

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246036

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Research on energy-saving of adjustable speed drive system in use of high power density chopper

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

研究成果の概要（和文）：

本研究の成果の特徴は次の2点に集約される。(1) SAZZ チョップパのトポロジーで、50kW出力、電力密度 100kW/lを実現した。(2) 可変速駆動系システムに直列チョップパを導入する時の省エネ効果は、そのシステム構成によって幅がある。特に、電気自動車に限れば、25kW試験装置において直列チョップパの高電力密度化、軽量化により、JC08 モード走行において3%以上の省エネ効果が確認された。さらに、チョップパの軽量化と直流電圧の選択によっては、10%程度の省エネの可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：

The essence of this research can be summarized into two points. One is that the ultra-high power density SAZZ chopper was realized with 100 kw/l with 50 kw output. The efficiency is about 99%. And the second point is that the energy saving rate of the adjustable motor drive with a chopper depends on the system configuration. In case of electric vehicle, the 3 % driving range extension was experimentally confirmed with JC08 driving mode test. And also if the weight of the chopper becomes lower and the dc voltage can be lower, the energy saving rate has possibility to become more than 10 %.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2011年度	16,400,000	4,920,000	21,320,000
2012年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気自動車、電気機器工学、パワーエレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止策の1つの方法は、エネルギー利用において、効果的な省エネルギーの形態を開発することにある。特に、わが国のエネルギー消費の内訳を見ると、電力化率と称して、全消費エネルギーのうち、電気エネルギーへ変換して消費されるエネルギーが全体の40%を越えている。さらに、そのうちの相当部分(約3分の2)は、機械エネルギーに変換されて消費されている。これらの電気機械エネルギー変換にはインバータを用いて、駆動系の効率を高める工夫を施す場合が増えてきた。

一方、電力化しないエネルギーの約3分の1は、自動車などの運輸関連で消費されている。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る。この駆動系では、やはり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。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。ところが、この従来型の回生手法にも、モータの速度が下がってくると回生効率が低下するという重大な欠点がある。これは、モータの速度起電力が速度に比例することに起因する。従って、インバータの直流リンク電圧を速度に応じて可変できるようにすると回生効率は向上する。交流の電気エネルギーを整流して、インバータで駆動するようなシステムでは、整流器でインバータの直流リンク電圧を可変にすることは可能である。電気自動車のようにバッテリーからの一定電圧で駆動される可変速駆動システムにおいては、直流リンク電圧を可変にするには、チョップ回路が必要となる。しかし、従来のチョップ回路は効率も悪く電力密度も低かったため、劇的なシステム効率の改善を実現することは不可能であった。

それに対し本研究代表者らは、これまでの高効率高電力密度チョップに関する研究において、共振スイッチを使ったSAZZ (Snubber Assisted Zero Voltage Zero Current Transient) チョップにより、効率を99%以上に向上させることに成功し、研究室レベルで25kw/lの電力密度を有する実験機を試作開発し、数々の実験実証を行ってきた。このように、これまでの研究成果により高効率高電力密度チョップ技術によって可変速駆動系の省エネルギー化を促進することが可能であるとの認識に達したため、本研究の提案の

実施に至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高密度高効率SAZZチョップ回路を用いてインバータ可変速駆動システムを構築することで、繰り返し加減速を行う電気機械運動駆動系において10%以上の省エネルギー効果を獲得できることを、学術的に明らかにすることである。本研究では、高効率高電力密度直列チョップがキーテクノロジーとなるため、まず高効率高電力密度(エネルギー密度が25kw/l程度で、効率99%程度以上)を実現する。次に、これを用いてインバータの直流電圧を直接制御することにより、可変速駆動システム効率が向上することを実証する。

具体的には、以下の2つに集約される。

(1) 高密度高効率SAZZチョップ回路を用いて、高効率高電力密度電力変器の高性能化を実現する。

(2) 高効率高電力密度チョップをインバータ駆動可変速システムに実装し実証実験を行うことで、開発技術の省エネルギー効果について学術的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究方法については年度ごとに記述する。

### (1) 2010年度:

- ① 4象限SAZZチョップ回路への電圧電流閉ループ制御を実装する。
- ② 変換効率の高精度測定手法を開発する。
- ③ 直列チョップ実装用可変速駆動装置の基本設計を実施する。

### (2) 2011年度:

- ① 直列チョップと可変速駆動系システムを統合した省エネルギー効果実証装置を試作する。
- ② JC08モード走行パターンによる組み合わせ試験において総合的な省エネルギー効果を実測する。

