AC internal heating method that uses the existing power converter in electric vehicles. Through actual testing using a prototype circuit, we demonstrated that in addition to the original power conversion function, the battery can be heated from around -10 degrees Celsius to 0 degrees Celsius in just a few minutes.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電気自動車 加熱 バッテリー 寒冷地 インバータ 電力変換 コンバータ

1. 研究開始当初の背景

電気自動車 (EV) の電力源であるリチウムイオンバッテリー (LIB) の特性は低温下で極端に劣化するため、寒冷地において航続距離の短縮を招く。LIB の内部抵抗におけるジュール熱を利用した「交流内部加熱」は、熱漏れや加熱ムラを伴わない高効率の加熱手法として有望視されている。しかし、LIB に対して数 kHz の交流電流を与える必要があり、そのためにはインバータが追加が必要となるため EV の複雑化ならびに高コスト化を招く。

本研究では、EV に既存する電力変換器 (充放電器、バランス回路など) を利用した交流内部加熱手法を開発する。電力変換回路の動作モードの工夫もしくは少数個の部品の追加のみにより、インバータを用いることなく交流内部加熱を実現する。各種の電力変換器に対する詳細解析に基づき実機を設計・製作し、各々の電力変換器の本来の機能 (充放電、バランス) に加えて交流内部加熱を実現できることを実証する。

2. 研究の目的

EV の電力源として用いられる LIB の特性は温度に大きく依存し、氷点下での内部抵抗は常温時と比べて 10 倍以上となり航続距離は半分以下に低下してしまう。特性劣化防止のために加熱用ヒータが用いられるが、空気や水を熱媒体として用いる「外部加熱」では熱漏れが生じるため加熱効率が悪く、更には加熱ムラによる LIB の早期劣化が懸念される (図 1a)。一方、LIB の内部抵抗で生じるジュール熱を利用した「交流内部加熱」では熱漏れや加熱ムラが生じないため、EV 用 LIB の加熱手法として有望視されている [1], [2] (図 1b)。交流内部加熱では、電池反応を伴うことなくジュール熱のみ

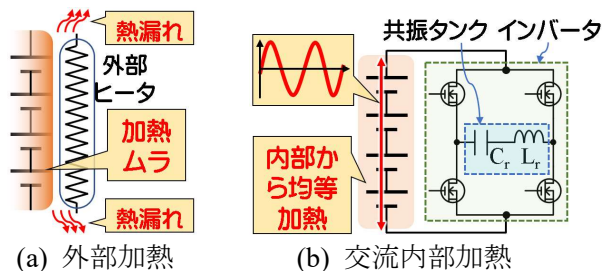


図 1. LIB の加熱手法

を生じさせるよう、電池反応が不感となる周波数 (数 kHz 以上) の交流電流を LIB に与える。しかし、交流内部加熱電流を生成するためにはインバータが別途必要となるため、EV 電源システムの複雑化ならびに高コスト化を招く。

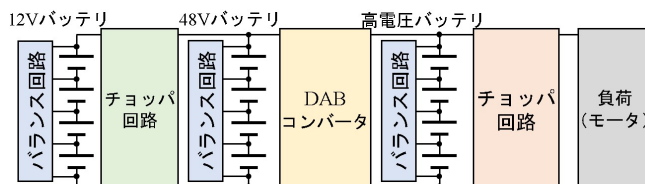


図 2. EV 電源システム

本研究では、EV に既存する電力変換器を利用した交流内部加熱手法を開発する。図 2 に示すように、EV にはチョップ、Dual Active Bridge (DAB) コンバータ、バランス回路などの多数の直流電力変換器が存在する。これらの電力変換器の動作モードを工夫もしくは少数個の部品を追加することで、インバータを用いることなく交流内部加熱を実現する。これにより、EV の航続距離の拡大のみならず高効率の LIB 加熱、更には電源システムの劇的な簡素化と低コスト化を達成できる。

3. 研究の方法

■ Dual Active Bridge (DAB) コンバータ

汎用的な双方向電力変換器である Dual Active Bridge (DAB) コンバータに共振タンク (L_r と C_r) を追加した構成 (図 3A') の等価回路を図 4 に示す。DAB コンバータを充放電器として用いる「充放電モード (図 4a)」では、共振タンクの共振周波数よりも十分高い周波数でスイッチを駆動しつつ、トランス 1 次側と 2 次側の駆動位相差 ϕ を操作することで充放電電力を制御する。この時、共振タンクは高インピーダンスとなるため、交流加熱電流は流れない。一方、「交流内部加熱モード (図 4b)」では 1 次側と 2 次側の位相差 ϕ を 0° とすることでトランスを介した電力伝送 (充放電) が起こらないようにしつつ、数 kHz 程度の低い周波数で動作させることで共振により生じる交流電流を LIB に与えて交流内部加熱を行う。このように、動作モードに応じて位相差 ϕ と周波数を適切に操作することで、1 台の変換器で 2 つの機能 (充放電と交流内部加熱) を実現する。

