

高出力応答が求められる小型モビリティへの適用を 目指した FCV の電力マネジメントシステムの開発

Development of a Power Management System for Fuel Cell Vehicles (FCVs)
Aimed at Application in Small Mobility Vehicles Requiring High Power Response

鈴木 聖也 中田 暢大

Abstract

In recent years, the introduction of small electric mobility vehicles equipped with fuel cells has been proposed as part of efforts to realize a carbon-neutral society^{[1][2]}. Compared with BEVs (Battery Electric Vehicles), fuel cell vehicles offer advantages such as longer driving range. On the other hand, fuel cells degrade under load fluctuations, leading to reduced output performance.

Therefore, Yamaha Motor Engineering Co., Ltd. (hereafter “the company”) has developed a hybrid system combining a fuel cell and a LiC (Lithium-ion Capacitor) for application in small electric mobility vehicles requiring high power response. This system suppresses load fluctuations on the fuel cell while achieving approximately 53% reduction in size, 50% reduction in weight, and 23% improvement in acceleration performance compared to systems using LiB (Lithium-ion Battery) as the secondary battery.

Although LiC is compact, lightweight, and provides high output, its discharge capacity is small. Accordingly, we first built a prototype hybrid system combining a fuel cell and a LiB to verify the load-fluctuation suppression function. Next, we developed a system in which the LiB was replaced by LiC, obtaining favorable results in both the suppression of fuel-cell load fluctuations and the improvement of driving performance.

This paper introduces these technical development efforts and presents the evaluation results.

1 はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、燃料電池を搭載した小型電動モビリティの導入が提案されている^{[1][2]}。燃料電池車は、BEV(Battery Electric Vehicle)と比較して、航続距離などの面で優位性を有する。一方、燃料電池は負荷変動によって劣化し、出力が低下するという課題がある。そこで、ヤマハモーターエンジニアリング株式会社(以下当社)では、高出力応答が求められる小型電動モビリティへの適用を目的として、燃料電池とLiC(Lithium-ion Capacitor)によるハイブリッドシステムを開発した。本システムにより、燃料電池の負荷変動を抑制しつつ、二次電池にLiB(Lithium-ion Battery)を採用した場合と比較して、LiCにて約53%の小型化、約50%の軽量化、約23%の加速性能向上を実現した。LiCは小型軽量かつ高出力であるが、放電容量が小さい。そのため、まずは燃料電池とLiBによるハイブリッドシステムを試作し、負荷変動抑制機能の検証を行った。次に、LiBをLiCに置き換えたシステムを開発し、燃料電池の負荷変動抑制効果および走行性能の向上について良好な結果を得た。本稿では、これらの技術開発の取り組みと評価結果について紹介する。

2

LiB を用いた燃料電池の負荷変動抑制システム

燃料電池をモビリティに搭載するには、加減速時の負荷変動や高負荷走行時の出力要求に対応する必要がある。このため、自動車をはじめとする多くのモビリティでは、燃料電池と二次電池を組み合わせたハイブリッドシステムが採用されている^[3]。

二次電池を併用することで、燃料電池が停止している間の電力供給が可能となるほか、負荷変動を吸収することで燃料電池の劣化を抑制できる。また、燃料電池単独では利用できない回生エネルギーを二次電池に回収することが可能であり、システム全体のエネルギー効率向上にも寄与する。これらを踏まえ、本開発においても、燃料電池と二次電池を組み合わせたハイブリッドシステムを試作し、燃料電池の負荷変動抑制効果を検証した。ここで、ダイナミックな出力特性を持つ小型電動モビリティとして、レーシングカートを選定した。

2-1. システム構成

試作したシステムの構成を図1に示す。燃料電池システムの諸元は表1に示す。燃料電池、二次電池、モータは市販品を使用し、電流制御回路は試作した。燃料電池およびモータは、エンジン搭載型レーシングカートを参考に、走行時の楽しさを確

