

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820109

研究課題名(和文) 固体高分子形燃料電池用インテリジェントパワーコンバータの開発

研究課題名(英文) Development of an Intelligent Power Converter for Polymer Exchange Membrane Fuel Cells

研究代表者

片山 昇 (Katayama, Noboru)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：00609373

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)：固体高分子形燃料電池(PEMFC)に電気二重層キャパシタ(EDLC)を組み合わせることにより、PEMFCの長寿命化と高い応答性が実現されるが、これらの負荷配分が課題となる。すなわちPEMFCの顕著な劣化を引き起こす負荷変動を抑えつつ、EDLCのSoC(State of Charge)を定格の範囲内に収める必要がある。本研究ではこのようなエネルギーマネジメントを実現可能なパワーコンバータを開発するために、まず数値モデルを用いてPEMFCの負荷変動条件と劣化速度の関係を推定し、これらよりPEMFCが劣化しやすい負荷変動を避けつつ、EDLCのSoCを定格内に収めるような制御手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：The combination of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) and electric double layer capacitors (EDLCs) allows high durability of PEMFCs. However, the load balance between these two devices is a critical issue. Load fluctuations that will damage the PEMFC is required to be reduced and the state of charge of the EDLCs has to be limited within the rated value. In this study, we have first estimated the relationship between load fluctuation and degradation rate of PEMFCs using a numerical model that we developed, and have developed energy management strategy which reduces load fluctuation to the PEMFCs that will cause PEMFC degradation and limits state of charge of the EDLCs within the rated value.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：燃料電池 パワーコンバータ 電気二重層コンデンサ エネルギーマネジメント

1. 研究開始当初の背景

固体高分子形燃料電池(PEMFC)は現在自動車用や分散電源、携帯機器用電源など様々な応用が期待されており様々な研究がされている。新規材料の開発により年々出力は向上しているが、耐久性や応答性が不十分であり、二次電池を組み合わせて負荷変動を吸収することが効果的であるという考え方が、近年強まりつつある。国内で開発されている燃料電池車の一部はすでにリチウムイオン二次電池とのハイブリッド化が検討されているが、このような使い方ではリチウムイオン二次電池の充放電サイクルによる劣化が懸念される。他の二次電池の候補としては電気二重層キャパシタ(EDLC)が挙げられる。EDLCは充放電サイクルでの劣化が極めて少なく、出力密度はリチウムイオン二次電池よりも一桁大きく応答性も高いことから負荷変動の吸収や PEMFC のアシストとして最適であるといえる。我々は PEMFC に EDLC を組み合わせることにより、さらなる長寿命化の実現を狙っている。

PEMFC と EDLC のハイブリッド化を考えた場合にはこれらの電源への負荷配分、すなわちエネルギー管理が課題となる。エネルギー管理の要件としては PEMFC の顕著な劣化を引き起こす負荷変動を抑えるために動作点を適切に制御しながら、過不足分の電力は EDLC で供給しつつ、SoC (State of Charge) を定格の範囲内に収める必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記で述べたようなエネルギー管理を実現可能なパワーコンバータを開発することである。まず、PEMFC が顕著に劣化する負荷変動について明らかにすることが求められる。現在のところ、負荷の変動と PEMFC の劣化の関係についてはごく一部の条件下のみでしか明らかになっていない。しかしながら、様々な条件下における PEMFC の劣化速度を全て実験を用いて測定するのはパラメータが多すぎることや実験に時間がかかりすぎるため、現実的ではない。そこで本研究では数値モデルを用いて劣化速度を推定する。さらにこれらの結果より劣化しやすい PEMFC の負荷条件を明らかにし、PEMFC が劣化しやすい負荷変動を避けつつ、EDLC の SoC を定格内に収めるようなエネルギー管理手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) PEMFC の劣化速度を推定するための数値モデルの開発

エネルギー管理で PEMFC の負荷変動を低減し劣化抑制の効果を高めるため、どのような負荷変動が PEMFC の劣化に影響するか推定するための数値モデルを開発した。数値モデルは Darling[1][2]らによるものをベ-

