

燃料電池-リチウムイオン電池ハイブリッド鉄道車両の 負荷特性に基づいた燃料電池と蓄電池の容量決定法

学生員 松永 夏奈, 学生員 神藤 駿介, 上級会員 近藤 圭一郎 (早稲田大学)

Method to Determine Fuel Cell and Battery Capacity from the Loss Energy Characteristics of Lithium-Ion Battery Capacity for Fuel Cell Hybrid Railway Vehicles for Non-electrified Lines

Kana Matsunaga, Shunsuke Jindo, Keiichiro Kondo, (Waseda University)

In the Fuel Cell (FC) and lithium-ion battery (LiB) hybrid railway traction system, the relationship between load profile and FC power and LiB energy capacity has not been revealed. This paper proposes a method to determine the installed FC power and LiB energy capacity from the loss energy characteristics according to the line profile.

キーワード: ハイブリッド鉄道車両, 燃料電池, リチウムイオン二次電池, 走行条件

Keywords, hybrid powered railway vehicle, fuel cell, Lithium-ion battery, running condition,

1. はじめに

鉄道輸送の非電化区間では液体式ディーゼル車に変わり, より環境負荷の小さい燃料電池 (Fuel Cell: FC) ハイブリッド車⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が注目されている。しかし FC の課題としてコストと搭載スペースが挙げられる。そのため, FC 出力容量を抑える設計法として充放電サイクルを全運転サイクルとしその間の損失を補填するように FC 出力を決定する方法が提案されている⁽⁴⁾。

このようにコストや搭載スペースを意識した設計において求められる必要な FC 出力・リチウムイオン電池 (Lithium-ion Battery: LiB) エネルギー容量は, その適用路線の負荷条件, すなわち駅間距離や勾配などの影響とそれ自身の容量の値に強く反映される。しかし, 適用路線の負荷条件と必要な FC 出力・LiB エネルギー容量の関係は明らかにされていない。

従って本稿では FC がエネルギーを供給する, 車両走行に伴う損失エネルギーの時間特性から必要な FC 出力・LiB エネルギー容量を計算する方法を提案する。またその手法の評価として, FC 出力制御 LiB の特性を考慮した走行シミュレーションを行い, 提案手法で得られた FC 出力容量 LiB エネルギー容量の妥当性の評価を行う。また, この結果を既存の FC ハイブリッド車両の FC と LiB の搭載量と比較することで FC ハイブリッド車導入の成立性について述べる。

2. 主回路システム構成

FC ハイブリッド車両は Fig. 1 に示すようにチョップと接続された FC と蓄電装置が並列に接続されているものと

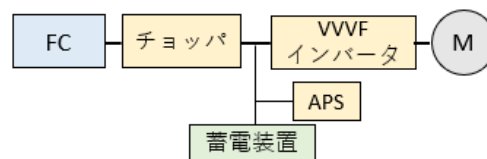


Fig. 1. Configuration of FC hybrid railway vehicles traction system.

想定する。FC は充放電サイクルの中で生じた損失エネルギーを供給する役割を持つ。また, 蓄電装置は FC 出力容量のピークカットと回生パワーを吸収する役割を持つ。Auxiliary Power Unit (APS) は補助電源装置のことであり冷房や空気圧縮機に電力を供給する。

3. 損失エネルギーの時間特性の導出

〈3・1〉 損失エネルギーのモデル式の導出 適用路線の負荷条件のみから必要な FC 出力・LiB エネルギー容量を計算するために FC 出力・LiB エネルギー容量によらない損失エネルギーの時間特性を求める。損失エネルギーの時間特性は力行・回生エネルギーに, FC 出力・LiB エネルギー容量に依存しないように模擬したバッテリー損失とチョップの損失を足すことで求める。

列車の走行に関わる力行・回生エネルギーはインバータ損失, 主電動機損失, ギア損失, 走行抵抗損失, 勾配抵抗損失から求める。インバータ損失はインバータ効率 97.5%, ギア損失はギア効率 95% 一定で計算を行う⁽⁴⁾。走行抵抗損失と勾配抵抗損失は JIS から 式を引用し計算を行

Table 1. Specifications of vehicle and the traction system.

Items	Specifications
Number of vehicles in a train	2 [cars]
MT ratio	1M1T
Moter car mass (excluding pay load)	35,000[kg/car]
Pay load	15550 [kg/car]

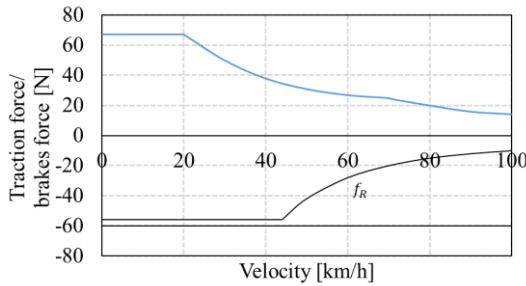


Fig. 2. Traction and regenerative brake curves.