保できる出力特性と、市販の空冷式燃料電池の仕様を踏まえて選定した。二次電池は、入出力電流特性を考慮して選定した。

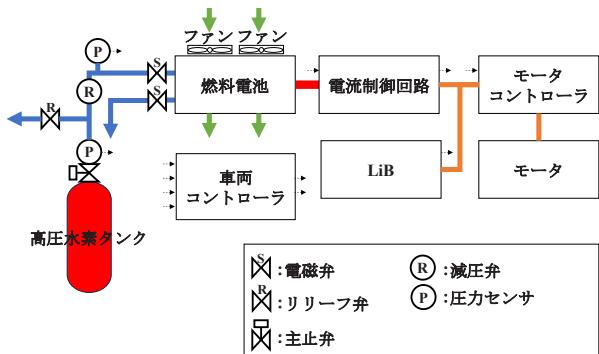


図1 試作した燃料電池システム

表1 システム諸元

燃料電池 - 型番	H-5000 @HORIZON FUEL CELL
-タイプ	PEFC
-定格出力	5000W (72V at 70A)
LiB -セル型番	20Ah-HP @TOSHIBA
-公称電圧	48V (22直列)
-最大放電電流※	120A
-最大充電電流※	120A
電流制御回路	試作
-入力電圧	70-120V
-出力電圧	35-60V
モータ -型番	MA01B @MITSUBA
-最大トルク	20Nm @210Arms
-出力	6kW @48V

※独自に設定

本システムでは、スロットル操作などのユーザ入力を受けて車両コントローラが、燃料電池、LiB、モータなどの状態を考慮し、モータコントローラにトルク指令値を、電流制御回路に燃料電池の発電電流指令値を出力する。電流制御回路は、入力された発電電流指令値を目標電流値とし、実測電流値との差分に基づいてPWM(Pulse Width Modulation)のデューティ比を決定する。

2-2. 電力マネジメント

本開発では、燃料電池の負荷変動抑制を目的とした電力マネジメント制御を検討した。電力マネジメントの全体構成を図2に示す。

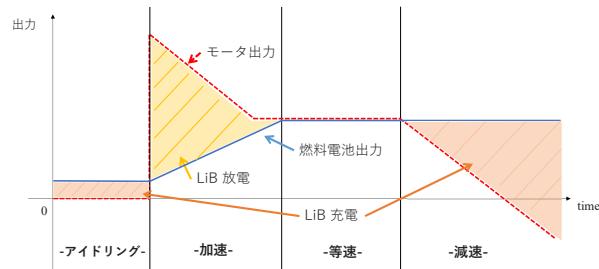


図2 電力マネジメント制御構成

アイドリング時には、燃料電池で発電した電力をLiBへ充電する。等速走行時や減速時などの低負荷走行時には、燃料電池の発電電力でモータを駆動するとともに、余剰電力をLiBに充電する。一方、高負荷走行時や急激な負荷変動が発生した場合には、燃料電池の発電電力に加え、不足分の電力をLiBから供給することで、燃料電池の負荷変動を抑制しつつ、モータの負荷要求に対応する。このような制御により、燃料電池の発電量を任意の値で維持しながら、モータの電力需要に柔軟に対応することが可能となる。

電力マネジメント制御の成立性検証および制御パラメータの適合を目的として、車両電力収支シミュレータを構築した。本シミュレータは、車両運動モデルと、モータ、LiB、燃料電池からなる電気モデルを組み合わせたものである。シミュレーション環境にはMATLAB R2022bを使用した。各モデルの粒度はシステムレベルとし、ツールボックスに含まれるライブラリブロックを活用した。モデルパラメータおよび走行パターンは、実測データに基づいて設定した。シミュレーション結果の一例を図3に示す。