スに PEMFC の断面方向 1 次元モデルを構築した。このモデルでは電位、電流、白金イオンおよび水素イオンの分布を考慮している。計算領域については図 1 に示す。水素及び酸素の拡散方程式、電子移動、マテリアルバランスを考慮した。白金溶解に関連する電気化学反応は下記の通りであり、それぞれ速度方程式をモデル中に組み入れた。

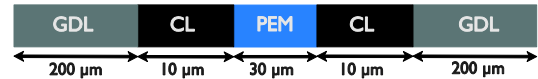
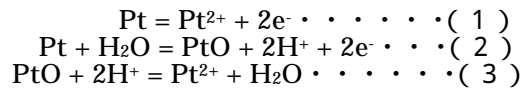


図 1 1次元モデルの計算領域



さらに、本研究では電解質中の水素イオンの物質移動を考慮した。

また、負荷変動の周波数と劣化速度の関係を広い周波数帯に対して得ることを検討した。これまで 0.5Hz 以下の数値シミュレーションと 1Hz~1KHz の実験値[3]が別々に報告されていたが、本研究ではこれらの周波数帯を包括的に扱える数値シミュレーションを開発した。これまでの数値シミュレーションでは高周波域において実験を正しく再現できていなかった。そこで、白金イオンの物質移動を簡易的に組み込むことにより、高周波域での実験と数値シミュレーションの一致を図った。

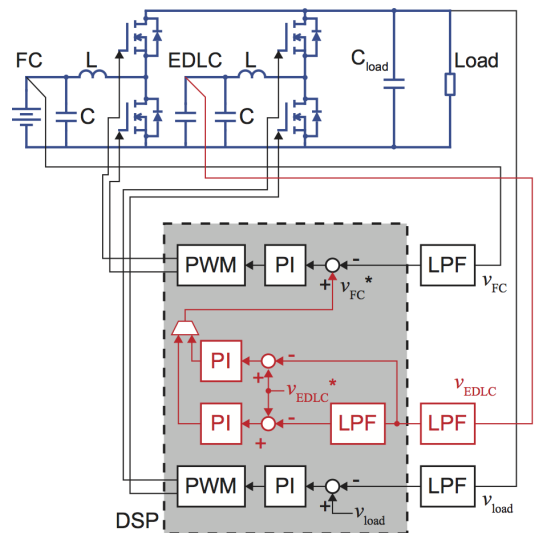


図 2 提案回路とエネルギー管理のブロック図

(2) PEMFC と EDLC のエネルギー管理の検討

PEMFC の負荷変動を低減しながら EDLC の SoC を定格の範囲内とするためのエネルギー管理方法を検討した。具体的には EDLC の電圧値にローパスフィルタを適用したも

のに対して PI 制御を適用することにより EDLC の SoC が 50% に徐々に近づくようにした (図 2)。数値シミュレーションを用いて、PI 制御のゲインやフィルタの定数を調節し、実機において動作実証を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) PEMFC の劣化速度を推定するための数値モデルの開発

図 3 に PEMFC 断面方向の電位分布を示す。セルの初期電圧は PEMFC の最大電力が得られる典型的な動作電圧である 0.5V に設定した。固相の電位はほぼ等電位を示しているが、電解質中の電位は分布をもっている。これは電解質中のイオン伝導度が固相中の電子伝導と比較して遅いためである。なお、このときの電流密度は  $2.1\text{A}/\text{cm}^2$  と計算されている。次に図 4 に過渡的な電位分布の変化を示す。0.1秒でセル電圧を 0.5V から典型的な開回路電圧である 0.9V に変化させた。この電圧は白金の平衡電位よりも高く、平衡状態では白金の溶解は起こらないが、電解質中の電位が遅れて反応するため、カソード電位は過渡的に 0.9V 以上になる。このことにより白金の溶解が進み、さらにはポテンシャルサイクルとオストワルド成長により白金触媒の表面積増大を引き起こす一因になると考えられる。

