

水素燃料電池自動車の損失増加インバータ制御による 制動力向上と実験検証

日大生産工(院) ○坂本 仁
日本大学 加藤 修平

1. まえがき

水素は持続可能なエネルギー源として注目されている。水素燃料電池電気自動車 (FCEV: fuel cell electric vehicle) は電気自動車と比較して充填時間が短いなどのメリットがあり、今後普及が見込まれる⁽¹⁾。しかし、水素ステーションの拡充などの課題がある。また、FCEVはピストンエンジンを持たないため、長い下り坂での制動力に弱点がある。特に商用車では積載容量が重要視されるため、一時的なエネルギーバッファとしてのバッテリー容量は電気自動車と比較して相対的に極めて小容量になる。これにより特定の運転状況でのフェード現象⁽²⁾など安全性への問題が指摘されている。この問題を解決するために、「回生ブレーキ」が導入されている。回生ブレーキは、ブレーキ操作時に生じる運動エネルギーを電気エネルギーとして回収し、それをバッテリーに蓄電する仕組みである。しかし、商用車としてのFCEVのバッテリーは極小容量であるため、連続的なブレーキ操作によりバッテリーがすぐに満充電状態に達してしまう。この状態は「回生失効」と呼ばれている。この回生失効および制動力の低下がFCEVの商用車における大きな課題の一つとなっている。

2. 研究目的

本研究は、これまで「損失」とされていた電動発電機の内部エネルギーを積極的に活用し、前述の課題を解決することである。Fig1のように一般的なFCEVの回路構成では、回生失効を回避すべく放電抵抗器が使用されていた。しかし、放電抵抗器はエネルギーを熱として消費するためだけの目的で狭い車載空間を占有している。そのため本研究では放電抵抗器を排除する方法を提案する。このアプローチでは、電動発電機が回生する全エネルギーをその内部損失による発熱として処理し、廃電するというものである。提案法は、内部損失という問題を手にとり、それを有効活用するものである。つまり、電動発電機は高効率であるべきという概念を

覆し、本研究は意図的に多くの損失を発生させることでシステム全体の性能を向上させることができる⁽³⁾。

以下に対象とする状況下での回生量の定量化、提案法の基礎特性、電動発電機の温度上昇などについて実験的に検証したので、以下に報告する。

3. 従来法と提案法比較

従来手法⁽⁴⁾で最も代表的な方法は、Fig.1に示す巨大な放電抵抗器による電力消費である。この制御は、高電圧バッテリーが満充電になると、回生電力流路を放電抵抗器へ切り替える。FCEVは回生電力流路を維持できるため、放電抵抗器により制動力を得ることができる。例えば、前述の7.4 kWを連続的に消費するには、約60リットルの容積の放電抵抗器が必要である。これはトヨタFCEVの水素タンク容量120リットルの50%に達する。また、別の従来法ではd軸電流とq軸電流の合計を新たなd軸電流として設定する方法が提案されている。しかし、この場合、電動発電機の損失は増加するが効果は限定的である。これに対し本研究では電動発電機による回生電力の全てを自身の熱として消費するインバータ制御、つまり効率がゼロ%の制御を提案する。この提案法によって電動発電機が回生する全エネルギーをその内部損失による発熱として処理し、廃電し、回生失効および制動力の低下を防ぐことで特定の運転状況でのフェード現象など安全性への問題を解決することが可能である。

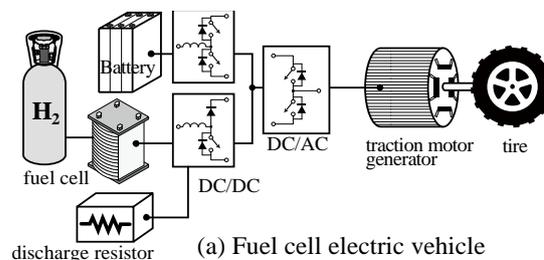


Fig.1: Configuration of FCEV

Improving Braking Force and Experimental Verifications using Inverter Control for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles

