

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14723

研究課題名（和文）走行中非接触給電EVの車載システムを統合する新しいコンバータの提案

研究課題名（英文）A Proposal of Novel Integrated On-board Converter for EVs with Dynamic Wireless Power Transfer System

研究代表者

太田 涼介（Ota, Ryosuke）

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・助教

研究者番号：60866193

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気自動車における既存の車載パワーエレクトロニクスシステムと、走行中にワイヤレス給電を行うためのパワーエレクトロニクスシステムを機能統合することで、システムのコストを抑えながら高い電力変換効率等を実現することを目的としている。研究期間において、3つの新たな回路方式を提案し、それらの試作機を用いた実験により有効性を確認した。新回路方式1では大幅な高効率化と低コスト化を達成、新回路方式2では大幅な高効率化と低ノイズ化を達成、新回路方式3では低コスト化を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2050年のカーボンニュートラル化の達成に向け、電気自動車の普及が強く求められている。しかし、電気自動車は価格、走行距離、充電時間等に課題を抱え、劇的な普及には至っていない。これらの課題に対して、走行中ワイヤレス給電が注目を浴びているが、その実装には高効率化をはじめとする多くの課題を抱える。本研究では、既存の車載システムとワイヤレス給電システムを機能統合する、新たな3つの回路方式を提案し、高効率化と低コスト化を達成した。これらの成果は基礎検討段階のものであるが、今後、より実践的な検討を重ねることで、DWPTシステムの実現や電気自動車の普及に貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to integrate the existing onboard power electronics system in electric vehicles with a power electronics system for dynamic wireless power transfer. The goal is to achieve high power-conversion efficiency while minimizing system costs. Throughout the research period, three novel circuit topologies were proposed, and their effectiveness was validated through experiments using their prototypes. Circuit topology 1 achieved a substantial increase in efficiency and cost reduction. Circuit topology 2 achieved significant improvements in efficiency and noise reduction. Lastly, circuit topology 3 allowed for cost reduction.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 非接触給電 走行中給電 マルチポートコンバータ Wireless power transfer Inductive power transfer Dynamic charging Multipoint converter

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2050年のカーボンニュートラル化に向け、電気自動車(EV: Electric Vehicle)の普及が強く求められている。しかし、現在、日本をはじめとする諸外国では、EVは劇的な普及に至っていない。

EVが普及に至らない主な原因として、「一充電あたりの航続距離が短い」、「充電時間が長い」、「価格が高い」ことが挙げられる。これらの問題は、EVのバッテリー充電システムに走行中ワイヤレス給電(DWPT; dynamic wireless power transfer)技術(図1)を用いることで、すべて解決できる。

しかし、まだ、多くの課題を抱え、大衆向けEVへの適用は実現できていない。特にその中でも、システムの大容量化技術に大きな課題を抱えている。DWPTでは、走行するEVに対して、送受電コイルが対向する短い期間に走行に必要な電力を送る必要があるため、停車中のワイヤレス給電(SWPT; static wireless power transfer)に比べて数倍の設備容量が求められる。

しかし、システムの大容量化と共に熱冷却機構も巨大化し、車内空間等を圧迫することになる。さらに、システムの部品コストも増大することになる。特にワイヤレス給電では、高周波電圧・電流を扱っていることに加え、電力変換回数(電力変換回路の段数)が多いため、有線の充電システムに比べて電力変換効率が低く、部品コストが高い。つまり、システムを低コストに効率を向上できなければ、DWPTシステムを大容量化することが難しくなり、DWPTシステムの普及は実現できなくなる。

そして、さらなる車内空間の確保のためには、DWPTシステムのみならず、モータドライブ(MD)システムも考慮した車載パワーエレクトロニクスシステム全体における高効率化を議論する必要がある。しかし、DWPTシステムとMDシステムを同時に高効率化しようとする試みは、これまでになく、異なる研究課題として検討されてきた。この要因のひとつとして、図2に示すように、両システムはバッテリーにより完全にデカップリングされており、両方同時に考える必要がないためである。

両システムを別々に扱うことで、実装が容易になるものの、システム、つまり電力変換回路(コンバータ)の数だけパワーデバイスの数と電力変換段数も増加する。つまり、両システムが完全に独立していることが、システムの高コスト化と低効率化を招いていると言え、検討の余地がある。



