

燃料電池ハイブリッド鉄道車両の制御と電源容量の検討

瀧澤 建治* 近藤 圭一郎 (千葉大学)

Study on a control and a designing method of the power source specifications for fuel cells hybrid railway vehicles.

Kenji Takizawa*, Keiichiro Kondo, (Chiba University)

A hybrid railway traction system with fuel cells (FCs) and electro double layer capacitors (EDLCs) are discussed in this paper, which can save FCs power and absorb the regenerative energy. A novel control method of the FCs power to save its output power fluctuations. A designing method of the FC power and EDLCs capacitance for a hybrid railway vehicle is also presented under a train load profile. The designing results with the proposed control method are verified by numerical simulations of the train running as a local train and an express train.

キーワード：燃料電池，電気二重層キャパシタ，鉄道車両，ハイブリッドシステム，制御法，設計法

(Keywords, fuel cell, electro double layer capacitor, railway vehicle, hybrid system, control method, designing method)

1. はじめに

非電化区間で用いられるディーゼル車は，振動，騒音の発生や回生ブレーキが適用できないという問題がある⁽¹⁾。これに対して，燃料電池(Fuel Cell: FC)の適用が検討されている⁽²⁾⁽³⁾。FCは排出ガスがなく可動部分が少ないという利点がある一方で，電力回生が実用的には困難であることや，現時点では150万円/kW程度⁽⁴⁾とコストが高いなどの欠点がある。このような課題に対して，FCと蓄電媒体をハイブリッド化することでFC搭載量低減によるコスト低減と，回生電力吸収による省エネルギー化が検討されている⁽²⁾⁽³⁾。蓄電媒体としては，サイクル寿命が長く，パワー密度の高い電気二重層キャパシタ(Electro Double Layer Capacitor: EDLC)を用いることが提案されている⁽⁵⁾。また，文献(6)や文献(7)では，FCおよびEDLCの容量決定法が提案されている。本論文では，これまでの検討⁽⁵⁾⁽⁷⁾をベースに，寿命低下につながるFC出力の急変を低減し，EDLCの利用度を従来方式よりも向上できる制御法を提案する。提案方式は数値シミュレーションにより評価を行う。その結果に関する考察を通じて，FCと蓄電媒体のハイブリッド車両の容量設計とエネルギーマネジメントの考え方について明らかにする。

2. 前提条件

今回の検討では，車両性能は図1（起動加速度2.0km/h/s）で，主回路構成は図2に示すような1両編成を想定した。同図は，FCおよびEDLCそれぞれにDC/DCチョップパを接続する回路である。この構成ではインバータ入力電圧を一般の直流電気車相当のDC1.5kVに昇圧が可能である。また，回生性能と力行性能は同一特性であるとして検討を実施した。

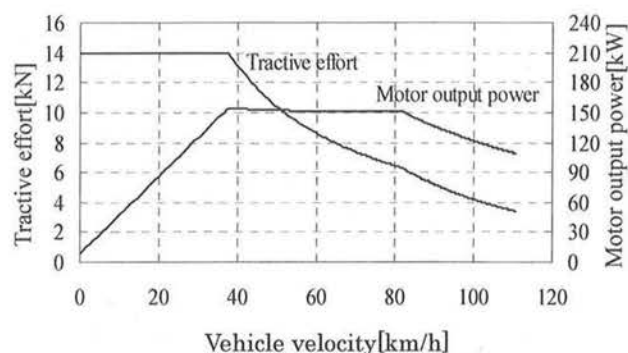


図1 1モータあたりの車両性能

Fig. 1. Vehicle traction performance (per a traction motor).

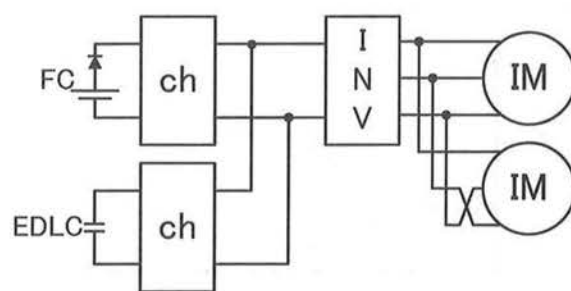


図2 主回路構成

Fig. 2. Traction circuit diagram of the FC and the EDLC hybrid railway vehicles.

