自立型固体高分子燃料電池と電気二重層キャパシタを用いた 電動軽車両用ハイブリッドシステムのモデリング* (燃料電池等価回路モデルの適用)

今西啓之^{*1}, 吉井大智^{*2}, 中村拓司^{*3}
高田洋吾^{*4}, 脇坂知行^{*4}

Modeling of a Hybrid System for a Lightweight Electric Vehicle with Passive-type Polymer Electrolyte Fuel Cells and Electric Double-layer Capacitors (Application of a Fuel Cell Equivalent Circuit Model)

Hiroyuki IMANISHI, Taichi YOSHII, Takuji NAKAMURA,
Yogo TAKADA^{*5} and Tomoyuki WAKISAKA

^{*5} Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585 Japan

A simple series hybrid power system composed of passive-type polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) and electric double-layer capacitors was adapted to a lightweight electric vehicle. In order to numerically simulate the behavior of the hybrid system, a fuel cell equivalent circuit model was applied and the model parameters were determined using an electrochemical theory and experimental results. Including this PEFC equivalent circuit model, a simulation model of the power train system (PEFCs, capacitors, motor, power controller, inertia, etc) of a lightweight electric vehicle was composed. It has been confirmed that this simulation model can represent reasonably well the dynamic behavior and energy transmission of the system in the experiment on a fixed apparatus constructed as a model of the vehicle.

Key Words: Passive-type Polymer Electrolyte Fuel Cell, Electric Double-layer Capacitor, Hybrid System, Lightweight Electric Vehicle, Modeling, Electrochemical Theory

1. 緒言

高齢化社会の到来により、電動軽車両の需要が高まりつつある。電力源にバッテリーを用いている電動軽車両は、バッテリーのエネルギー密度が低い、一充電走行距離が短い、充電時間が長いなどの問題点がある。これらを解決する方法の一つが、高エネルギー密度・高効率で、かつ排出が水のみという環境に優しい水素を燃料とする固体高分子燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) を用いることである。しかし、車両が走行する際、急激な出力変化や、高出力への対応が必要のため、PEFC のみでは安定した電力を供給できなくなる可能性がある。そこで、蓄電装置として高パワー密度・高効率のキャパシタとハイブリッド化すれば、出力変化・高出力への対応が可能となる他、減速時に回生によるエネルギー回収を行うことができるのでシステム全体の効率向上を図ることも可能となる。

しかし、PEFC・キャパシタ・モータ間の電力供給方法についてそれぞれ特徴が大きく異なるため工夫する必要がある。

この電力供給に関して、著者らは独自の時分割方式 (TSM: Time Splitting Method) を考案した^①。この時分割方式は、PEFC でキャパシタを充電し、キャパシタからモータへ電力を供給するシリーズ方式にも、PEFC とキャパシタの両方からモータへ電力を供給するパラレル方式にも適用できる。本研究では、シリーズ方式をモデル化の対象とした。

電動軽車両に搭載する PEFC の出力や、キャパシタの容量の選定は容易ではなく、多くの試行錯誤が必要となる。したがって、各機器を種々組み合わせながら実験を試みるよりも、電動軽車両ハイブリッドシステムのモデリングを行い、シミュレーションによって検討する方が、PEFC・キャパシタの選定や、制御系設計が容易となる。

本研究では、自立型 PEFC と電気二重層キャパシタによりモータを駆動し走行する電動軽車両を対象とし、シリーズ方式でのハイブリッドシステムのモデリングを行い、定置型の電動軽車両実験装置で得た実験データと同定を行った。PEFC のモデルに関しては、

* 原稿受付 2004 年 10 月 19 日。

^{*1} 正員、大阪市立大学大学院工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)。

^{*2} 大阪市立大学工学部。

^{*3} 大阪市立大学大学院工学研究科。

^{*4} 正員、大阪市立大学大学院工学研究科。

E-mail: takada@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

単に PEFC の電流-電圧カーブを基にするのではなく、車両走行時の過渡応答にも対応するよう等価回路でモデル化し、さらに高精度化、一般性を持たせるため等価回路のパラメータは電気化学理論と PEFC の過渡特性測定結果から決定した。

