

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249033

研究課題名(和文) 超高効率エネルギー変換システムによる電気自動車一充電走行距離延伸の実現

研究課題名(英文) Range Extension of EV based on the very high efficiency energy conversion

研究代表者

河村 篤男 (KAWAMURA, ATSUO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80186139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は以下である。(1)高効率DC-DC電力変換器(略してHEECSチョッパ)を提案し、40%の部分昇圧の条件下で5kW出力で99.5%、20kW出力で99.0%の電力変換効率を実現した。(2)このHEECSチョッパを申請者が提案している直列チョッパ型の電気自動車パワートレインに適用し、走行速度と出力トルクの全領域において、バッテリーから機械出力までの高いエネルギー変換効率を実測し、そのマップを製作した。(3)このチョッパの小型軽量高効率性により、測定データを用いての10-15モード走行においては約8%、JC08モード走行においては約7%ほど、1充電走行距離が延伸できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The essence of this research can be summarized as follows. (1) A very high efficiency DC-DC chopper (HEECS chopper for abbreviation) was proposed and constructed. Under the 40% partial voltage compensation, 99.5% efficiency at 5 kw output and 99.0% efficiency at 20 kW were experimentally measured. (2) Applying this HEECS chopper to the new proposed power train of EV (series chopper power train), the efficiency map was experimentally measured in all range of speed and torque domain, and it indicates that efficiency is higher than the conventional power train in this range. (3) Using this data, it is verified that the driving range is extended approximately 8% under the 10-15 mode driving cycle, and approximately 7% under the JC08 driving cycle.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電気自動車 高効率 パワートレイン

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大地震後、日本のエネルギー事情はひっ迫しており、省エネルギーを推し進め、少ないエネルギー使用量でも産業を持続発展させていく必要があった。わが国のエネルギー消費の内訳を見ると、全エネルギーの約5分の1は、自動車などの運輸関連で消費されており、エネルギーの有効利用の観点からハイブリッド電気自動車や純電気自動車などの開発や市販計画が進んでいた。この電気駆動系では、インバータとモータの組み合わせにより電気機械エネルギー変換が行われている。その結果、電動化駆動の自動車がこれからますます普及するものと予想される。これらの駆動系では、インバータからモータへ加える周波数を可変にすることにより、高効率運転ができる。さらに、加減速を行う場合においては、減速時にインバータを介して機械エネルギーを電気エネルギーへ逆変換するという、いわゆる回生駆動が実現でき、さらなる高効率運転を実現することが可能となる。特に電気自動車においては、一充電走行距離という指標があり、例えば1回の充電で各種走行モードを走らせると何km走行できるかにより車としての走行性能を評価する。

申請者らは、高効率高電力密度チョップパを試作開発し、バッテリーのSOC（充電率）による電圧変化（100%から60%程度まで低下）まで含めた可変速駆動系の省エネルギー化を実現する研究を行ってきた。特に、2010年～2012年まで基盤研究（A）（一般）「高効率高電力密度チョップパによる可変速駆動系の省エネルギー化の研究」において、試作した25kVAのSAZZチョップパ（電力密度3kW/l、効率98.5%）を実車に実装しシャーシダイナモ上で実験を行い、直列チョップパの駆動系の省エネ効果によって約3%の一充電走行距離延伸が可能であることを実証した。しかし、この研究成果について

詳細に検討した結果、以下に示す課題が明らかになり、10%以上の延伸が実現できるとの知見を得たことから、本研究課題の申請に至った。

## 2. 研究の目的

電気自動車（EV）の一充電走行距離を以下の4つの目標を達成することで10%程度延伸することを実証する。①バッテリーの電圧低下時のみに動作するチョイ付けチョップパにより、超高効率エネルギー変換システム（HEECS）の効率99.3%を達成する。②チョイ付けチョップパとしては高電力密度電力変換器を用い、出力電圧の制御の幅が大きくても高効率動作する③速度に応じて直流電圧を可変にすることにより、モータの弱め界磁制御を用いない効率のよい最大効率制御を実現する。④システム効率を最大にする直流電圧制御を実現する。①②③の効果で8%程度の延伸、④の効果で2%程度の延伸が可能であると考えられる。