■ バランス回路

バランス回路の動作モードを工夫する (図 3B) ことで交流加熱機能を付加した際の動作モードを図 5 に示す。バランスモードでは、漏洩インダクタンス L_{kg} を利用して数百 kHz の高い周波数で共振させることで、バランス回路を介してバッテリーから電圧の最も低いセルへと電力再分配が行われる (図 5a)。一方、交流加熱モードでは数 kHz 程度の低い周波数で駆動する。この時、トランスの励磁インダクタンス L_{mg} とブロッキングコンデンサ C_{bk} が数 kHz 程度で共振するよう設計しておく。共振により生じる交流電流を LIB に与えて交流内部加熱を行う (図 5b)。以上

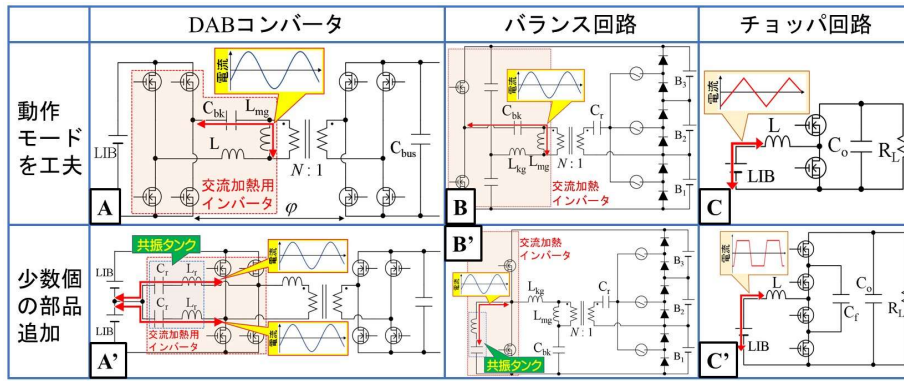


図3. 本研究で開発した、交流加熱機能を統合した直流電力変換器の例

のように、周波数の異なる2つの共振を利用することで、1台の回路でバランスと交流内部加熱の2つの機能を具現化する。

■チョップ回路

汎用のチョップ回路(図3C)を交流加熱に利用する場合、交流加熱電流は三角波となるため単位実効電流あたりのピーク値が高くなってしまいます。一方、少数個の部品を追加しマルチレベル構成とすることで(図3C')台形波電流を生成することができます。これにより単位実効電流あたりのピーク値を低減でき(図6)、回路素子の電流定格の低減、もしくは同一ピーク値あたりの実効電流の増加による加熱時間の短縮を達成することができます。台形波を用いることで理論的に加熱速度は三角波と比較して約3倍、正弦波と比較して約2倍となる。

4. 研究成果

上記回路のミニモデルとして、48VのLIBに対する各種実機を製作して(図4)、実証実験を行った。いずれの回路方式においても本来の機能(電力伝送機能やセルバランス機能)に加えてバッテリー加熱を実現できることを実証した。また、DABコンバータタイプに対しては加熱電流実効値を高めることが可能な台形波変調技術を開発し、汎用的な正弦波電流と比較して加熱時間を劇的に短縮できることを実証した(図5a)。