なお、ハイブリッド電動軽車両モデル、時分割制御によるパワー制御に関しては、既報の論文⁹⁾で述べているので、必要最小限の記述とする。

表 1 に本報で使用した主な記号を記す。これ以外の記号は、その都度説明を加える。

2. ハイブリッド電動軽車両モデル

2.1 実験装置

本研究では、電動軽車両として、電動車椅子を想定した。実験装置は、図 1 に示すように、電力源である PEFC と電気二重層キャパシタ、駆動モータ、それらを制御するパワーコントロールユニット、フライホイール、発電機などの負荷部から構成される。

キャパシタは、最大使用電圧 2.3 V、静電容量 2000 F のものを 10 個直列に接続した。モータは、公称電圧 24 V、定格 250 W の 3 相交流永久磁石式同期モータを使用した。対象とした電動車椅子の全質量 110 kg（車両 30 kg+運転者 60 kg+最大積載量 20 kg）を、それと等価な慣性を有するフライホイールで表した。

ころがり抵抗などの走行負荷は、図 1 右端の発電機で模擬的に作り出すことができるが、本研究では、実験装置駆動軸に関わる摩擦のみを負荷とした。その摩擦抵抗は、実測結果によれば、式 (1) で表される。

$$T_l = 0.16v + 0.17 \quad (1)$$

PEFC、時分割方式を用いたパワーコントロールユニットに関しては後述する。

Table 1 Symbols

Symbol		Unit
C	Capacitor capacity	F
C_b	Capacitance of PEFC equivalent circuit	F
D_m	Motor duty ratio	-
D_f	PEFC duty ratio	-
E_c	Capacitor open circuit voltage	V
E_f	PEFC open circuit voltage per one unit	V
I_c	Capacitor current	A
I_f	PEFC current	A
I_m	Motor current	A
J_m	Moment of inertia	kgm ²
k_m	Motor torque constant	Nm / A
L_e	Inductance of PEFC-capacitor circuit	H
L_m	Motor inductance	H
P_m	Motor output	W
R_b	Reaction resistance of PEFC equivalent circuit	Ω
R_c	Capacitor internal resistance	Ω
R_f	Electrolyte resistance of PEFC equivalent circuit	Ω
R_m	Motor internal resistance	Ω
T_l	Load torque	Nm
T_m	Motor torque	Nm
t_{off}	Time per one control cycle	s
$t_{f(on)}$	PEFC ON time per one cycle	s
$t_{m(on)}$	Motor ON time per one cycle	s
$t_{m(off)}$	Motor OFF time per one cycle	s
V_c	Capacitor voltage	V
V_f	PEFC voltage per one unit	V
V_m	Motor voltage	V
v	Vehicle speed	km / h
α_f	Charge duty ratio	-
ω	Motor angular velocity	rad / s

Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 PEFC

PEFC は、水素を燃料とする市販の自立型 PEFC ユニット (大同メタル工業製 PFC1212, 定格電圧 12 V, 定格出力 12 W) を 2 個直列で使用した。

自立型 PEFC は、補器類 (空気ポンプ, 加湿器, 燃料・空気の流量制御器, 温度制御器など) が不要なため, 要求出力が比較的小さく, 搭載スペースが限られる用途には有望である。この PEFC では, 水素容器より 0.17 MPa に減圧された水素をセルの中心部へ送り, 空気をスタック外周より大気から取り入れ, 発電により生じた水分により加湿を行い, 常温下で発電する。本 PEFC の単セルの構造を図 2 に示す。全体として 20 セルを直列に積層している。

Fig. 2 Structure of a single cell of the passive-type PEFC unit

2.3 時分割方式によるパワー制御

時分割方式とは, 自立型 PEFC およびキャパシタの出力の応答性が良いという特長を活かし, それらの電力源とモータ間の電力供給を, 極めて容易にかつ安価な回路で制御できる方法である⁹⁾。本研究で対象としたシリーズ方式の時分割方式では, キャパシタによってモータが駆動され, PEFC はオンサイト発電器としてキャパシタを充電する。そして, パルス幅変調 1 周期 ($t_{all} = 84 \mu\text{sec}$) のうち, キャパシタがモータを駆動する期間 (モータデューティ比 D_m) 以外の期間 (PEFC デューティ D_f) に, PEFC がキャパシタを充電する。