図1 EVへの非接触給電

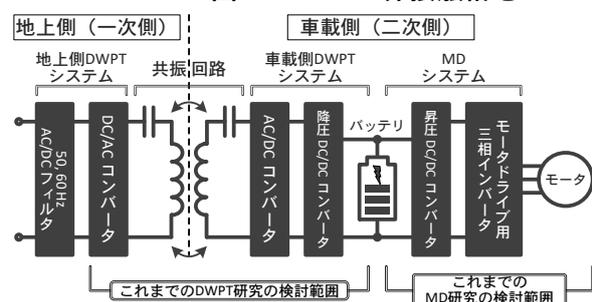


図2 DWPT-EV車載システムの基本構成と本研究の概要

2. 研究の目的

上記の研究背景から、「ひとつのコンバータでDWPTシステムとMDシステムの一部を統合できれば、小型かつ高効率なDWPT-EVの車載パワーエレクトロニクスシステムを実現できるのではないか」と、学術的な問いを抱き、本研究課題の提案に至った。本研究課題では、図3に示す、DWPT及びMDシステムを統合できるマルチポートコンバータ(提案コンバータA)を提案することで、次世代車載システムを構築し、車載システムの飛躍的な小型化及び高効率化を目的としている。

3. 研究の方法

上記の目的に対し、次の項目を実施する。ただし、本報告書では、ページ数制限のため、項目(1)のみ報告する。

- (1) 提案コンバータ A の動作検証及び有効性の確認
- (2) 提案コンバータ B の提案, 動作検証及び有効性の確認
- (3) 提案コンバータ C の提案, 動作検証及び有効性の確認

(1) 提案コンバータ A の動作検証及び有効性の確認に関して (本報告)

提案コンバータ A には複数の動作モードが存在し、DWPT の給電状況や EV の走行状態に応じて切り替えることができる。高効率な動作モードを適切に選択するためには、各動作モードの効率特性を明らかにする必要がある。

そこで、各部の損失をモデル化し、各動作モードの効率特性を明らかにする。そして、実験により提案コンバータ A の動作検証、及びその損失モデルの妥当性を明らかにする。さらに、従回路方式と比較することでその有効性を明らかにする。

(2) 提案コンバータ B の提案, 動作検証及び有効性の確認に関して

提案コンバータ A の思想から着想を得て、新たに二つのマルチポートコンバータの提案を行う。提案コンバータ A では、パワーデバイスに接続されたインダクタに直流電流が重畳し、パワーデバイスにも同様の電流が流れるため、一部の動作域でソフトスイッチングを行うことが困難である。ソフトスイッチングはスイッチング損失及び放射電磁ノイズの低減に寄与するため、システムの大容量化には不可欠な要素技術である。

そこで、直流重畳が発生しない提案コンバータ B を提案する。

(3) 提案コンバータ B の提案, 動作検証及び有効性の確認に関して

提案コンバータ A の思想から着想を得て、新たに二つのマルチポートコンバータの提案を行う。提案コンバータ A では、DWPT システムと MD システムを統合するものである。電気自動車のパワーエレクトロニクスシステムには、MD システムの他に、ライトやエアコンに電力を供給するための補機システムの電源システムも含まれる。

そこで、DWPT システム用のコンバータに補機用バッテリーの充電システムの機能を統合させることで、DWPT システムの設備利用率を上げ、低コスト化を行うマルチポートコンバータ C を提案する。

4. 研究成果

本報告書では、ページ数制限のため、項目(1)のみ報告する。

(1) 提案コンバータ A の概要

図 3 に提案コンバータ A, Multiport active bridge (MAB) コンバータを示す。提案コンバータ A は「2つのパワーデバイスを削減可能」、「電力変換回数を大幅削減」の特長を有する。

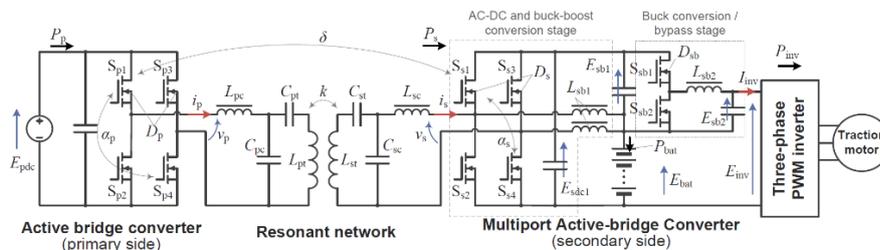


図 3 Multiport active bridge (MAB) コンバータのシステム概要

(2) 提案コンバータ A の基本動作

図 4 に MAB コンバータの動作モードを示す。DWPT の給電状況と EV の走行状態に応じて動作モードが選択される。下記では、各動作モードにおける各ポートの電圧を示す。