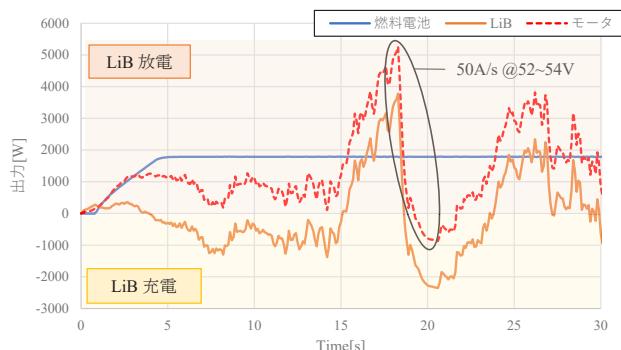


図3 各コンポーネントの電流比較

図3より、モータ出力が燃料電池の発電電力を上回る場合には、不足分をLiBから放電して補っており、逆にモータ出力が燃料電池発電電力を下回る場合には、LiBへの充電が確認できる。また、モータ出力の変動に対して燃料電池発電電力は一

高出力応答が求められる小型モビリティへの適用を目指した FCV の電力マネジメントシステムの開発

Development of a Power Management System for Fuel Cell Vehicles (FCVs) Aimed at Application in Small Mobility Vehicles Requiring High Power Response

定であり、負荷変動が抑制されている。さらに、本シミュレータを用いて、発電電流指令値などの制御パラメータの適合を行った。具体的には、走行パターンにおいて LiB の SOC (State Of Charge) に対する発電電流指令値を変更し、水素消費量、LiB の消費電力量、航続距離を網羅的にシミュレーションした。その結果、電欠回避のために、燃料電池の発電電力量が LiB の消費電力量を上回り、かつ航続距離が最大となる発電電流指令値を採用した。その他の制御パラメータも同様の手法で適合した。このように、シミュレーションを活用することで、電力マネジメント制御の成立性検証および制御パラメータの適合期間を、実機主体で検証／適合した場合と比較して約60%程短縮できた。

2-3. 実走評価

実走評価のため燃料電池システムを試作し、レーシングカートのフレームに搭載した。試作車両の外観を図4に示す。



図4 試作車両

モータは、一般的なエンジンカートにおけるエンジン搭載位置と同様の場所に配置した。燃料電池は車両後方に、LiB、電流制御回路、車両コントローラ、水素タンクおよび補機類は、車両の左右バランスと積載スペースを考慮して配置した。

本試作車両を用いて、実走行時における負荷変動抑制効果を検証した。計測結果の一部を図5に示す。

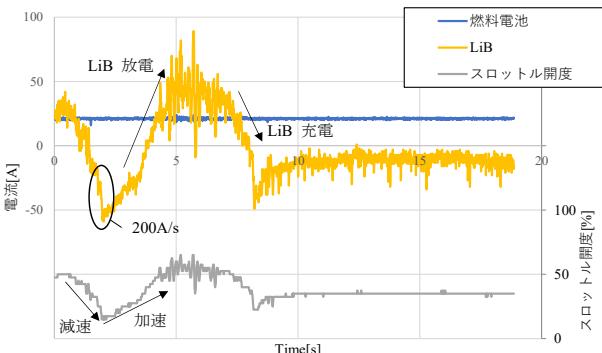


図5 実走行時の電流、スロットル開度

図5は、特に大きな電流変動が発生した場面のデータである。LiB の電流は最大90A、最小−60A となり、電流変化率は最大200A/s に達している。一方、燃料電池の発電電流は走行中を通じて一定値で維持されており、LiB 電流やスロットル入力の急変動の影響を受けていない。以上の結果より、本システムが燃料電池の負荷変動抑制に有効であることが確認された。