## 3. 研究の方法

以下の4つの計画に対して、以下の方法で研究を行った。

計画A：高効率チョイ付けチョップパ技術の確立

実車に近い30kWモータドライブ用出力用高電力密度SiCデバイスによる電力密度5kW/lの“10kWチョイ付けチョップパ（DAB）”を試作する。また、試作チョップパを用いて、超高効率エネルギー変換システム（HEECS）の出力電圧変動幅を大きく取れるような制御を実現し、その総合効率は99.3%を目指す。試作器では幅広い出力電圧での定常状態での高効率性能を確認するので、入力電圧変動幅350～200V、出力電圧変動幅350～200V程度を想定している。

この対案として、2電源方式のHEECSチョップパを用いてSOC低下時におけるバッ

テリ電圧補償法についての研究を並行して実施しており、これもセーフネットとして候補とする。

計画B：超高効率エネルギー変換システム (HEECS) における高効率過渡運転モードの実現

HEECS の定常状態、過渡状態 (力行と回生) の高速応答運転法を実現する。特に、チョイ付けチョッパ (DAB) の始動時および力行および回生運転に伴って 10[ms] オーダーの高速対応が可能となる制御法を提案し、実証する。現在では、電流ヒステリシス制御と位相制御の組み合わせを想定している。自動車応用の場合は、力行と回生が短い時間で切り替わるのでその対応ができるチョイ付けチョッパ制御および超高効率エネルギー変換システム制御が必要となる。

計画C：最適直流電圧制御理論の確立

インバータの変調方式を考慮し、直流電圧が最大限に使用できる手法を提案する。現時点では、T-PWAM を用いてインバータの出力波形変調を使ってモータを制御し、さらに HEECS の最適直流電圧制御法を提案する。回転数が増加するときでも弱め界磁を用いずにモータ効率が最大となる電圧モードを検討する。この段階での試験は、実車環境を高精度に再現したモータテストベンチ (最大 30kW 出力) で実証試験を行う。

計画D：超高効率駆動 EV 試験車 (KANA) を模擬したモード走行試験

EV 試験車 KANA のパワートレイン部分を改造した、モータテストベンチを用いて HEECS を車上搭載できるように改修する。実車の走行抵抗 (転がり摩擦と空力抵抗) を模擬できるので、モード走行運転を実施し、本研究での提案方法の有効性を実証する。この試験は実際の車の使用条件とほぼ同等の環境での試験と等価であるので非常に重要である。

#### 4. 研究成果

平成 26 年度は、高効率電力変換器 (略して HEECS) における定常特性実験、力行回生運転法の構築および T-PWAM での基礎駆動実験などの基盤技術の確立を行った。

30 kW モータドライブ用 SiC デバイスによる 10 kW の 2 電源方式 HEECS の設計試作を行った。まず、数百ワット出力の 1 象限チョッパから構成される 2 kW 出力の HEECS 構成で 99.5% を超えるシステム効率を実験で確認した。次に、10 kW の 2 象限 SiC チョッパを製作し 10 kW 出力時に効率 98.1% を得、力行と回生は定常状態での動作確認を行った。このチョッパでの HEECS 実験 (効率 99.3% 以上) は次年度行う。

EV の過渡状態運転においては力行と回生が頻繁に切り替わるので、回生と力行が自動的に切り替わるようなトポロジーである 2 電源 HEECS を実装して、定常状態で動作確認を行った。一方で 2 電源 HEECS では、2 つのバッテリーを有するので、その SOC を同様な値に保つためのエネルギーマネジメント方法を検討した。その結果、回生を利用して 2 つのバッテリーを充電する方法、HEECS の回路トポロジーを改良した 2 スイッチ法などを提案し、その特性をシミュレーションにより検討した。

モータベンチテストでは、モードができるよう改造した。さらに、既存の SAZZ チョッパ電圧を制御して、高効率モータ駆動のための T-PWAM 制御を実装してモータテストベンチで、現有設備の制約から低速度域で実験した。また、この制御によりインバータ効率とモータ効率が向上することをシミュレーションにより確認した。

平成 27 年度においては、平成 26 年度に開発研究した各技術の評価試験および駆動 EV 試験車 (KANA) の改良・改造設計を実施した。

研究計画 A においては前年度に開発した

チョイ付けチョッパ（略してHEECS チョッパ）の単体性能評価試験を実施し、幅広い出力電圧範囲で定常状態においてHEECS 駆動効率 99.3%が実現できたことを確認した。また、車載搭載に向けてHEECS チョッパの性能改善および小型化に取り組み、スイッチング周波数 30kHz および 60kHz の 2 種類のHEECS を製作した。その結果、40%の部分昇圧の条件下で、20kw 出力で 99.0%、5kw 出力で 99.5%の効率を実測した。