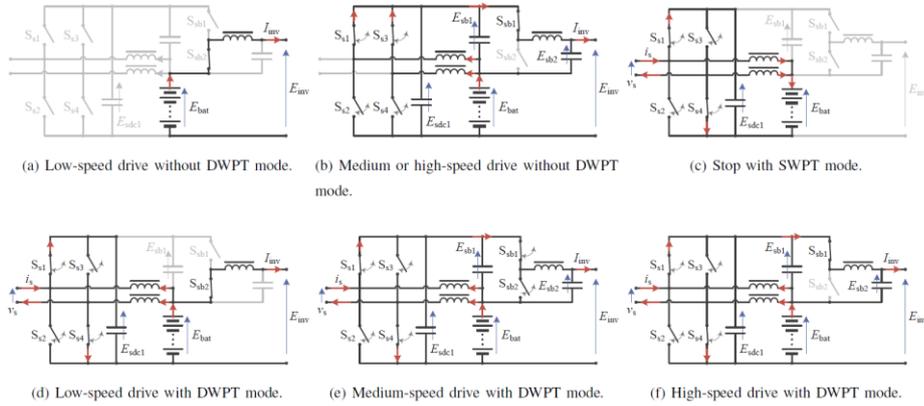
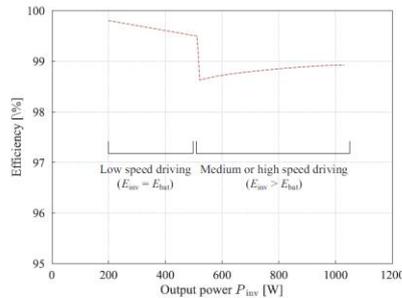


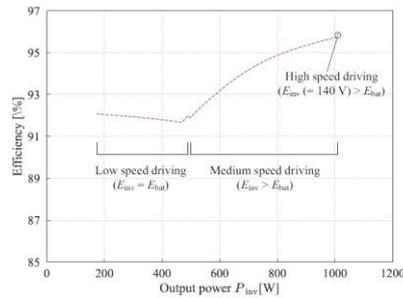
図4 MABコンバータの動作モード

(3) 理論解析

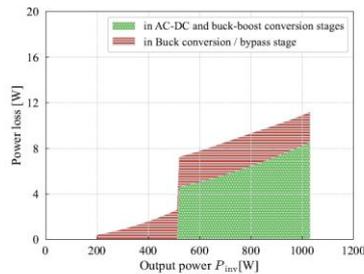
各部の損失をモデル化し、各動作モードの効率解析を行った。ここで、図5及び6にMABコンバータシステム全体の効率解析結果を示す。図5では、DWPTの給電が行われていないMABコンバータの効率と電力損失特性を示している。また、図6ではDWPT時のMABコンバータシステム全体の効率と電力損失特性が示されている。



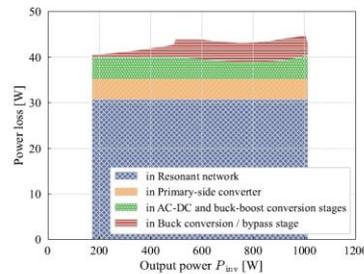
(a) Efficiency without DWPT.



(a) Efficiency with DWPT.



(b) Power loss without DWPT.



(b) Power loss with DWPT.

図5 効率解析結果 (DWPTなし) 図6 効率解析結果 (DWPTあり)

図5において、出力電力 P_{inv} が 460 W 未満において、EV は低速で走行していると仮定している。この場合、MAB コンバータにおいてスイッチングは行われなため、導通損失のみ発生する。一方、出力電力 P_{inv} が 460 W を超えると、EV は中～高速で駆動し、MAB コンバータは Medium or high-speed drive without DWPT mode を選択する。この動作モードでは、 S_{sb1} はバッテリーとインバータ間でバイパスとして機能し、Buck conversion/bypass stage では導通損失のみが発生する。ただし、AC/DC コンバータの部分では、2 相の昇圧動作が行われるため、導通損失に加えてスイッチング損失も発生する。その結果、図5は非線形な効率特性を示している。

図6において、出力電力 P_{inv} が 440 W 未満の場合、EV は低速で駆動する。この場合、MAB コンバータは DWPT モードで低速駆動を行う。この解析条件下では、送受電コイル

の結合係数 k は一定とし、約 530 W が定常的に DWPT によって伝送されると仮定している。その結果、一次側コンバータと共振回路の損失も一定となっている。また、MAB コンバータと一次側コンバータは、ソフトスイッチングで動作するため、スイッチング損失が低く、導通損失が支配的となっている。一方、出力電力 P_{inv} が 430 W を超えると、EV は中～高速で走行し、MAB コンバータは Medium-speed drive with DWPT mode を選択する。ただし、MAB コンバータは最大出力点でのみ Medium or high-speed drive without DWPT mode を選択する。DWPT による伝送電力 P_s が一定であるため、出力電力 P_{inv} が増加するとバッテリーから供給される電力 P_{bat} も増加する。DWPT に比べて、バッテリーからの昇圧動作による電力供給のほうが高効率であり、高出力域では特に高い効率を示している。