う。主電動機損失は銅損 W_C と鉄損 W_i に分けて考え、銅損 W_C は(1)式で求め、鉄損 W_i は(2)式で求める。

$$W_C = R_1(i_{1d}^2 + i_{1q}^2) + R_2 \left(\frac{M}{L_2} i_{1q} \right)^2 \text{ [W]} \dots\dots\dots(1)$$

$$W_i = k_h f_e B^2 + k_e (f_e B)^2 \\ = \frac{k_h k_B v_m^2}{f_e} + k_e k_B v_m^2 \text{ [W]} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、式(1)において $i_{1d}i_{1q}$ ：一次側 dq 軸電流、式(2)において f_e ：一次側周波数、 B ：磁束密度、 v_m ：モータ入力電圧である。また k_h 、 k_e および k_B は比例定数で本検討では文献(5)より、 $k_h k_B$ は0.0000346、 $k_e k_B$ は0.000000216とする。

また、バッテリー損失とチョップの損失はFC出力-LiBエネルギー容量に依存する。しかし容量はわかっていないため、FCとLiBから供給される電力をまとめて考え、インバータ入力電力とAPS電力の合計から効率90%として計算を行う。ただし、APS電力は一両あたり平均30kWとする。

〈3・2〉 車両諸元 Table. 1に車両諸元を示す。ただし、車両の負荷はこれに加え、蓄電装置の重さを仮に5[ton]と想定する。また、力行時の駆動力 f_p [N]、全ブレーキ力 f_b [N]、回生ブレーキ力 f_r [N]の速度-引張力特性 Fig. 2に示す。

〈3・3〉 路線条件 今回用いる具体的な路線は(a)郊外丘陵路線(JR 東日本 八高線)、(b)都市部平坦路線(JR 北海道 学園都市線)、(c)短距離勾配路線(JR 東日本 烏山線)、(d)長距離山岳路線(JR 東日本 小海線)を考える。勾配は駅ごとのキロ程⁽⁶⁾と標高⁽⁷⁾から算出し駅間では一定であると模擬する。特に小海線は急勾配区間を含む。往復走行の基本条件をTable. 2に示す。

〈3・4〉 走行条件 本検討では基本の運転速度を70km/hとして、この速度に到達後、惰行運転を行い10km/h

Table 2. Route condition.

Route	Number of stations for round trip [-]	Maximum altitude difference [m]	Average distance between station [km]	Maximum slope [%]
Line (a)	31	52.6	4.35	8.31
Line (b)	27	10.7	2.22	1.93
Line (c)	15	78.1	2.91	12.9
Line (d)	61	683	2.63	29.1

低下すると再加速する。下り勾配区間では70km/hより5km/h増加後、ブレーキをかける。この時、減速度は2.0km/h/sで一定とする。

4. 損失エネルギーの時間特性から求めるFC・LiB容量

求めた損失エネルギーの時間特性を Fig. 3に示す。またその特性を用いて、FC出力-LiBエネルギー容量を求める方法を述べる。

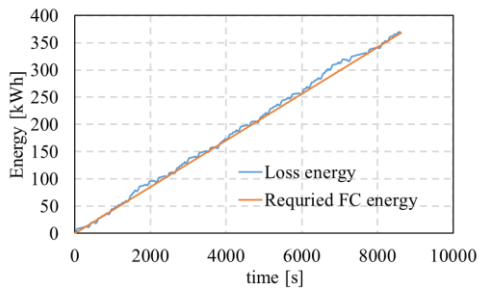
FC出力容量は一定出力で、走行前後に損失を補填するように設計することから⁽⁴⁾損失エネルギーの時間特性からはじめと最後のエネルギーを直線で結んだ時の傾きとなる。ただし、この Fig. 3で直線はFC出力エネルギーを表す。また、この時FC出力エネルギーより損失エネルギーが大きいとき足りない分をLiBエネルギーが供給し、損失エネルギーよりFC出力エネルギーが大きいとき余った分をLiBに貯める。従って、必要なLiBエネルギーの変動量は補填分と充電分を合わせた合計値となり、この値を所要LiB容量の60%(SOC使用範囲を考慮)とする。

これによって求めた必要なFC出力-LiBエネルギー容量をtable. 3に示す。次にこの値を用いてFC出力制御及び、LiBの特性を考慮した走行シミュレーションを行う。

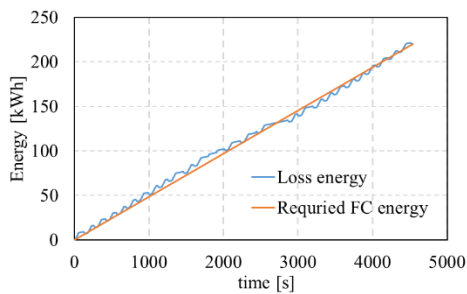
5. FC出力制御を考慮した走行シミュレーション条件

〈5・1〉 FCの制約条件 FCは出力上昇率に制約があり、急峻に電流を流すと空気の供給量が不足し急激な電圧低下が起こる。従ってFCの出力は、その指令値に対し時定数5秒の一次遅れとなるよう、チョップで制御する⁽⁸⁾。