図 3 にシリーズ方式の時分割方式による PEFC・キャパシタ・モータ間の電力供給制御の概念を示す。式 (2) はモータデューティ比であり, パルス幅変調 1 周期のうちキャパシタがモータを駆動する比率で, 図 3 中の FET 1 で制御する。式 (3) は PEFC デューティであり, 式 (2) の反転回路に, 式 (4) に示す α_f (キャパシタの充電必要量と PEFC の供給能力によって決める係数) を掛けたもので, 図 3 中の FET 2 で制御する。

$$D_m = \frac{t_{m(on)}}{t_{all}} \quad (2)$$

$$D_f = \frac{t_{f(on)}}{t_{all}} = \alpha_f (1 - D_m) \quad (3)$$

$$\alpha_f = \frac{t_{f(on)}}{t_{m(off)}} \quad (0 \leq \alpha_f \leq 1) \quad (4)$$

Fig. 3 Control of electric current between the PEFCs, capacitors and a motor by TSM

3. PEFC のモデリング

ここでは, 次章のハイブリッド系全体のモデリングに適用する PEFC モデルについて述べる。本研究では, PEFC モデルを等価回路で表現し, そのパラメータを電気化学理論と実験による PEFC の過渡特性から求めた。

3.1 PEFC 等価回路

本研究では, 単セルが $n = 20$ 個直列に接続された PEFC ユニットの 2 個直列に接続して使用しており, その 1 ユニットの等価回路を, 図 4 に示す起電力 E_f の直流電源, 容量 C_b のキャパシタ, 反応抵抗 R_b および電解質抵抗 (膜抵抗+各種接触抵抗) R_f で表現した⁹⁾。PEFC 等価回路のインピーダンス $|Z_f|$ は, 周波数を f とすると式 (5) で表される。なお, 回路内の R_{ex} は外部負荷抵抗である。

$$|Z_f| = \sqrt{R_f^2 + \frac{R_b^2 + 2R_b R_f}{1 + 4\pi^2 f^2 C_b^2 R_b^2}} \quad (5)$$

Fig. 4 Equivalent circuit of a PEFC unit

3.2 電気化学理論による回路パラメータ決定

上記の PEFC 等価回路内のパラメータ (R_b , R_f) を決定するにあたり, それらパラメータに一般性を持たせるため, 電気化学理論を用いた⁹⁾.

PEFC 端子間電圧 V_f は式 (6) によって得られる。ただし, 1 ユニットのセル数を n とする。また, a_{O_2} , a_{H_2} , a_{H_2O} を酸素, 水素, 水蒸気の活量とすると, 1 セルの開回路電圧 $e_f (= E_f / n)$ は, Nernst の式より導いた式 (7), (8) で求まる。また, アノードおよびカソードの活性化過電圧 η_a , η_c は式 (9), (10) から求まる。

$$V_f = n(e_f - \eta_a - \eta_c) - R_f I_f \quad (6)$$

$$e_f = E_f / n = e_{f0} - \frac{RT}{zF} \ln \beta \quad (7)$$

$$\beta = \frac{a_{H_2O}}{\sqrt{a_{O_2} a_{H_2}}} \quad (8)$$

$$\eta_a = \frac{RT}{\alpha zF} \left\{ \ln \frac{I_f / S}{i_{ea}} - \ln \left(1 - \frac{I_f / S}{i_{la}} \right) \right\} \quad (9)$$

$$\eta_c = -\frac{RT}{(1-\alpha)zF} \left\{ \ln \frac{I_f / S}{i_{ec}} - \ln \left(1 - \frac{I_f / S}{i_{lc}} \right) \right\} \quad (10)$$

式 (7) から式 (10) を式 (6) に代入し, 式中の各パラメータの値として, 表 2 の物理定数と表 3 の PEFC の定数を用いると, $I_f - V_f$ 曲線は図 5 (a) 中の実線となった。なお, 表 3 中の R_f および i_{ea} , i_{ec} , i_{la} , i_{lc} , β に関しては, 実験により各電流に対して測定した V_f の値 (図中, 破線□印) と一致するように, 試行錯誤の上, 設定した。