研究計画Bにおいては、HEECS チョッパを用いて定常状態（力行と回生）の走行試験を実施し、インバータおよびモータ駆動系の定常状態の効率をトルク-速度平面上で実測した。また、走行に伴うSOC低下と連動しバッテリー出力電圧を低下させ、SOC低下に伴うバッテリー電圧補償の単体試験を実施した。

研究計画Cにおいては、モータテストベンチにHEECS チョッパを実装し、定常状態で、総合効率を実測した。T-PWAM方式を用いたインバータ駆動実現のためのチョッパ出力制御を行った。JC08 走行モードでの平均走行速度と平均トルクの計算および、上記のモータテストベンチでの総合効率（定常状態）のデータから、一充電走行距離が5%程度延伸することを確認した。ただし、チョッパ直流電圧の最適制御およびT-PWAM モータ制御はまだ組み込み準備中であった。

研究計画Dにおいては、最終年度の評価試験をEV 試験車 (KANA) と同等なモータテストベンチでの測定に置き換えることに向けて、各種準備とそのための開発技術を進めた。

平成 28 年度においては、過去 2 年間で開発研究した各技術の評価試験装置およびEV 駆動模擬試験装置（モータテストベンチ）の改良・改造設計を行い、実車でのモード走行を模擬した走行試験を実施した。

その結果、JC08 モード走行においては、約 6.6%、また、10-15 モード走行では 7.5% 程度 1 充電走行距離が延伸することを実証した。この結果、提案方法は都市内走行においてより大きい効果が出るのが分かった。

研究計画 A および B においては前年度までに開発したチョイ付けチョッパ（略してHEECS チョッパ）の単体性能評価試験や幅広い出力電圧範囲で定常状態において効率 99.3%が実現できたので、モード走行用に走行速度に応じて出力電圧を変化させる技術に取り組んだ。特に、チョッパの最少と最大パルス幅に制約があり、その過渡時には、間欠パルス運転を行い、滑らかに出力電圧が切り替わるように改良した。

研究計画 C の最適な直流電圧制御に関しては、電圧を組み合わせて試験はしたが、十分な最適化はできていない。その理由は、バッテリー電圧は充電状態 (SOC) に応じて電圧が減少するので、研究計画を修正し、2 電限HEECS の消費電力のアンバランスを解消する方がより重要と考え、その課題を解決した。2 つのバッテリーの SOC に応じて、電力を融通するバランス回路を提案し、2 つのバッテリーが同時に放電し終わる方法を、ハード的に行う方法、力行回生モードを使いソフト的に行う方法を提案し実証した。

研究計画DのEV 試験車の改造は予算の制約であきらめ、上記のモータテストベンチでの実証試験で代用した。

以上を要約すると、当初の目的に沿って、超高効率チョッパを実現し、都市内走行モードでは 1 充電走行距離を約 8%程度延伸できることを実証した。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

[1] Kohei Aoyama, Naoki Motoi, Yukinori

Tsuruta, Atsuo Kawamura, “High Efficient Energy Conversion System for the Decrease in the Battery Terminal Voltage of Electric Vehicles”, IEEJ Journal of Industry Applications”, Vol.5, No.1, pp.12-19, 2016 (DOI: 10.1541/ieejia.5.12) (査読あり)

[2] Y. Hosoyamada, M.Takeda, T.Nozaki, A.Kawamura, “High Efficiency Series Chopper Power Train for Electric Vehicles Using a Motor Test Bench”, IEEJ Journal of Industry Applications”, Vol.4, No.4, pp.460-468, 2015 (査読あり)

[3] Y. Tsuruta, A. Kawamura, “Loss Analysis of High Power Chopper by Under-Zero Current Switching”, IEEJ Journal of Industry Applications”, Vol.4, No.1, pp.31-39, 2015 (査読あり)

[学会発表] (計 14 件)

[1]田村 文太郎, 小林 幸司, 前多 竜馬, 小島 一祥, 弦田 幸憲, 河村 篤男:“2 電源 HEECS を用いた EV テストベンチでの効率測定とモード走行シミュレーション”, 平成 29 年電気学会全国大会 (富山), 2017 年 3 月 15 日

[2]Hiroyuki Kodaira, Kazuaki Kojima, Yukinori Tsuruta, Atsuo Kawamura : “Design Methodology and Experiment on Battery SOC Balance Circuit of HEECS for EV Power Train”, International Conference-on Mechatronics, Feb.13, 2017.