3. 電源容量決定方法

〈3・1〉 FC と EDLC の制御方法 制御の基本的な考え方は、EDLC のエネルギー E_c と車両の運動エネルギー E_v の和を一定に保つべく、車両走行に伴う損失を FC により供給する。

FC と、エネルギー密度が高いバッテリーを用いるハイブリッドの場合は、フィードフォワード制御を用いている⁽⁸⁾。しかし、FC と EDLC とのハイブリッドの場合は EDLC のエネルギーマネジメントをより厳密に行う必要がある。そのため、EDLC の電圧指令値と実際値の偏差をフィードバックして FC 出力を補正する方法が望ましいと考えられる。

FC の出力調整は、EDLC 電圧指令値 V_{ref} と走行中の EDLC 電圧 V_c の偏差 $\Delta V_c = V_{ref} - V_c$ を小さくするように行うのが望ましい。FC の出力は限られるため、 V_{ref} は(1)式に損失を考慮した(2)式をベースとする。

$$E_c = \frac{1}{2} C V_{c0}^2 - \frac{1}{2} M_t V_t^2 \quad (1)$$

$$E_{ref} = \frac{1}{2} C V_{c0}^2 - \frac{1}{2} M_t V_t^2 + E_B \left(\frac{V_t}{V_{max}} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 C は静電容量、 V_{c0} は EDLC 初期電圧、 M_t は車両総質量、 V_t は車両速度である。考慮する損失エネルギーは計算が比較的容易な運転最高速度からの機械ブレーキによるエネルギー E_B で代表させることとする。(2)式では、 E_B に速度の補正項として最高運転速度と速度の二乗比を乗じる。(2)式で EDLC の蓄積すべきエネルギーの指令値 $E_{ref} = 1/2 C V_{ref}^2$ の関係より、電圧指令値 V_{ref} は(3)式ようになる。

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{2}{C} \left(\frac{1}{2} C V_{c0}^2 - \frac{1}{2} M_t V_t^2 + E_B \left(\frac{V_t}{V_{max}} \right)^2 \right)} \quad (3)$$

FC 出力はこれまで不連続に変化させていたが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、今回は図 3 に示すように 2 つのモード間で連続的に変化させ、FC 出力急変を防止する方法を提案する。これにより、FC の長寿命化を図ることができる。

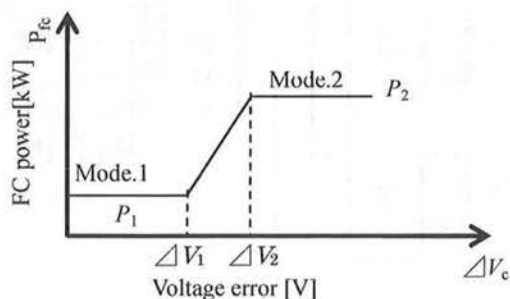


図 3 EDLC 電圧偏差による FC 出力制御方法

Fig. 3. A feedback control rule of EDLC voltage.

〈3・2〉 FC 出力の決定法⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 以上で述べた制御法を前提に FC 出力 P_1 , P_2 , すなわち搭載する FC の最高出力を決定する。

P_1 は走行によって消費されるエネルギーを 1 駅間で供給

表 1 FC 最小出力の設計結果

Table 1. Designing results of the FC Min.power.

Max. Speed [km/h]	Kinetic Energy, E_p [kWh]	Regenerative Energy, E_R [kWh]	Mech. Brake Loss, E_L [kWh]	Running time, T_1 [sec]	Min. FC power P_1 [kW]
70	2.36	1.87	0.49	77	23.1
80	3.09	2.24	0.85	92	33.3
90	3.91	2.37	1.54	108	51.0
100	4.82	2.49	2.33	128	65.6
110	5.84	2.59	3.24	151	77.1

表 2 FC 最大出力の設計結果

Table 2. Designing results of the FC Max.power.

