

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04335

研究課題名（和文）電動発電機の積極的な損失増加制御による水素燃料電池自動車の航続距離延長

研究課題名（英文）Extending the cruising distance of fuel cell vehicles by active motor-generator loss control

研究代表者

加藤 修平（KATO, Shuhei）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：40802294

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）：本研究は開発が期待されている水素を燃料とした水素燃料電池自動車の大きな課題の1つである航続距離を50%増とするブレークスルーを目指している。この目標は電動発電機の損失を積極的に制御する提案法により巨大な電気部品を減らし、空きスペースへ追加の水素燃料を搭載することで達成を目指している。

本研究ではゼロ発電における電動発電機の温度上昇を実測し、連続下り坂の箱根峠を模擬した約15分のブレーキ時系列パターンにおける温度上昇幅は、100%負荷での高効率駆動連続運転時の温度上昇幅よりも低いことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は開発が期待されている水素燃料電池自動車の大きな課題の1つとなっているブレーキ性能向上を解決するだけでなく、広く電動発電機に関わる回転機器のブレーキ機能安全性向上にも応用可能である。例えば本研究は風力発電機の倒壊防止用緊急ブレーキや電車緊急ブレーキなどへ応用可能なため、非常に大きな波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research aims at a breakthrough in increasing the cruising range by 50%, which is one of the major challenges of hydrogen fuel cell vehicles that are expected to be developed. This goal is achieved by reducing bulky electrical components through a proposed method that actively controls motor-generator losses, and by loading additional hydrogen fuel into the empty space.

In this study, we measured the temperature rise of the motor generator at zero power generation. It was also demonstrated that the temperature rise width in the braking time-series pattern for about 15 minutes simulating the continuous downhill Hakone Pass was lower than the temperature rise width during continuous high-efficiency drive operation at 100% load.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：水素燃料電池自動車 電気自動車 回生失効 フェード現象

1. 研究開始当初の背景

FCV (FCV : Fuel Cell Vehicle) とは水素と空気中の酸素との化学反応により発電し、電動発電機を經由してタイヤを回転させる自動車である。この電動発電機はモータ走行に加え、回生発電の両方を行える。ただ FCV は 1 回の水素充填での航続距離が約 600km と短い為、航続距離を如何にしてガソリン車と同等とするかが本格普及に向けた大きな課題の 1 つとなっている^[1]。そこで本研究は放電抵抗器と呼ばれる主要電気部品の 1 つを不要とする研究であり、距離延長が 50% 増のブレークスルーを目指している。具体的には本研究は FCV のブレーキ機能の弱点を克服する研究である。

FCV は長い連続下り坂でこのバッテリーの極小容量に起因してブレーキシステムに安全上の弱点がある。下り坂途中でバッテリーは直ぐに満充電状態に到達し、ブレーキとしての役割を果たさない極めて危険な状態(回生失効)となる。この問題に対処する為、FCV では回生失効時に余剰電力を熱として消費(廃棄)しブレーキ機能を維持すべく放電抵抗器と呼ばれる巨大な抵抗器が搭載されている。これにより回生失効の危険性は避けられるが、限られた車内空間の一部が電力を熱として廃棄する為だけに占有されているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は FCV のブレーキ機能の弱点を克服し、FCV 航続距離を延長すべく車両電力管理により大容量水素搭載空間を確保することである。予備調査として箱根峠を走行した結果、放電抵抗器で廃棄が必要な発電余剰は 20 分以上連続で平均 7 kW であった。従来放電抵抗器に体積換算で約 60 Liter が必要であり、市販されている FCV の水素容積約 120 Liter に対し 50% の占有率である。一方、本提案方法で車両運動エネルギーを FCV 電動発電機の損失として処理しても通常水冷で最大約 100 に抑えられると試算している。従って本提案が実現すれば前述の約 60 Liter の放電抵抗器が不要となり、単純計算で現状より 50% 増の水素を搭載可能となる。即ち水素燃料の増加に比例して航続距離が 50% 増で約 900 km となり、ガソリン車の 1,000 km に近づけることが出来る。