Jin SAKAMOTO and Shuhei KATO

4. 提案法による温度上昇実験

永久磁石同期電動機 (PMSM) の温度上昇は、長い下り坂を下る際にバッテリー電力がゼロになるときの制動力とその動作時間を代表的な 4 つの値で実験し、2 kW システムで検証した。Fig. 2 に本実験におけるバッテリー電力と電動発電機の電機子電流実効値の時間変化を示す。Fig.3 に周囲温度 23°Cにおける永久磁石同期電動機 (PMSM) の温度上昇結果を示す。また Fig.4 にインバータ損失、つまり電動発電機の交流側の回生電力を示す。さらに Fig.5 に電動発電機線間電圧を示す。実験結果によると、電動発電機の温度上昇は約 55°Cである。Fig.2 において、バッテリー電力は 4 つのブレーキ動力代表値の変化点においてやや大きくなっているものの、全ての区間においてほぼゼロを維持している。また、Fig.4 より 510 W のブレーキ動力のうち約 80 W がインバータ損失となっていることがわかる。さらに、回転速度は 3000 min⁻¹ の中速領域であるが、提案法は強め界磁のため比較的高い線間電圧 (通常の MTPA と比較して約 30%増) となっている。一般的に FCEV は高速領域のために昇圧コンバータを

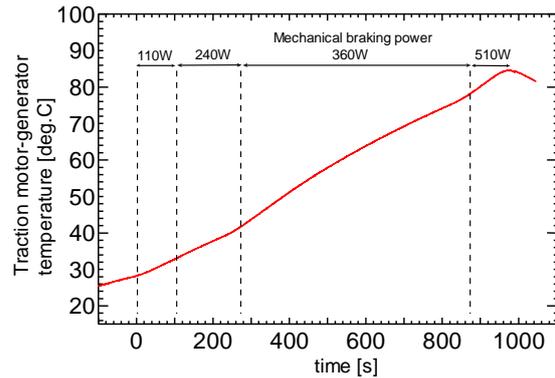


Fig.3: Experimental results of traction motor generator temperature rise when simulating going down the long downhill.

備えているため、高い電圧が必要になることは大きなデメリットにならない。次に長い下り坂を下る際の温度上昇が過大でないことを判断するため、電動発電機と同じ温度測定箇所を高効率 MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 制御⁽⁶⁾による連続定格出力時の温度上昇を試験した。Fig.6 にその温度上昇の比較結果を示す。この比較実験の結果から、提案法による電動発電機の時間的な温度上昇は速いが、その温度上昇幅は

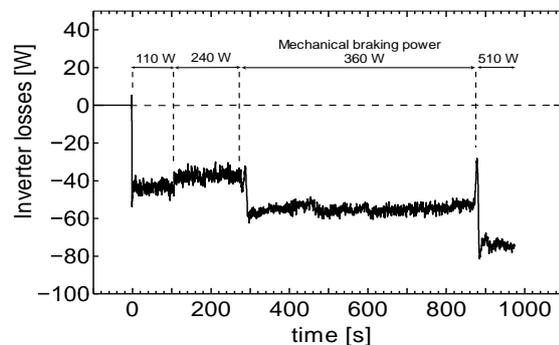
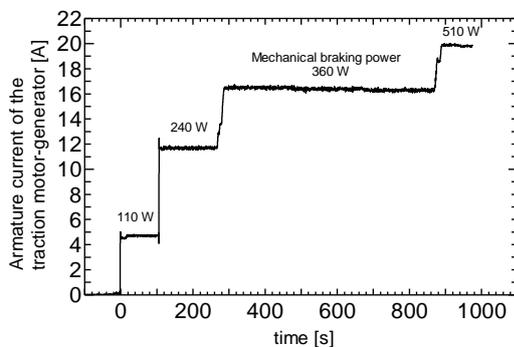


Fig.4: Inverter losses at temperature rise

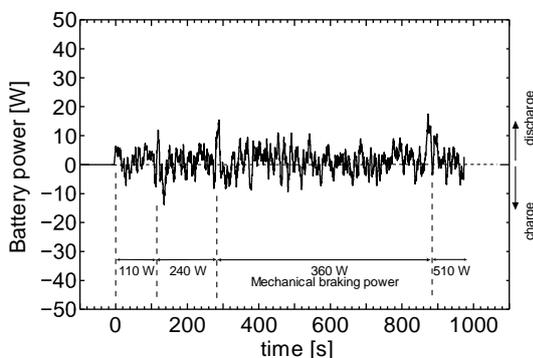


Fig.2: Time variation of the battery power and traction motor-generator armature current.