(4) 実験

実験では、解析モデルの妥当性を確認する。さらに、MAB コンバータを従来のコンバータの効率と比較し、その有効性も確認する。この実験で使用された従来のシステムでは、DWPT 用の AC/DC コンバータの後段に降圧コンバータ、インバータの前段には昇圧コンバータが接続されている。SWPT モード以外では、インバータへの出力電流 I_{inv} は $E_{inv} > E_{bat}$ の場合に E_{inv} と負荷抵抗によって 7.44 A に制御され、 $E_{inv} = E_{bat}$ の場合は負荷抵抗のみによって I_{inv} が制御される。

ここで、図 7 に実験におけるシステム全体の効率特性を示す。図 7(a) では、中速度以降 MAB システムの効率が低いことがわかる。試作品で用いたパワーデバイスが電流量の高いものであったため、この実験の電力帯ではスイッチング損失が支配的となり、効率が低くなってしまったと考えられる。MAB コンバータは 2 相の昇圧コンバータとして動作しており、従来方式よりも動作しているパワーデバイスの数が多いためである。しかし、より高い出力電力帯では、導通損失が支配的になるため、MAB システムの効率が改善されることが期待できる。さらに、図 5 の理論解析により導出された効率特性の傾向は、図 7(a) の効率特性とよく一致している。

図 5(b) では、MAB システムの効率が最大出力点で 1.4 %pts 向上していることが確認できる。さらに、図 6 の理論解析により導出された効率特性の傾向も、図 7(b) とよく一致している。

一方、特性を表す図は用意していないものの、SWPT モードでの停止時には、MAB システムの効率は 89.7% であり、従来のシステムの効率は 88.2% であった。以上より、MAB システムの電力損失モデルの妥当性と MAB コンバータの効率に関する一部の有効性が確認された。関連の成果は国際会議 *EVTeC 2021*, *EVTeC 2023* で発表を行っている。

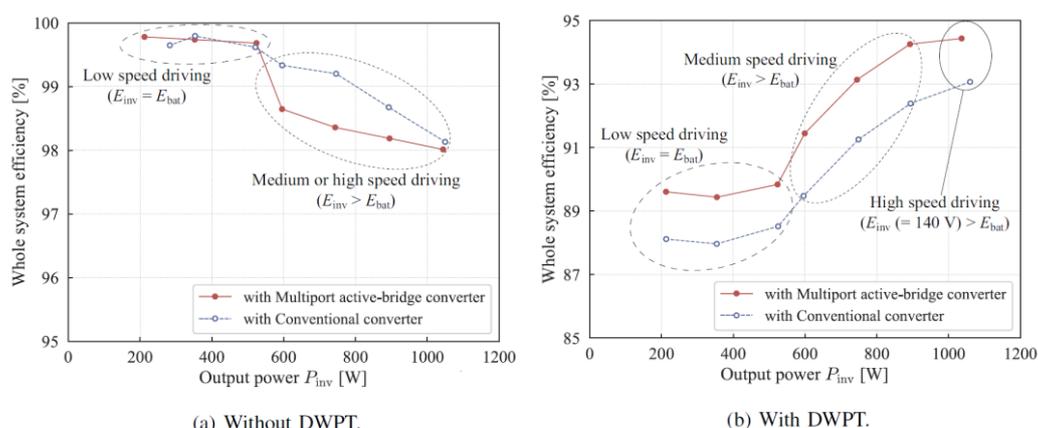


図 7 実験結果 (MAB コンバータと従来方式の比較)

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 1件）

1. 著者名 Okada Ryohei, Ota Ryosuke, Hoshi Nobukazu	4. 巻 11
2. 論文標題 Novel Soft-Switching Active-Bridge Converter for Bi-directional Inductive Power Transfer System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 97~107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21004206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ryosuke Ota, Nobukazu Hoshi
2. 発表標題 Basic Study of Integrated On-board Converter for Dynamic WPT EV
3. 学会等名 5th International Electric Vehicle Technology Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Okada, Ryosuke Ota, Nobukazu Hoshi
2. 発表標題 Soft-switching Converter for Inductive Power Transfer System with Double-sided LCC Resonant Network
3. 学会等名 The 24th European Conference on Power Electronics and Applications（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhuoqi Zhang, Ryosuke Ota, Ryohei Okada, Nobukazu Hoshi
2. 発表標題 Multi-port Inductive Power Transfer System Considering Charging Auxiliary Battery in EVs
3. 学会等名 The 24th European Conference on Power Electronics and Applications（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田涼平, 太田涼介, 星伸一
2. 発表標題 非接触給電用ソフトスイッチングアクティブブリッジコンバータの高効率化のための動作モード選択指針
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Ota, Ryohei Okada, Nobukazu Hoshi
2. 発表標題 Development of Integrated On-board Converter for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 6th International Electric Vehicle Technology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 マルチポートコンバータ及びコンバータシステム	発明者 太田涼介, 星伸一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-079242	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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