3 二次電池の換装によるシステムの小型化および動力性能の向上

本章では、二次電池を LiB から LiC へ換装することによる、システムの小型化・軽量化および動力性能の向上に関する取り組みを紹介する。一般に、走行に必要な電力を燃料電池で賄うことが可能なシステムでは、二次電池は主に負荷変動の吸収に用いられる。この場合、二次電池を負荷変動の吸収に加え走行に必要な電力を賄う目的でも使用した際と比較し、必要な電力量が小さくなるため、放電容量を抑えることが可能である。ここで、燃料電池の発電量を制御しない場合、発電量は二次電池の電圧に依存し、電圧が高い場合には発電量が小さく電圧が低くなると発電量が多くなる。モータ負荷が大きい場合、燃料電池の発電が間に合わず二次電池の電力が消費されるため、コース走行中に電欠しないだけの十分な放電容量を確保する必要がある。そこで、二次電池の電圧に依存せず、任意の発電電流を設定可能な電流制御機能を備えた燃料電池システムでは、モータ負荷に応じて発電電流を最適化できる。すなわち、モータ負荷が大きい場合には発電電流を増加させ、小さい場合には低減させる制御が可能となる。試作したシステムは、燃料電池により走行に必要な電力を直接供給でき、かつ電流制御により発電電流を柔軟に設定可能である。このため、二次電池の放電容量をさらに小型化できると考え、LiB に比べて放電容量は小さいものの、小型・軽量かつ高出力である LiC を採用した。採用した LiB および LiC の仕様比較を表2に示す。

表2 LiB と LiC の仕様比較

	LiB	LiC
セル型番	20Ah-HP	CPQ3300SD
公称電圧	48V(22 Series)	48V(16 Series)
放電容量	20Ah	1.47Ah
最大放電電流*	120A	500A
最大充電電流*	120A	500A
寸法(L×W×H)	460×173×204mm	335×178×127mm
重量	18kg	9kg

* 独自に設定

LiC への換装により、二次電池の重量を約50%、体積を約53%削減でき、システムの小型化・軽量化が可能となる。また、LiC は充放電能力が約4倍高く、動力性能の向上も期待される。なお、今回採用した LiC は、LiB と同一の電圧範囲を有しており、二次電池以外のシステム構成部品は変更せずに換装した。一方で、LiC の放電容量は LiB の約8%に相当するため、過放電を防止する電力マネジメント制御が重要となる。

3-1. LiC 換装後の電力マネジメント

レーシングカートとしての走行性能を確保するためには、走行中に過放電による駆動トルクおよび過充電による回生トルクの制限が生じないことが望ましい。これらの制限は、意図した加減速を阻害し、走行性能の低下を招くおそれがある。そこで、本開発では、走行パターンにおいて LiC が過放電および過充電に至ることなく走行可能な電力マネジメント制御を、シミュレータを用いて検討した。

シミュレータは、LiB のパラメータを LiC 仕様に置き換えて構築した。ここで、LiC は SOC 低下に伴い電圧が低下する特性を有し、SOC 60% 時に約48V となる。この特性を踏まえ、LiC の SOC を 60 から 70% の範囲で維持することを目標に、網羅的なシミュレーションを実施し、燃料電池の発電電流を決定した。また、SOC が設定範囲を逸脱する場合には、駆動トルクおよび回生トルクに制限を加える制御ロジックを適用し、同様に網羅的なシミュレーションを行って、制限値を決定した。シミュレーション結果の一例を図6に示す。

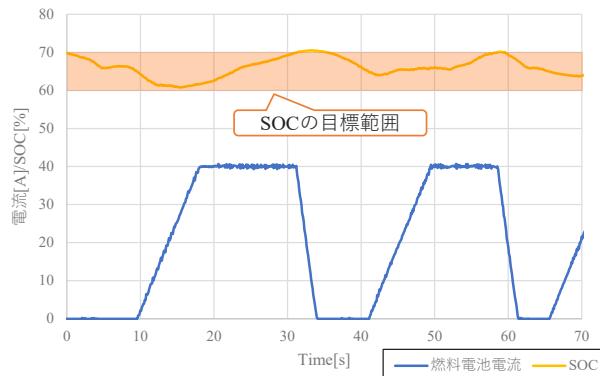


図6 コース1周走行時の発電電流に対する SOC

図6より、コース1周走行した時、SOC は目標範囲内で維持されており、電力マネジメント制御の成立性が確認された。

3-2. LiC 換装後の実走評価

実走評価により、システム成立性の検証および、LiB 搭載時との走行性能比較を実施した。評価は、広く平坦なアスファルト敷地に設定した特設コースにて行った。電力収支の結果を図7に示す。