3. 研究の方法

(1) 電動発電機自身の積極的な損失増加制御によるブレーキ動力発生

本研究は FCV の電動発電機の損失(鉄損や銅損)を積極的に増加させる。これにより敢えて電動発電機の効率を悪化させることにより、FCV システム全体の性能向上を目指している。図 1 に電動発電機が永久磁石同期電動機の場合の電圧・電流の制限を考慮した運転可能範囲を示す。同図において従来は高効率の運転点 P であったが、本研究では T1 や T2 の敢えて効率が悪化する運転点を選択する。本研究での運転点は電動発電機の諸定数を用いて解析的に計算できる。これより図 2、図 3、表 1 に示す実験装置にて本研究でのブレーキ動力発生原理検証を行う

(2) 連続した下り坂における電動発電機の温度上昇の評価

本研究では前述のように敢えて電動発電機に発熱させる。そのため、電動発電機自身の温度上昇が鍵となる。これらを検証するため、図 4、図 5 に示す代表的な連続した下り坂である箱根峠において必要なブレーキ動力を電動発電機自身で発生させ、温度上昇を検証する。

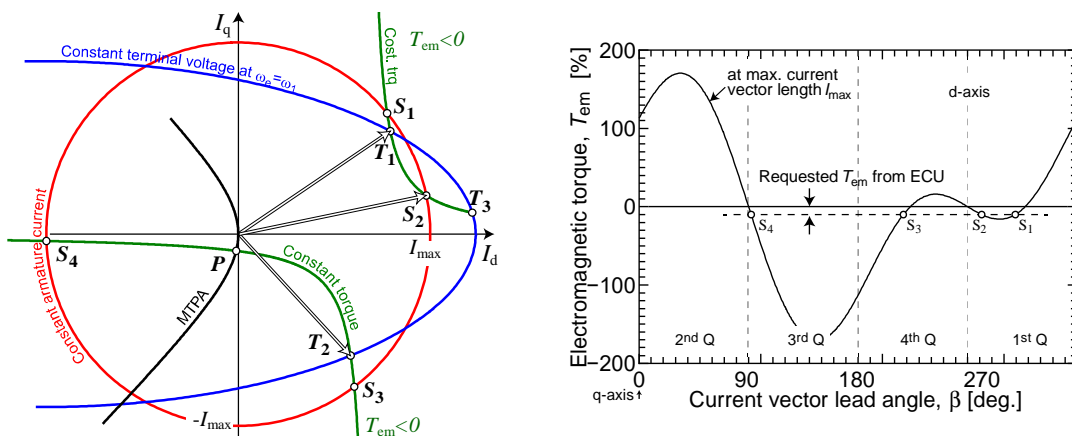


図 1 永久磁石同期電動発電機の電圧・電流制限を考慮した運転点

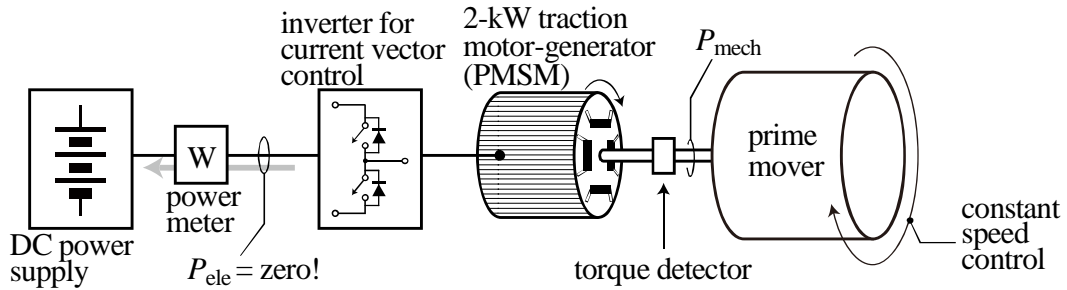


図 2 積極的な電動発電機の損失増加制御の原理検証実験システム

表 1 電動発電機の諸元

Rated power	P_R	2.0 kW at 3000 min ⁻¹
Stator resistance	R_a	0.2 Ω at 25 deg. C
d-axis inductance	L_d	2.0 mH at no load
q-axis inductance	L_q	2.0 mH at no load