Max. Speed [km/h]	Running resistance [N]	Power of running resistance, P_B [kW]	Max. FC power P_2 [kW]
70	2835	55.1	78.2
80	3355	74.6	107.9
90	3930	98.3	149.2
100	4560	126.7	192.3
110	5246	160.3	237.4

するエネルギーとする。 P_1 は力行エネルギー E_p と回生エネルギー E_R の差の 1 駅間の走行時間で除したものとし、表 1 に各最高速度における P_1 の値を示す。

FC の最大出力 P_2 は表 2 に示すように、定速走行に必要な最高運転速度時の走行抵抗から決まる出力 P_B と P_1 の和とする。

〈3・3〉 EDLC 容量の決定法⁽⁶⁾⁽⁷⁾ EDLC 初期電圧を V_{c0} 、容量を C とすると(4)式が成り立つ。左辺は EDLC が最高速度到達までの間に供給すべきエネルギーを、右辺は EDLC が放出したエネルギーをそれぞれ表している。 V_{c0} は、現在製品化されている EDLC の耐電圧を考慮して 600V とする。

$$E_v - E_{fc} = \frac{1}{2} C V_{c0}^2 - \frac{1}{2} C V_{cmin}^2 \quad (4)$$

(4)式の右辺第 2 項の V_{cmin} は(5)式のように求められる。ここで P_{inv} は最高運転速度でインバータ出力 (最大値は 2 個モータ分の 320kW)、 P_1 は表 1 に示した FC の最低出力である。また、 I_{cmax} は DC/DC チョップパの IGBT の電流制限(しゃ断電流 1.2kA の素子を 2 並列で用いることを前提としている)から決まる EDLC の電流制限値 (概ね 1200A) である。

$$V_{cmin} = \frac{(P_{inv} - P_1)}{I_{cmax}} \quad (5)$$

また、FC の供給したエネルギー E_{fc} は、FC がその最低出力である P_1 を最高速度到達までの力行時間 T_p の間出力したものととして(6)式のように求める。

$$E_{fc} = P_1 T_p \quad (6)$$

式(5)および式(6)を式(4)に代入すると、(7)式を得る。

$$C = \frac{2(E_v - E_{fc})}{(V_{c0}^2 - V_{cmin}^2)} \quad (7)$$

以上の手順により求めた C の値を表 3 に示す。

表 3 EDLC 容量の設計結果

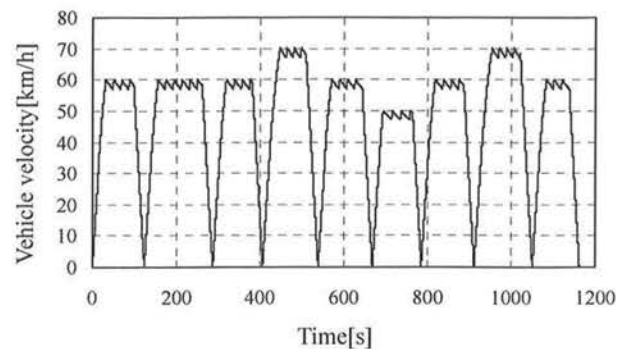
Table 3. Designing results of the EDLC capacitance.

Max. Speed [km/h]	Kinetic Energy E_v [kWh]	Time for acceleration T_p [sec]	Min.FC power P_1 [kW]	Capacitance of EDLCs C [F]
70	2.36	42	23.1	50
80	3.91	52	33.3	60
90	3.91	64	51.0	68
100	4.82	78	65.6	76
110	5.84	96	77.1	83

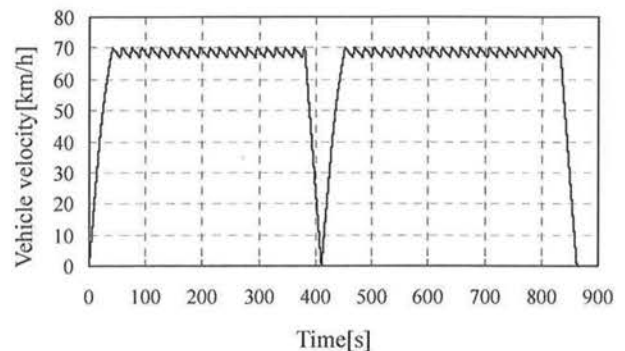
4. 走行シミュレーションによる評価

〈4・1〉シミュレーション条件 図 4 に示すようなパターンで平坦路線を走行した場合の走行シミュレーションを行なった。車両の走行パターンは設計で想定した各駅停車運転と、設計条件と異なる負荷パターンとして快速運転についても想定した。今回の走行シミュレーションでは最高速度が 70km/h であることから、電源の仕様は表 1~3 に示す値を基本とするが、EDLC は初期電圧 600V、容量は EDLC の下限電圧値より大きい値に抑えるために 50F に 5%程度の余裕を持たせた 53F を、FC 出力は表 1、表 2 の値を切り上げて、 $P_1=25kW$ 、 $P_2=80kW$ としている。また補助電源分は今回の検討では考慮しない。さらに各機器の効率として、DC/DC チョップ 0.98、インバータ 0.97、誘導電動機効率 0.92 を想定した。また、EDLC 電圧の制御パターンの図 3 における、 ΔV_1 および ΔV_2 はそれぞれ 0V および 10V とした。