ここで, 直流時 ($f = 0$) のインピーダンスは, 式 (5) と式 (6) から式 (11) のように表すことができる。その結果, $I_f - |Z_f|$ 曲線は図 5 (b) 中の実線となった。一方, 同条件での実験による測定結果は, 破線□印のようになった。

$$\begin{aligned} |Z_{f(f=0)}| &= R_f + R_b \\ &= \frac{E_f - V_f}{I_f} = \frac{n(\eta_a + \eta_c)}{I_f} + R_f \quad (11) \end{aligned}$$

電気化学理論に基づく V_f および $|Z_f|$ と, 実験から得られた結果とは, 電流の大きい場合を除いて, 良く一致していることが判る。電流が大きい場合の不一致には, 拡散分極やフラッディング, セル温度変化など

を考慮しなかったために, 生じたものであろうと考えている。

したがって, 直流時の反応抵抗 R_b は, 式 (11) を変形し, 式 (12) となる。

$$R_b = \frac{n(\eta_a + \eta_c)}{I_f} \quad (12)$$

Table 2 Physical constants

Symbol		Constant	Unit
F	Faraday constant	9.65×10^4	C/mol
R	Gas constant	8.31	J/Kmol
z	Number of electrons	2	-

Table 3 Symbols and constants in the PEFC electrochemical model

Symbol		Constant	Unit
e_{f0}	Standard open circuit voltage	1.23	V
i_{ea}	Exchange current density of anode	1.25×10^{-3}	A/m ²
i_{ec}	Exchange current density of cathode	2.0×10^{-3}	A/m ²
i_{la}	Limit current density of anode	0.137×10^4	A/m ²
i_{lc}	Limit current density of cathode	0.2×10^4	A/m ²
n	Number of cells in a PEFC unit	20	-
R_f	Electrolyte resistance	2.65	Ω
S	Effective area of reaction	13.0×10^{-4}	m ²
T	Operation temperature	298	K
α	Transmission coefficient	0.5	-
β	Activity ratio	1.34×10^{13}	-

Fig. 5 Comparison of calculated and measured results on the characteristics of the PEFC unit

3.3 PEFC の過渡特性による回路パラメータ決定

図 4 のキャパシタ成分 C_b に関しては, 実験において PEFC の回路を開回路から閉回路 (外部負荷は抵

抗)に瞬時に切替えた時の、 V_b 部分の電氣的時定数 τ_b の値を求め、式 (13) から C_b を決定した。なお、 R_f に関しては前節で求めた定数 (265 Ω) を用いた。また R_b に関しては、前節の式 (12) および図 5 において、過小電流および過大電流領域を除いてほぼ一定とみなせるため、定数 (0.5 Ω) と仮定した。

$$\tau_b = \frac{R_f + R_{ex}}{R_b + R_f + R_{ex}} C_b R_b \quad (13)$$

図 6 に、外部負荷抵抗 $R_{ex}=10 \Omega$ の条件での電圧 V_f の時間挙動の測定結果を示す。 V_b 部分の電氣的時定数 τ_b は、16.0 msec と求まり、式 (13) に $\tau_b=16.0$ msec, $R_f=265 \Omega$, $R_b=0.5 \Omega$ を代入すると、 $C_b=33.3$ mF となった。

次章で述べるハイブリッドシステム全体のモデリングにおいて、PEFC に関しては、ここで求めた定数を用いることにする。

Fig. 6 Step response of PEFC voltage ($R_{ex}=10 \Omega$)

4. ハイブリッドシステム全体のモデリング

4.1 電動軽車両ハイブリッドシステムのモデル

PEFC・キャパシタ・モータおよび負荷系の全てを

考慮した電動軽車両ハイブリッドシステムのモデルを作成した。

PEFC については、前章の等価回路、パラメータを基に 1 ユニットの式 (14) のように表現した。

また、PEFC・キャパシタ間の回路は、回路内のインダクタンス (L_e)、キャパシタの内部抵抗 (R_c) も考慮し、式 (15)、(16) で表した。

キャパシタ・モータ間は、モータが 120 度通電方式で駆動する際に、モータ角度 θ によって変化する関数を Z とすると、式 (17)、(18) のように表すことができる。最後に、車両の運動方程式は、式 (19) に示すとおりである。