[3] 小平 寛之, 小島 一祥, 弦田 幸憲, 河村 篤男:“2 電源 HEECS のための高効率バッテリーバランス回路の提案”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会 (群馬), No. 1-41, 2016 年 8 月 30 日

[4] Daiki Akatsu and Atsuo Kawamura :

“Taniguchi-Pulse Width Amplitude Modulation Control for Loss Reduction in EV Power Train”, 2nd Symposium on Semiconductor Power Conversion (S<sup>2</sup>PC2015, Chungju, Korea), Nov. 21, 2015.

[5] Zhicheng Hong, Yukinori Tsuruta, and Atsuo Kawamura : “Two Batteries High Efficiency Energy Conversion Systems (HEECSs) for Electric Vehicles”, 2nd Symposium on Semiconductor Power Conversion (S<sup>2</sup>PC2015, Chungju, Korea), Nov.21, 2015.

[6] Yukinori Tsuruta and Atsuo Kawamura: “Principle Verification Prototype Chopper using SiC MOSFET Module Developed for Partial Boost Circuit System”, 2015 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS & EXPOSITION, P904, Sept.21, 2015.

[7] 弦田 幸憲, 河村 篤男 :“99.5%超高効率原理確認器-II の HEECS 試験評価”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会 (大分), No. 1-52, pp. I-239-I-240, 2015 年 9 月 2 日

[8] 弦田 幸憲, 河村 篤男: “部分昇圧方式原理確認器の試作検証”, 平成 27 年電気学会全国大会 (東京), 4-087, 2015 年 3 月 24 日

[9] Daiki Akatsu and Atsuo Kawamura, “Effectiveness Evaluation of Taniguchi Pulse Width Amplitude Modulation Control for Iron Loss Reduction”, The 1st IEEJ international workshop on Sensing, actuation, and motion control (SAMCON 2015, Nagoya, Japan), TT4-2-5, March 9, 2015.

[10] Zhicheng Hong, Yukinori Tsuruta, Takahiro Nozaki, and Atsuo Kawamura, “Efficiency Comparison on Two types of

Two Batteried High Efficiency Energy Conversion Systems (HEECSs) for Electric Vehicles”, The 1st IEEEJ international workshop on Sensing, actuation, and motion control (SAMCON 2015, Nagoya, Japan), TT4-1-6, March 9, 2015.

[11] Keisuke Ishida and Atsuo Kawamura, “Taniguchi-Pulse Width Amplitude Modulation for High Efficiency Power Train of Electric Vehicle”, The IEEE/IES International Conference on Mechatronics (ICM 2015, Nagoya, Japan), pp. 370-375, March 6, 2015.

[12] Yukihiro Tanaka, Yukinori Tsuruta, Takahiro Nozaki, and Atsuo Kawamura, “Proposal of Ultra High Efficient Energy Conversion System (HEECS) for Electric Vehicle Power Train”, The IEEE/IES International Conference on Mechatronics (ICM 2015, Nagoya, Japan), pp. 703-708, March 6, 2015.

[13] Kohei Aoyama, Naoki Motoi, Yukinori Tsuruta, Atsuo Kawamura: “Transient behavior of the dual active bridge converter in high efficient energy conversion system”, Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), pp. 2266-2271, May 19, 2014.

[14] Yu Hosoyamada, Masashi Takeda, Naoki Motoi, Atsuo Kawamura: “Large driving range increase of series chopper based power train using motor test bench”, Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), pp. 801-806, May 19, 2014.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：電源システム、車両および電圧制御方法

発明者：河村篤男、弦田幸憲

権利者：横浜国立大学

種類：特許

番号：2014-261521

出願年月日：2014年12月25日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者

河村 篤男 (KAWAMURA ATSUO)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：80186139

(2) 研究分担者

藤本 康孝 (FUJIMOTO YASUTAKA)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60313475

(3) 研究分担者

下野 誠通 (SHIMONO TOMOYUKI)

横浜国立大学・工学研究院・助教

研究者番号：90513292

(4) 研究分担者

元井 直樹 (MOTOI NAOKI)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10611270