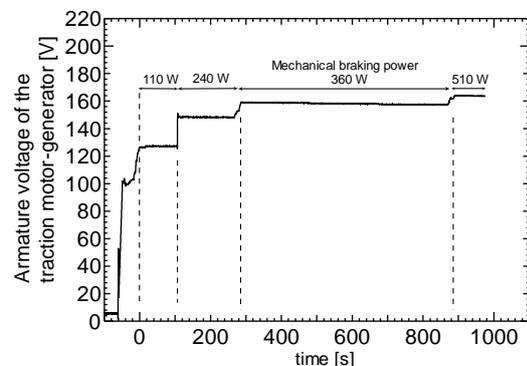


Fig.5: Time variation of the traction motor-generator armature line-to-line voltage.

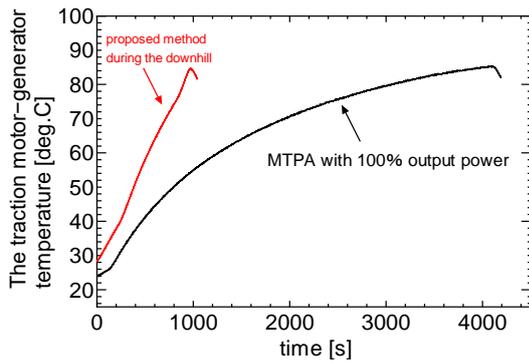


Fig.6: Temperature rise comparison result between the proposed method and high efficiency MTPA control.

MTPA 制御による高効率駆動と同程度又は小さい。文献⁶⁾の日産自動車「リーフ」ベンチマークテストによると、定格出力 80 kW の電動発電機の最高温度は 135°C である。これと直接比較することはできないが、提案手法を用いた場合、山頂での電動発電機温度が約 80°C 以下であれば、長い下り坂で安全な走行が可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、FCEVに搭載される小容量バッテリーが持つブレーキシステムの潜在的な弱点に焦点を当て、実験的に考察を行った。特に典型的な長い下り坂を走行する際に発生する回生電力の余剰問題は、ブレーキシステムの性能に影響を与える可能性がある。この問題に対して、永久磁石同期電動機の損失を積極的に制御するインバータ制御を提案した。提案法のユニークな点は、損失を最小化するのではなく、逆に意図的に損失を増加させることでシステム全体の性能を向上させるというアプローチを取ったことである。この方法は、初めは反直感的に思えるかもしれないが、実験結果として箱根峠の走行テストから、実験室規模の2 kWシステムにスケールダウンした条件下でも永久磁石同期電動機の過度な温度上昇を引き起こさないことが確認された。さらに、提案法を採用することで、放電抵抗器の考慮が不要となり大容量の水素タンクを持つFCEVの航続距離を効果的に延ばすことができる。提案法はFCEVのブレーキシステムの弱点克服のみならず、電動車両のエンジンブレーキ静音化にも応用できる。というのも近年のエンジンは高効率ゆえエンジンブレーキの際にエンジンがより高速回転している。このエンジン騒音が問題となる場合があり、このような状況下において

提案法はエンジンを高速回転させず電動発電機のみでほぼ無音のエンジンブレーキと同等の制動力を実現できる可能性がある。今後は商用車クラスの大容量システムにおいての実験検証や他の電力廃棄方法について検討する。

参考文献

- 1) 広瀬雄彦:「持続可能な社会に向けての新たな挑戦—燃料電池車の現状と未来」,Vol.21,No.7, pp.64-79 (2016)
- 2) 福山邦男・竹内繁樹・不破俊弘:「フェード現象に起因したトレーラの横転事故事例」, 交通科学研究資料, Vol.42, pp.21-24 (2001)
- 3) 加藤,他:「燃料電池車向け回生失効時の永久磁石モータ制動力確保の検討」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 2019, 139 巻, 3 号, p. 225-231
- 4) 山口公一:「ハイブリッド自動車」, 公開特許公報P2003-264904A
- 5) Rong Yang: “Electrified Vehicle Traction Machine Design with Manufacturing Considerations”, Ph.D. Thesis, McMaster University, Open Access Dissertations and Theses, 2017