また車速 v は、車輪径、ギア比などを考慮した定数を k とすると、 $v=k\omega$ と表され、モータトルク T_m はトルク定数を k_m とすると、 $T_m=k_m I_m Z(\theta)$ と表される⁴⁾。負荷トルク T_l は式 (1) に示す速度 v による線形関数である。

$$C_b \frac{dV_b}{dt} = I_f - \frac{V_b}{R_b} \quad (14)$$

$$L_e \frac{dI_f}{dt} = -\{E_c + I_f R_c - 2(E_f - V_b - I_f R_f)\} \quad (15)$$

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{I_f}{C} \quad (16)$$

$$L_m \frac{dI_m}{dt} = (E_c - I_m R_c) - I_m R_m - k_m \omega Z(\theta) \quad (17)$$

$$\frac{dE_c}{dt} = -\frac{I_m}{C} \quad (18)$$

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = T_m(I_m, \theta) - T_l(v) \quad (19)$$

式 (14) から式 (19) を基に作成したハイブリ

Fig. 7 Block diagram of the hybrid system

ドシステムのブロック線図を図7に示す。

入力は、2.3節の時分割方式によるパワー制御におけるモータデューティ比 D_m であり、この値から、PEFC・キャパシタ間が繋がっているのか、もしくはキャパシタ・モータ間が繋がっているのかを判断するための b の値(0または1)を求め、0を掛けて遮断、1を掛けて通電となるように計算する。つまり、1周期におけるモータデューティの期間($D_m t_{all}$)は、モータ・キャパシタ間が通電となるよう $b=1$ とし、それ以外の期間($(1-D_m)t_{all}$)は、PEFC・キャパシタ間が通電となるよう $b=0$ とする。それを通電状態に関係する数式(式(16)、式(17)右辺第一項、式(18))から導かれるブロック線図の係数として、図7中の b に入力する。

4.2 同定結果

前節で述べたブロック線図に基づき、シミュレーションを行った。シミュレーションは、Kayo-Hisae公式による4段7次の陰的ルンゲクッタ法で行った。図8、9にシミュレーション結果と、同条件での実験との比較を示す。図8は、初期速度を5 km/hとして、モータデューティ比 D_m をステップ状に上げた条件(初期 $D_m=0.4$ 、計測開始20秒後 $D_m=0.6$ 、開始40

Fig. 8 Identification result (Step-wise increase of D_m)

秒後 $D_m=0.8$)の結果、図9は、初期速度を8 km/hとして、 D_m をステップ状に下げた条件(初期 $D_m=0.8$ 、計測開始20秒後 $D_m=0.6$ 、開始40秒後 $D_m=0.4$)の結果である。なお、両実験とも $D_f=1-D_m$ である。作成したシミュレーションモデルは、実験での各特性変数の挙動と良く一致していることを確認した。また、その他の条件においても良好に一致することを確認した。

Fig. 9 Identification result (Step-wise decrease of D_m)

5. 結 言

電気化学理論と実験によるPEFCの過渡特性測定結果に基づいて、自立型PEFCの等価回路モデルを作成した。そして、そのモデルを含めた電動軽車両ハイブリッドシステム全体のモデリングを行い、電動軽車両の過渡応答のシミュレーション結果と実験結果が良く一致することを確認した。

このモデルはPEFC・キャパシタの選定や、制御系の設計に役立つものと考えられる。

謝 辞

本研究費の一部は、科学研究費(基盤研究(C)(2)15560188)の援助を受けた。記して謝辞を表す。

参考文献

- (1) Imanishi, H., Nakamura, T., Takada, Y. and Wakisaka, T., Fundamental Study on a Hybrid Power System of Passive-type Polymer Electrolyte Fuel Cells and Capacitors, J. Asian Electric Vehicles, 1-2 (2003), 463-470.
 - (2) 神谷信行, 梅田実, 超小型燃料電池の開発と今後の展望, (2003), 211, シーエムシー出版
 - (3) 増子昇, 高橋正雄, 電気化学, (1996), 21-70, アグネ技術センター
 - (4) 見城尚志, 永守重信, 新・ブラシレスモータ, (2002), 134-137, 総合電子出版
-