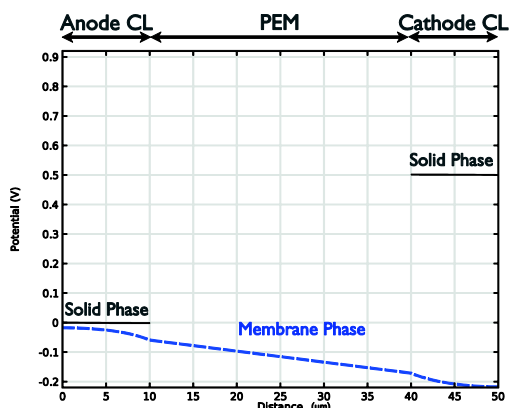


図 3 シミュレーション結果 (セル電圧が 0.5V の時の電位分布)

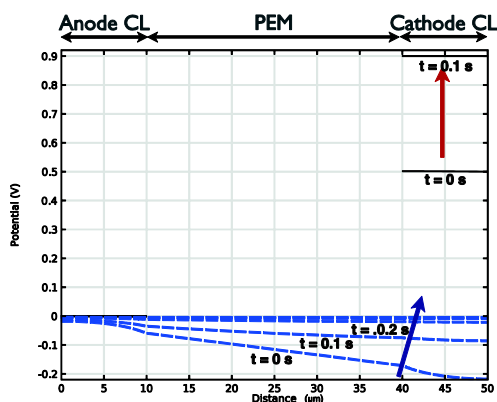


図 4 シミュレーション結果 (セル電圧を 0.5V から 0.9V に上昇させた時の電位分布の変化)

図 5 に PEMFC のポテンシャルサイクル周波数と白金表面積の関係を示す。0.1Hz から周波数が低下するにつれて劣化度が低下している一方で 1Hz から周波数が上昇するにつれて劣化度が低下しており、0.1~1Hz の間で PEMFC が顕著に低下することが示された。これらは一部の周波数帯で検討されたシミュレーション結果 [2] や実験結果 [3] と定性的にも一致しており、本シミュレーションを用いることで、PEMFC の様々な負荷変動における劣化度を見積もることができる。また、周波数領域で劣化が顕著に起こる条件を知ることができるため、古典制御で制御される PEMFC の EDLC のハイブリッド電源のエネルギー管理に活用することも可能となる。

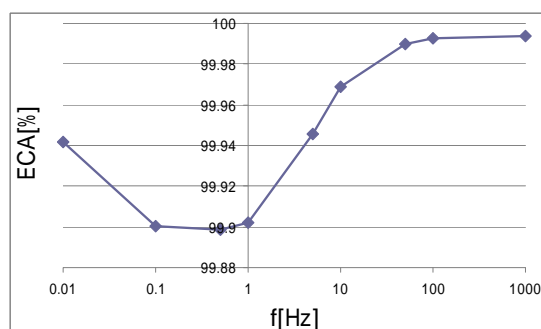


図 5 シミュレーション結果 (電位変動の周波数と白金表面積の関係)

##### (2) PEMFC と EDLC のエネルギー管理の検討

提案するエネルギー管理法を適用したシミュレーション結果を図 6 に実験結果を図 7 に示す。定格 20W の PEMFC スタック、56F/2.5V の EDLC を 5 直列とした。負荷電圧は 12V とし、0-2.0A の方形波状の負荷電流を時間 0 秒でデューティ比を切り替えて平均の負荷を変化させた。EDLC が負荷変動に応答しつつ、PEMFC の動作点を徐々に変化させながらも、EDLC の電圧すなわち SoC が徐々にある一定値の付近を保っていることが示された。

図 8 に本制御方法を 4.5kW の PEMFC スタックと 56F/180V の EDLC を用いた自動車に適用した場合のシミュレーション結果を示す。負荷は JC08 走行モードで走行した場合を想定している。提案手法により適切にエネルギー管理が行われていることが示された。

図 9 にはスマートフォンに適用した例を示す。予めスマートフォンでインターネット使用時の負荷波形を測定しておき、電子負荷で再現し、実機を動作させた時の電力分布と効率の変化を示す。