Armature flux linkage	ψ	0.082 Wb
Pole pair number	P_n	4
Rated current vector length	I_n	12.7 A _{rms}

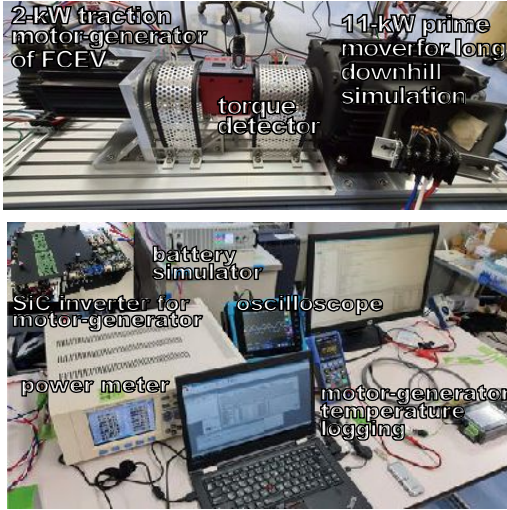


図 3 実験装置外観（電動発電機評価装置、高精度電力計システム、バッテリーシミュレータ）

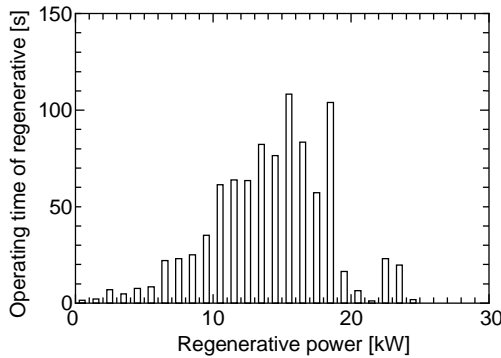


図 4 箱根峠における必要ブレーキ動力の分布

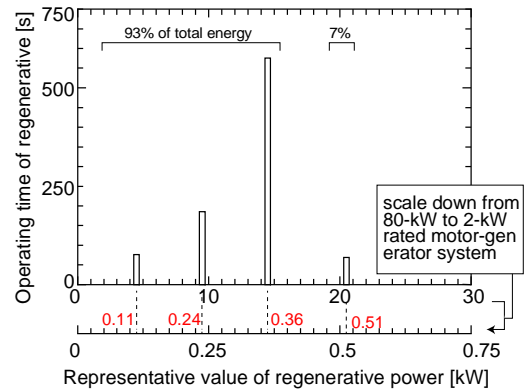


図 5 実験室規模にスケールダウンし 4 値に代表させたブレーキ動力分布

4. 研究成果

(1) 電動発電機自身の積極的な損失増加制御によるブレーキ動力発生

図 6、図 7 にブレーキ動力発生の実験結果を示す。同図より電動発電機をベクトル制御するインバータの電流ベクトル長や電流進角を調整することにより、定格の 1.2 倍程度の電動発電機電流で必要とされるブレーキ動力の 90% 以上を発生できることが分かった。

(2) 連続した下り坂における電動発電機の温度上昇の評価

箱根峠において必要なブレーキ動力を電動発電機自身で発生させた場合の電動発電機の温度上昇幅は約 60 度であった。市販車の電動発電機ベンチマーク^[2]によると、過酷な条件下では電動発電機の温度は最大約 135 度まで上昇している。これらの実験結果より、例えば箱根峠を下る際は初期状態として電動発電機の温度が約 80 度以下であれば、本研究の電動発電機自身の発熱によるブレーキ動力発生が実現できる。これにより、本研究の方法にて FCV