### (3) 2012年度:

- ① 新型SAZZチョップ回路の製作を行う。
- ② 試作機を用いた各要素技術の効率特性(省エネルギー効果)実証実験を実施する。

## 4. 研究成果

年度ごとの研究成果について詳述する。

### (1) 2010年度:

- ① 4象限SAZZチョップ回路への電圧電流閉ループ制御の実装としては、これまでの研究において獲得した4象限SAZZチョップの基礎データを基に、

25kVA の出力容量で入力 300-400V、出力 150~400V の 4 象限 SAZZ チョップアを設計・試作した。電力密度を 3kw/l で、定格での効率を 98% であった。なお、以前の試作機においては電圧一定のオープンループ制御であり、電圧や電流の制御機能は有していなかった。そこで、本試作機を基に製作した新たな実験機においては、制御ループを付加した。特に、力行から回生モードに移行する領域の制御に重点を置き、制御系を設計した。なお、力行から回生への移行時間においては、ハードスイッチング動作でデューティ比を一定に保つ同期を実装した。

- ② 変換効率の高精度測定手法の開発として ETH の Kolar 先生のアドバイスを得て、熱式効率測定装置を試作した。2 重構造の熱断熱箱を用いた試作 1 号機では、30w の発生熱用を ±10% 程度の精度で測定することができた。
  - ③ 直列チョップア実装用可変速駆動装置の設計製作を行い、可変速駆動装置の最終要求仕様を決定した。さらに、負荷のモータを発注して既存の装置を流用し走行特性を模擬することを検討した。また、直列チョップア回路により直流 DC リンク電圧が自由に制御できる場合に適したインバータ PAM 制御の検討を開始した。この結果、EV シミュレータという名称で呼べるような、バッテリー、4 象限 SAZZ チョップア、インバータ、モータ、トルクメータ、擬似負荷モータ、電力回生装置から構成される実験系を完成させた。本システムを用いて、1 モータ (25kW) での JC08 モードの走行試験を実施した。結果、直列チョップアを用いない場合と用いた場合の比較実証により、1 充電走行距離が約 10% 程度延びることが確認された。
- (2) 2011 年度 :
- ① 試作機を用いた各要素技術の効率特性 (省エネルギー効果) 実測実験においては、各要素装置 (チョップア、モータ、インバータ) の個別の効率を定常状態で測定した。測定結果をもとにシステム全体効率の最適化を目指したチョップア出力電圧プロファイル設計を行った。またインバータの制御法として、PAM 制御と PWM 制御を組み合わせた最小 THDPAM 制御手法を提案し、性能解析を行った。
  - ② 変換効率の高精度測定手法の開発として、昨年度に試作した熱式効率測定装置において温度貯蔵タンクの断熱を改良した。また、熱量測定法における水

の流量、温度差、測定時間の関係を明確化し、熱量測定精度を大幅に改善した。さらに、測定時間短縮のために測定波形最終値推定手法を提案し、通常時の測定時間の約 3 分の 1 で誤差 5% 以内の推定を実現した。

- ③ JC08 モード走行パターンに基づく組み総合的な省エネルギー効果の実測においては、加減速が頻繁にあるような動作モードとして JC08 モードを選択し、その動作モードにおける総合効率の評価として、実車を用いたシャシーダイナモ試験により行った。最初に走行抵抗を測定した後に、実車での実測を実施した。結果、車載チャップアを軽量化することにより、従来手法と比べインホイール型電気自動車での 1 充電走行距離が約 2% 以上延伸することを実証した。ただし、チョップアの重量を減少させないと、省エネルギー効果が少ないことも明らかになった。
- ④ 新型小型軽量チョップアの制作として、これまでのチョップアのトポロジーを改革した新チョップアの制作を開始した。

(3) 2012 年度 :

- ① 超高電力密度チョップアの試作としては、連携研究員として、Prof. Martin Pavlovsky が 2012 年 4 月から 2012 年 9 月まで横浜国立大学に滞在し、新しい高電力密度チョップアの設計を行った。90kw/l 以上を目標に新しいトポロジーを検討し、2 種類の試作機を製作した。1 種類目の試作機においては 100kw/l、2 種類目の試作機においては 50kw/l をそれぞれ達成した。
- ② 直列チョップア実装用可変速駆動装置による JC08 モード走行模擬試験においては、直列チョップア実装用可変速駆動装置を用いて、上述の 2 種類目試作チョップアと組み合わせ、PWM および擬似 PAM インバータ駆動での特性を実測した。結果、1 充電走行距離が 3.4% 延伸されることを確認した。さらに、バッテリー電圧を下げることにより、延伸比率が伸びることが確認された。

研究総括 :

以上より本研究結果は、下記 2 点に要約される。

- (1) SAZZ チョップアのトポロジーで、50kW 出力で電力密度 100kw/l を実現した。効率は 99% 程度である。
- (2) 可変速駆動系システムに直列チョップアを導入する時の省エネ効果は、そのシステム構成によって幅があることが分かった。特に、電気自動車に限れば、本研究の結果、チョップアの高電力密度化、軽量化により、JC08 モード走行においては