〈4・2〉シミュレーション結果 図 5 は各駅停車運転でのシミュレーション結果である。図 5(a)より EDLC 電圧 V_c は指令値 V_{ref} に概ね追従しながら FC のパワーをアシストしていることが、図 5(b)からは、FC 出力が最大出力に達しかつ連続的に変化していることが、それぞれわかる。図 6 に関しても同様な結果となっている。また、従来の FC 出力を不連続に制御する方式⁽⁷⁾では、EDLC は車両停止前に満充電となっていたが、本検討の結果では解消されている。



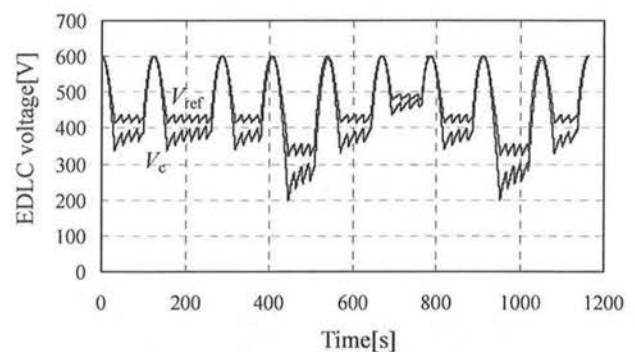
(a) Running curve(local).



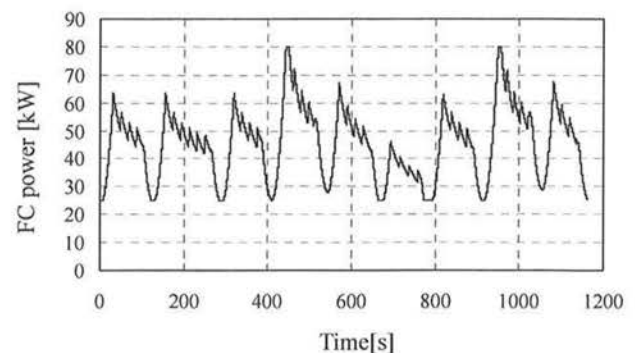
(b) Running curve(express).

図 4 シミュレーションでの走行パターン

Fig. 4. Running pattern for simulations.



(a) EDLCs voltage and its reference.



(b) FCs power.

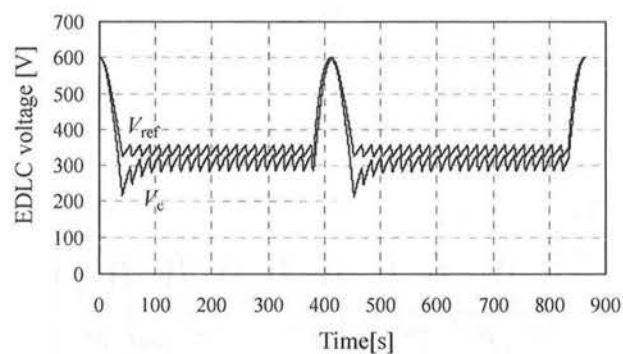
図 5 各駅停車運転のシミュレーション結果

Fig. 5. Simulation results of the local train.

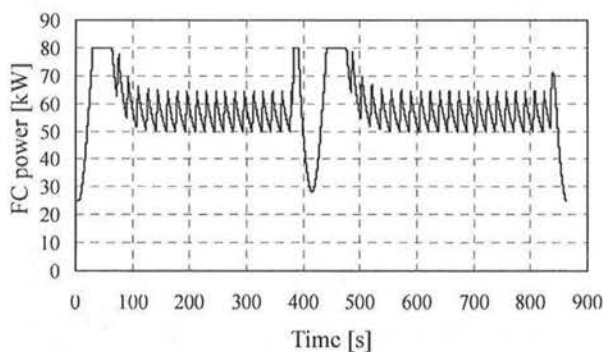
〈4・3〉シミュレーション結果に関する考察 4 章の走行シミュレーションにおける, FC の出力エネルギーおよびそれを運転時間で除した平均出力を表 4 に, EDLC 最低電圧でのエネルギーの割合(利用率)を表 5 にそれぞれ示す。これらより, FC 出力および EDLC 容量について以下のようなことが言える。