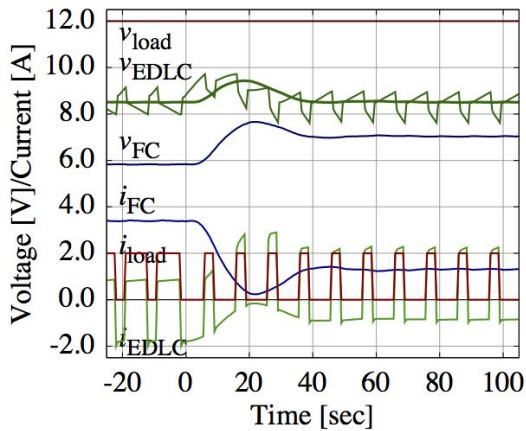


図6 提案するエネルギーマネジメント法を適用した時のシミュレーション結果

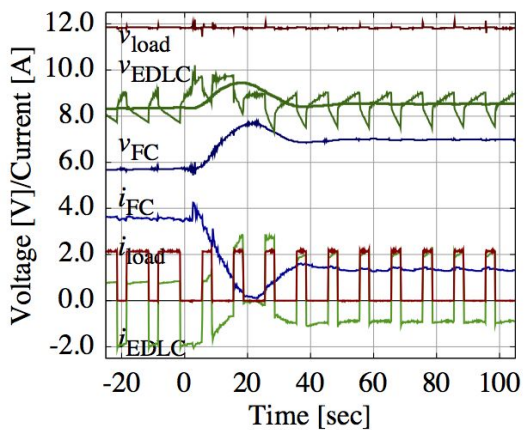


図7 提案するエネルギーマネジメント法を適用した時の実験結果

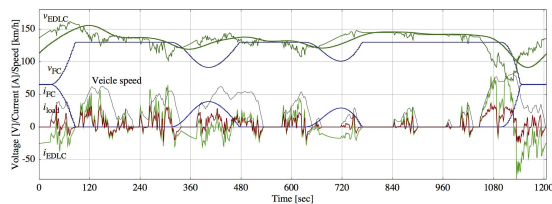


図8 提案するエネルギーマネジメント法を PEMFC/EDLC ハイブリッド自動車に適用した場合のシミュレーション結果

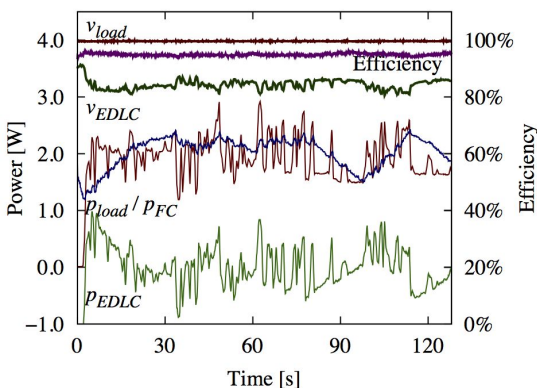


図9 提案するエネルギーマネジメント法をスマートフォン(インターネット使用時)に適用した場合の実験結果

<引用文献>

R. M. Darling and J. P. Meyers, J. Electrochem. Soc, 150, A1523-A1527 (2003).

R. M. Darling and J. P. Meyers, J. Electrochem. Soc, 152, A242-A247 (2005).

M. Uno and K. Tanaka, Journal of Power Sources, 196, 9884-9889 (2011).

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1件)

N. Katayama and S. Kogoshi, "Real-Time Electrochemical Impedance Diagnosis for Fuel Cells Using a DC-DC Converter," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 2, pp. 707-713, Apr. 2015. (査読有)  
DOI: 10.1109/TEC.2014.2376529

〔学会発表〕(計2件)

T. Yamanaka, S. Tosaka, N. Katayama, and S. Kogoshi, "Implementation of Energy Management Method Using IIR Filter to Fuel cell-Supercapacitor Hybrid Power Source System," The International Conference on Electrical Engineering 2014, Jeju, Korea, 2014, pp. 1494-1499.

T. Yamanaka, S. Tosaka, N. Katayama, and S. Kogoshi, "Energy Management Method Using the IIR Filter for PEMFC-supercapacitor Hybrid Power Source," The 2014 International Power Electronics Conference, 広島国際会議場, 2014, pp. 1227-1233.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.tus.ac.jp/katayama/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

片山 昇 (KATAYAMA, Noboru)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号: 00609373