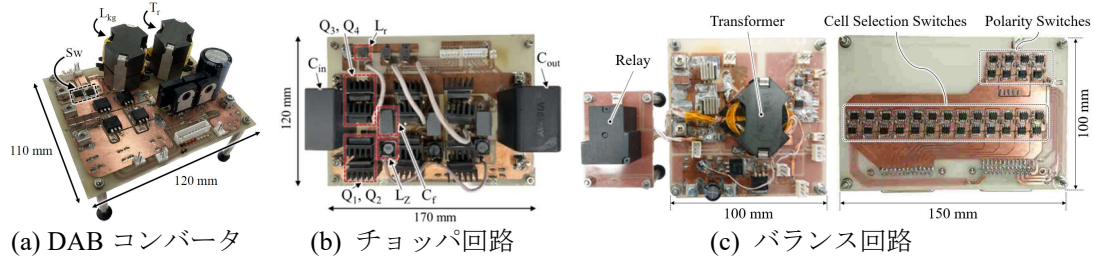


図4. 各種試作回路

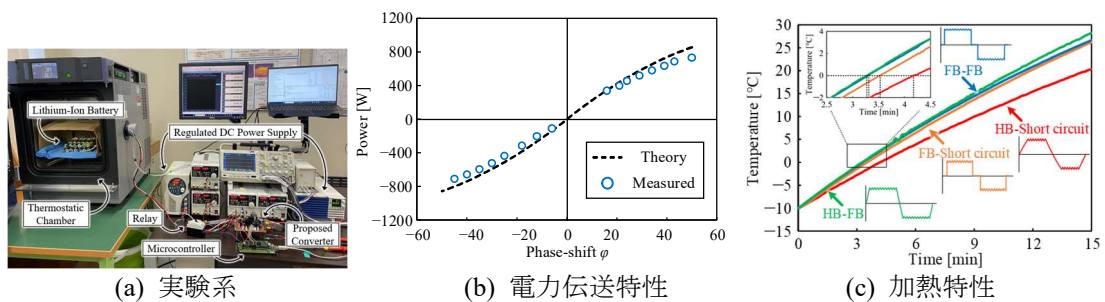


図5. DABコンバータタイプの実験結果

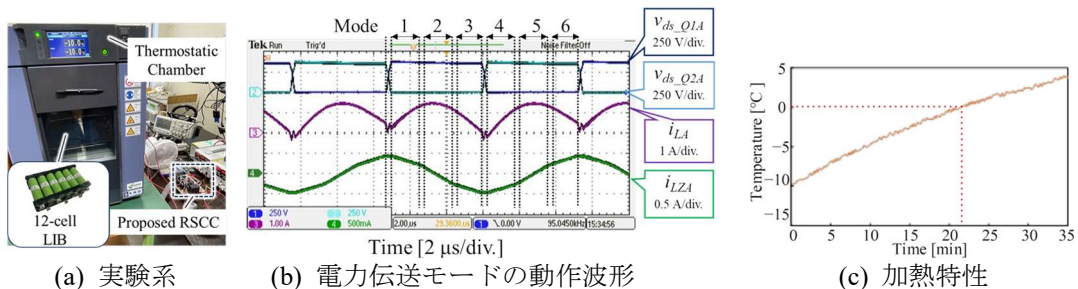
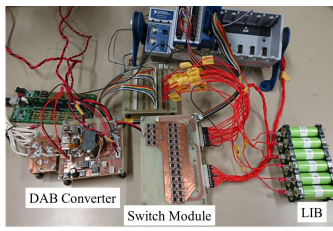
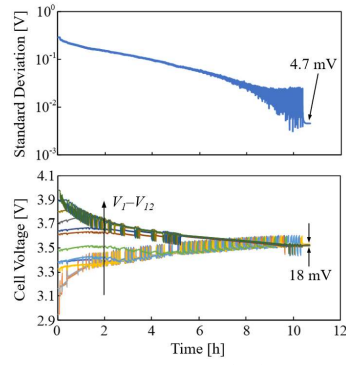


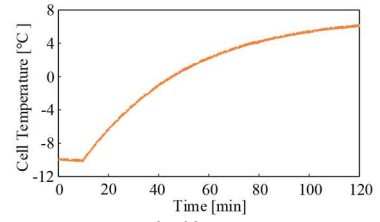
図6. チョップ回路タイプの実験結果



(a) 実験系



(b) バランス特性



(c) 加熱特性

図 7. バランス回路タイプの実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 笹間裕太、鶴野将年	4. 巻 141
2. 論文標題 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Dual Active Bridgeコンバータ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 453-460
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.141.453	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平沼標雅、鶴野将年
2. 発表標題 PWM制御により台形波電流を生成可能な、EV搭載リチウムイオンバッテリー用3レベル交流加熱インバータの実機検証
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉浦拓海、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載リチウムイオンバッテリー向け交流内部加熱機能付きセルバランス回路の実機検証
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飛田晃希、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載バッテリーの交流内部加熱と電力伝送を同時に達成可能なDABコンバータの制御手法
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平沼標雅、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載リチウムイオンバッテリーの台形波交流内部加熱を達成するDABコンバータ
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉浦拓海、鶴野将年
2. 発表標題 EV用リチウムイオンバッテリー向け交流内部加熱機能付き3相インタリーブ方式共振型コンバータ
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉浦拓海、菅谷礼央那、鶴野将年
2. 発表標題 EV用リチウムイオンバッテリー向け交流加熱機能付きセルバランス回路の実機検証
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平沼標雅、笹間裕太、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載リチウムイオンバッテリーの台形波交流加熱を実現する3レベルインバータの実機検証
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平沼標雅、笹間裕太、鶴野将年
2. 発表標題 台形波電流の生成により加熱時間の短縮が可能な、EV搭載リチウムイオンバッテリー用3レベル交流加熱インバータ
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦拓海、菅谷礼央那、鶴野将年
2. 発表標題 EV用リチウムイオンバッテリー向け交流加熱機能付きセルバランス回路の開発
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅谷礼央那、鶴野将年
2. 発表標題 交流加熱機能付きセルバランス回路を基礎とする、EV用リチウムイオンバッテリー向けモジュラーバランスシステムの開発
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笹間裕太、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載リチウムイオンバッテリーの台形波交流加熱機能を有するDABコンバータの設計と実機検証
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笹間裕太、鶴野将年
2. 発表標題 EV搭載リチウムイオンバッテリーの加熱時間を短縮可能な、台形波加熱機能付きDABコンバータ
3. 学会等名 電子通信エネルギー技術研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Sasama, Masatoshi Uno
2. 発表標題 DAB converter with trapezoidal wave heating capability for lithium-ion Battery of electric vehicles
3. 学会等名 IEEE ECCE
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関