- ・ FC 出力の平均出力と最大出力の差は, EDLC が加速時に必要なパワーをアシストした分を, 充電するパワーとして必要な分である(FC 出力必要条件)。
- ・ FC 出力は最大値まで活用されている(FC 出力十分条件)。
- ・ EDLC エネルギー利用率は十分高く, 電流制限から決まる下限値まで利用されている(EDLC 容量必要条件)。
- ・ 回生電力は全て吸収できている(EDLC 容量十分条件)。

以上から, 提案した制御方法は, 前提として EDLC 容量や FC 出力が適切に設計されていれば, 提案手法に基づいて FC や EDLC を適切に動作させ得ることがわかる。



(a) EDLCs voltage and its reference.



(b) FCs power.

図 6 快速運転のシミュレーション結果
Fig. 6. Simulation results of the express train.

表 4 各走行における FC の利用率

Table 4. Evaluation of the FC availability.

Conditions	FC output energy [kWh]	Running Time [sec]	FC average power [kW]	Availability of FC [%]
Local	14.65	1162	45.4	56.8
Express	13.84	863	57.7	72.2

表 5 各走行における EDLC の利用率

Table 5. Evaluation of the EDLC availability

Conditions	Min. EDLC voltage [V]	Availability of EDLC energy [%]
Local	199	89.0
Express	213	87.4

5. おわりに

以上, FC 出力を連続的に制御し, EDLC 蓄積エネルギーを運動エネルギーの和を一定に保つ制御法を提案し, 数値シミュレーションによりその結果を検証した。このことから, 鉄道車両におけるハイブリッドシステムは運動エネルギーとエネルギー蓄積要素のエネルギーを交換することで, 走行に伴うエネルギー消費を最小化, すなわち, 回生エネルギーを最大化することが可能であることがわかる。これにより, 非電化区間でも消費エネルギーを最小化できる。また, 提案方式によって FC のコストを低減すること, さらに FC の急激な出力変化を緩和し, 長寿命化することも可能であることがわかった。

文 献

- (1) R.Furuta, J.Kawasaki, K.Kondo, "Hybrid Traction Technologies with Energy Storage Devices for Non-Electrified Railway Lines", IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 5, Issue 3, pp.291-297, (2010.5)
- (2) R.Furuta, J.Kawasaki: "Development of fuel cell hybrid railcar", The 2008 Annual Meeting I.E.E. Japan, Vol.7, 7-S8 (5)-(8) (2008.3) (in Japanese)
- (3) K.Ogawa, T.Yamamoto, et al.: "The development of test railway vehicle powered by fuel cells and lithium-ion battery", The 2009 Japan Industry Applications Society Conference, I.E.E.Japan, JIASC 2009, 3-63, (2009.9) (in Japanese)
- (4) T.Yamamoto, H.Hasegawa, T.Furuya, K.Ogawa: "The outline of the fuel cells and battery hybrid test train", RRR, Vol.66, No.3, pp.2-5, (2009.3)
- (5) K.Takizawa, K.Kondo, "Study on the traction circuit configurations for the Fuel Cell and the EDLC hybrid traction systems", Proceedings of the Technical Meetings of Transportation and Electric Railways, TER-09-58, pp.5-10, (2009.10)
- (6) K.Takizawa, K.Kondo, "Study on a method to design the power source specifications for fuel cells hybrid railway vehicles". Proceedings of the Technical Meeting of Vehicle Technology, VT-10-11, pp.11-16, (2010.8)
- (7) K.Takizawa, K.Kondo, "A Designing Method of the Power Source Specifications for Hybrid Powered Traction Systems with Fuel Cells and EDLCs", International Conference on Electric Machine and Systems 2010, (ICEMS2010), NGV-05, (2010.10)
- (8) M.Nakagami, R.Furuta, M.Shimada, T.Kaneko, E.Toyota, "Energy Management of The Fuel Cell Hybrid Traction System for Railcars", The 2007 Japan Industry Applications Society Conference, I.E.E.Japan, JIASC 2007, 3-34, (2007.8) (in Japanese)