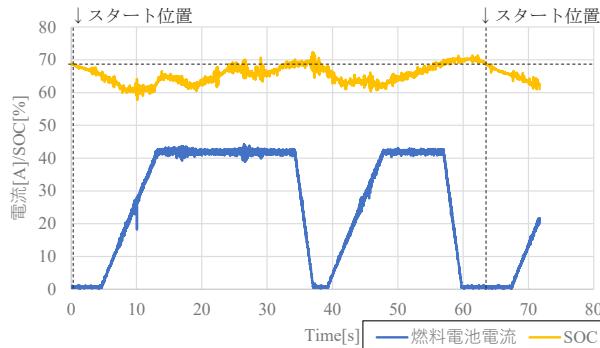


図7 コース走行時の電力収支

図7は、特設コースにて高負荷走行をした時の任意の周回を抽出したものである。各周回におけるスタートライン通過時の LiC の SOC を比較した結果、いずれも同一であり、走行中を通じて一定の SOC を維持できていることが確認された。この結果より、燃料電池の負荷変動抑制機能を維持したまま、二次電池の小型化・軽量化が成立することが示された。加速性能比較結果を図8に示す。

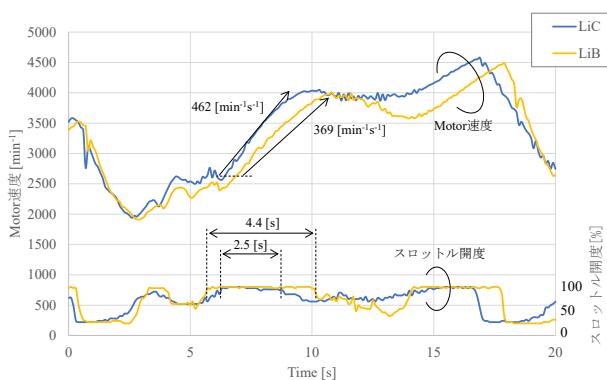


図8 LiB および LiC 搭載時の加速性能比較

図8より、LiC 搭載時には加速性能が約25 %向上することが確認された。さらに、LiC の充電能力の高さから回生トルク上限値の引き上げも実現でき、加減速の応答性に優れた車両挙動が得られた。

■著者



鈴木 聖也
Masaya Suzuki
ヤマハモーターエンジニアリング㈱
先行技術開発部



中田 輝大
Nobuhiro Nakata
ヤマハモーターエンジニアリング㈱
先行技術開発部

4 おわりに

本開発では、小型電動モビリティへの燃料電池システム適用における課題である負荷変動の抑制、システムの小型化・軽量化、ならびに走行性能の向上を目的として、レーシングカートを用いたシステム開発および検証を実施した。本システムにより、燃料電池の負荷変動を抑制しつつ、二次電池に LiB を採用した場合と比較して、LiC にて約53%の小型化、約50%の軽量化、約23%の加速性能向上を実現することができた。また、開発に際してシミュレータを活用することで、開発期間の短縮を実現した。

今後は、開発したシステムと電力収支シミュレータにより、ヤマハ発動機グループ内外への技術的貢献を目指す。

■参考文献

- [1] Yasuyuki Muramatsu, Masatsugu Ohishi, Shuhei Adachi: "Fuel Cell System for Two-Wheeled Vehicles", Proceedings The 11th. Small Engine Technology Conference No. 2005-32-0077, (2005).
- [2] Kengo Ikeya, Kazuyuki Hirota, Yohei Takada, Toru Eguchi, Kazuhiko Mizutani, Tohru Ohta: "Development and Evaluation of Air-Cooled Fuel Cell Scooter", Proceedings The 17th. Small Engine Technology Conference No. 2011-32-0644, (2011).
- [3] 陣内 亮典 (編集): "燃料電池の原理と応用 (自動車工学シリーズ 5)" , (2023).