3%以上の省エネ効果が確認された。さらに、チョップパの軽量化と直流電圧の選択によっては、10%以上の省エネの可能性があることが示された。

#### 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 8 件)

- [1] M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura, "Coping with Poor Dynamic Performance of Super-Junction MOSFET Body Diodes," IEEJ Journal of Industry Applications Vol. 2, No. 4, 2013 (accepted). 査読有
- [2] M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura, "Buck / Boost Dc - Dc Converter Topology with Soft Switching in Whole Operating Region," IEEE Transactions on Power Electronics, 2013 (accepted). 査読有
- [3] M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura, "Assessment of Coupled and Independent Phase Designs of Interleaved Multiphase Buck/Boost Dc - Dc Converter for EV Power Train," IEEE Transactions on Power Electronics, 2013 (accepted). 査読有
- [4] K. Nam, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Lateral Stability Control of In-wheel-motor-driven Electric Vehicles Based on Sideslip Angle Estimation Using Lateral Tire Force Sensors," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 61, No. 5, pp. 1972-1985, 2013. 査読有
- [5] K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Estimation of Sideslip and Roll Angles of Electric Vehicles Using Lateral Tire Force Sensors Through RLS and Kalman Filter Approaches," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, pp. 988-1000, 2013. 査読有
- [6] K. Maeda, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Four-wheel Driving-force Distribution Method for Instantaneous or Split Slippery Roads for Electric Vehicle," Automatika, Vol. 54, No. 1, pp. 103-113, 2013. 査読有
- [7] 前田健太, 藤本博志, 堀洋一, "瞬間低 $\mu$ 路での駆動力維持を目的としたインホイールモータ搭載電気自動車の前後輪駆動力配分法", 機会学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 794, pp. 3383-3392, 2012. 査読有
- [8] M. Pavlovsky, Y. Tsuruta and A. Kawamura, "Evolution of Automotive Chopper Circuits Towards Ultra High Efficiency and Power Density," 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 10, pp. 1217-1224, 2011. 査読有

[学会発表] (計 38 件)

- [1] 細山田悠, 河村篤男, "電気自動車への弱め界磁制御の適用と直列チョップパ方式での効率比較", 平成 25 年電気学会産業応用部門産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [2] 石田圭佑, 河村篤男, "電気自動車の高効率化を目指した最小 THDPAM 制御方式の評価", 平成 25 年電気学会産業応用部門産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [3] 三宮哲志, 元井直樹, 河村篤男, "二足歩行ロボットにおける足裏の滑りを利用した方向転換制御の一考察", 平成 25 年電気学会産業応用部門産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [4] 石田翔也, 河村篤男, 譲原逸男, 高柳敦, 大間亮, "パルス負荷及び High-Low 運転に対応する DC チョップパの出力電圧ロバスト制御", 平成 25 年電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [5] 伊藤智昭, 元井直樹, 河村篤男, "ハイブリッド鉄道車両のコスト低減を目指した燃料電池運用方法の研究", 平成 25 年電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [6] 松田朋浩, 河村篤男, Giuseppe Guidi, "零電圧スイッチング制御によるデュアルアクティブブリッジ DC-DC コンバータの高効率化に関する一考察", 平成 25 年電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, 2013 年 3 月, 千葉.
- [7] H. Fujimoto, S. Egami, J. Saito, and K. Handa, "Range extension control system for electric vehicle based on searching algorithm of optimal front and rear driving force distribution," Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4264-4269, October, 2012, Montreal, Canada.
- [8] H. Fujimoto, J. Amada, and K. Maeda, "Review of traction and braking control for electric vehicle," Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1292-1299, October, 2012, Seoul, Korea.
- [9] 松田朋浩, Giuseppe Guidi, 河村篤男, 今久保知史, 平尾俊幸, 軸丸武弘, "高効率絶縁型 DC-DC コンバータの試作とその評価", 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, No. 1-92 pp. I-391 - I-394, 2012 年 8 月, 千葉.
- [10] 武田将史, 元井直樹, 河村篤男, "電気自動車駆動系における双方向昇降圧チョップパの出力電圧最適化とその実験的評