の弱点（ブレーキ動力）を克服できる。つまり、FCV に巨大な放電抵抗器は不要であり、追加の水素タンクにより航続距離を延ばせると考えられる。

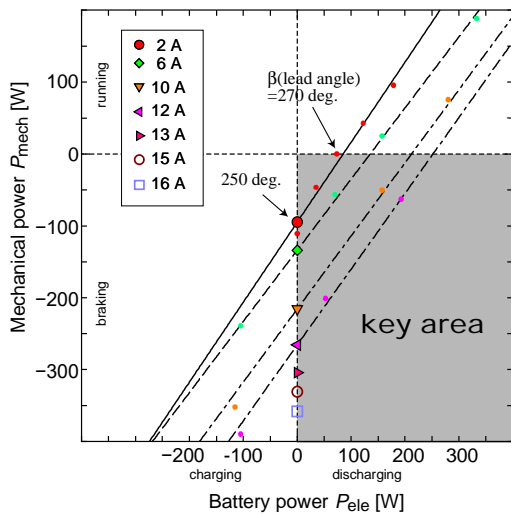


図6 $N_{\text{mech}}=3000 \text{ min}^{-1}$ における入力電力と機械動力の関係

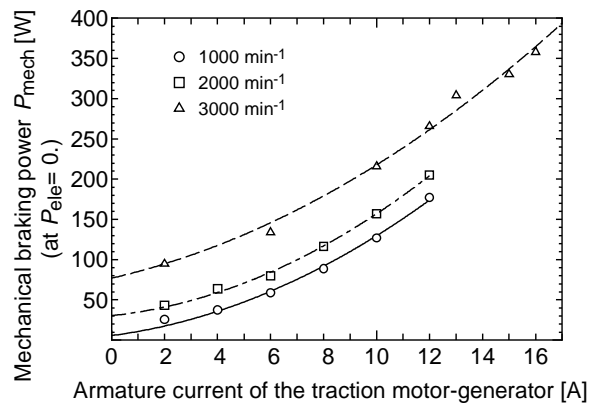


図7 電動発電機の電流に対する最大発生可能なブレーキ動力の関係

引用文献

- [1] Nikkei BP, “Gasoline vs EV vs FCV -Three factors-”, *Nikkei Business*, vol. 5, pp. 36-37, 2018
- [2] Rong Yang: “Electrified Vehicle Traction Machine Design with Manufacturing Considerations”, Ph.D. Thesis, McMaster University, Open Access Dissertations and Theses, <http://hdl.handle.net/11375/20895>, 2017

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 Kato Shuhei, Koido Junji	4. 巻 139
2. 論文標題 A Study on Generating Braking Force by Permanent Magnet Synchronous Motors when Regenerative Braking is Disabled for Fuel Cell Vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 225 ~ 231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.139.225	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 町田直人、加藤修平
2. 発表標題 水素燃料電池自動車向け回生失効の永久磁石モータの廃電によるエンジンブレーキ模擬の検討
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤将平、加藤修平
2. 発表標題 水素燃料電池車の廃電技術を応用したエンジンブレーキ騒音低減
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 修平
2. 発表標題 電動車両のアクセルペダル高機能化
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換 家電・民生 自動車合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kato Shuhei, Koido Junji
2. 発表標題 Extending the cruising distance of fuel cell electric vehicles by active motor-generator loss control
3. 学会等名 21st European Conference on Power Electronics and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤修平
2. 発表標題 水素燃料電池自動車用の新しい電気ブレーキシステムの開発
3. 学会等名 自動車技術会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回生ブレーキシステム	発明者 加藤修平	権利者 日本大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-136968 2018/07/20	出願年 2019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
研究 分 担 者	野村 新一 (Shinichi Nomura) (90401520)	明治大学・理工学部・専任准教授 (32682)	

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
---------	---------