- 価”,平成24年電気学会産業応用部門大会, No. 1-98, pp. I-419 - I-422, 2012年8月, 千葉.
- [11] 伊藤智昭, 河村篤男, “水素燃料電池の高寿命化を目指したハイブリッド鉄道車両の評価シミュレーションの構築”,平成24年電気学会産業応用部門大会, No. 5-23, pp. V-227 - V-230, 2012年8月, 千葉.
- [12] 遠藤可奏, 河村篤男, “状況に応じて昇圧・非昇圧の切り替えが可能なEV用チョッパ回路に関する研究”,平成24年電気学会産業応用部門大会, No. Y-14, 2012年8月, 千葉.
- [13] H. Fujimoto, and H. Sumiya, “Advanced Safety Range Extension Control System for Electric Vehicle with Front-and Rear-active Steering and Left-and Right-force Distribution,” Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 532-537, July, 2012, Kaohsiung, Taiwan.
- [14] Y. Tsuruta, and A. Kawamura, “Practical Control Strategy to Apply Soft Switching to EV Power Flow Control System,” Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference-ECCE Asia, Vol.1, pp. 515-519, June, 2012, Harbin, China.
- [15] 弦田幸憲, 河村篤男, “大電力チョッパ回路の方式別損失分析評価”,平成24年電気学会産業応用部門大会, No. 1-91, pp. I-387 - I-390, 2012年3月, 名古屋.
- [16] A. Kawamura, G. Guidi, S. Tsutsuki, Y. Watanabe, Y. Tsuruta, and N. Motoi, “Experimental Data Analysis on Total Driving Performance of Series Chopper Based EV Power Train,” Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1348-1353, November, 2011, Melbourne, Australia.
- [17] R. Kamei, T.W. Kim, and A. Kawamura, “Accurate Calorimetric Power Loss Measurement for Efficient Power Converters,” Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1173-1178, November, 2011, Melbourne, Australia.
- [18] S. Ishida, A. Kawamura, A. Takayanagi and H. Takada, “Robust convergence of the Impedance Matching Process based on Seek Control,” Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1489-1494, November, 2011, Melbourne, Australia.
- [19] G. Guidi, T. Imakubo, Y. Sasaki, and A. Kawamura, “Dual Active Bridge Modulation with Complete Zero Voltage Switching Taking Resonant Transitions into Account,” Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, September, 2011, Birmingham, UK.
- [20] Y. Tsuruta and A. Kawamura, “Soft Switching Chopper with Tail Loss Cancel Circuit,” Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, pp. 2223-2228, September, 2011, Arizona, USA.
- [21] 弦田幸憲, 河村篤男, “テイル損失低減回路付SAZZチョッパ”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [22] 渡辺祐樹, ジュゼッペグイディ, 河村篤男, “最小THDPAM制御によるモータ効率向上のケーススタディ”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [23] 松田朋浩, GiuseppeGuidi, 河村篤男, 今久保知史, 佐々木裕司, 軸丸武弘, “交流端電圧のPWM制御を用いたディアルアクティブブリッジDC-DCコンバータの高効率化に関する研究”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [24] 亀井亮, 河村篤男, 金泰雄, “熱量測定法を用いた高精度効率測定法の検討”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [25] 石田翔也, 河村篤男, 高柳敦, 高田浩一, “シーク制御とフォローイング制御に基づくインピーダンスマッチングにおける制御の収束性と敏捷性電”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [26] 穴澤達, 河村篤男, 金泰雄“磁気共鳴型非接触給電用アンテナの最適設計法と高周波電力整流回路の効率解析の検討”,平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011年8月, 沖縄.
- [27] Y. Tsuruta and A. Kawamura, “Verification of Efficient Operation for High Power DC Chopper,” Proceedings of the International Conference on Power Electronics, pp. 1286-1293, May, 2011, Jeju, Korea.
- [28] Y. Tsuruta, M. Pavlovsky, G. Guidi, and A. Kawamura, “Four quadrant SAZZ-1 Chopper for EV and HEV power train,” Proceedings of the International Conference on Power Electronics, pp. 1016-1023, May, 2011, Jeju, Korea.
- [29] 弦田幸憲, 筒木壮太, グイディジュゼッペ, 河村篤男, 徐培爾, 岩倉哲史, “30kW車載用4象限双方向チョッパの開発”,

平成23年電気学会全国大会, 2011年3月, 大阪.

- [30] 弦田幸憲, 河村篤男, “テイル損失低減機能付き水冷昇圧SAZZチョッパの高温温度試験”, 平成22年電気学会産業応用部門大会講演論文集 R1-8, pp.361-364, 2010年8月, 東京.
- [31] Y. Tsuruta, and A. Kawamura, “Mid-Power SAZZ Chopper with Switched Tail Loss Cancel Circuit,” Proceedings of the International Power Electronics Conference, pp. 1195-1201, June, 2010, Sapporo.
- [32] M. Pavlovsky, Y. Tsurura, and A. Kawamura, “Recent Improvement of Efficiency and Power Density of DC-DC Converters for Automotive Applications,” Proceedings of the International Power Electronics Conference, pp. 1866-1873, June, 2010, Sapporo.

[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

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 博志 (FUJIMOTO HIROSHI)  
東京大学・新領域創成科学研究科・准教授  
研究者番号：20313033

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

下野 誠通 (SHIMONO TOMOYUKI)  
横浜国立大学・工学研究院・助教  
研究者番号：90513282