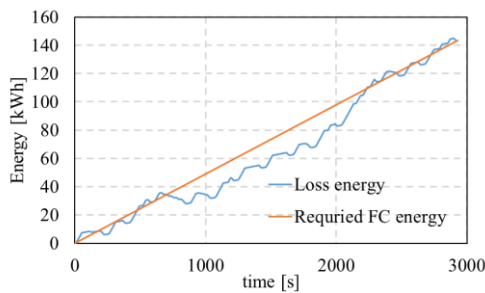
〈5・2〉 LiB容量の条件 搭載するLiBとして、今回はGSユアサ製のLIM30HL⁽⁹⁾を想定する。LiB容量は並列数を増減することで調節する。LiBのSOC(State of Charge)が50%の時およそ750Vとなるように直列数は25とした。この時一並列でおおよそ22.5kWhである。また重さは一並列分で0.437tonである。今回の走行シミュレーション時ではLiBのSOCが下限と上限を超えないようなLiBの並列数を調整した。



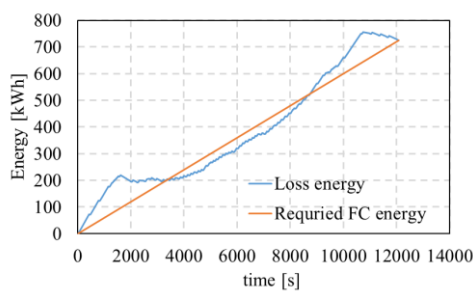
(a) Line (a)



(b) Line (b)



(c) Line (c)



(d) Line (d)

Fig. 3. Loss energy curve and FC output energy.

〈5・3〉 損失モデル FC出力-LiBエネルギー容量が決まっているとき、チョップの損失とバッテリー損失は以下のように計算を行う。チョップの損失はチョップの効率97.5%一定で計算を行う⁽⁸⁾。バッテリー損失は、(3)式で求める。

$$W_{LiB} = R_{LiB} i_p^2 [W] \dots \dots \dots (3)$$

ここで i_p : LiB に流れる全体の電流, R_{LiB} : LiB の全体の内部抵抗である。ただし R_{LiB} は文献(9)から算出し、一並列当

Table 3. Storage battery-FC capacity and route conditions.

Route	FC output [kW]	LiB storage [kWh]
Line (a)	154	39.1
Line (b)	174	30.6
Line (c)	176	44.3
Line (d)	216	289

Table 4. Comparison of storage battery capacity.

Route	Required LiB energy (design) (A) [kWh]	Required LiB energy (simulation) (B) [kWh]	((A)-(B))/(A) [%]
Line (a)	39.1	37.5	4.1
Line (b)	30.6	30.5	0.3
Line (c)	44.3	43.9	0.9
Line (d)	289	285	1.7

たり 0.177[Ω]とする。

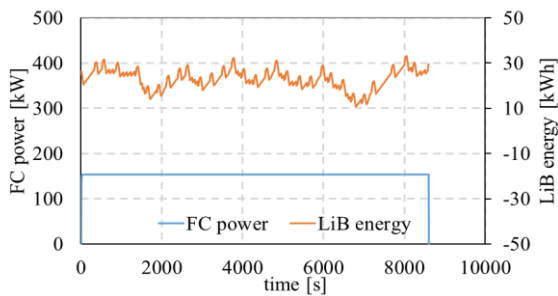
6. 走行シミュレーション結果による損失エネルギーの時間特性から求めるFC・LiB容量の評価

〈6・1〉 FC出力容量の妥当性 損失エネルギーの時間特性から計算したFC出力容量を用いて、FC出力制御及びLiB特性を考慮した走行シミュレーション結果をFig.4に示す。また、この時に必要なLiBエネルギー容量は、エネルギー変動幅を0.6で割った(SOC使用範囲を考慮)値とする。

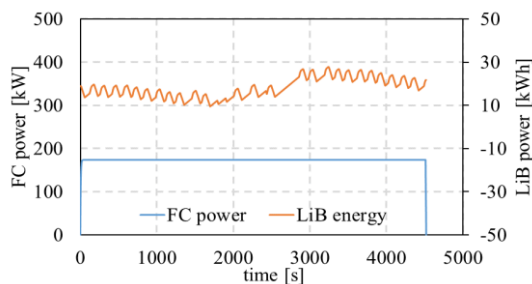
この時、損失エネルギーの時間特性で求めたFC出力容量の妥当性を確認する。4節で述べたように、FC出力容量は一定出力で、走行前後に損失を補填するように設計するので、走行前後のLiBエネルギーの値が近いほど設計できているといえる。一方でFig.4からわかるように、必要なLiBエネルギー容量に対して走行前後のLiBのエネルギーの変化量の割合はどの路線でも10%の範囲内に収まっている。従って、損失エネルギーの時間特性から求めたFC出力容量は妥当だといえる。

〈6・2〉 LiBエネルギー容量の比較 Table.4に走行シミュレーション結果から求めたLiBエネルギー容量と、損失エネルギーの時間特性から求めたLiBエネルギー容量と、前者を基準としたその誤差率を示す。ただし、LiBエネルギー容量は、LiBエネルギーの初期値分が走行前に充電されているものとしたときに求められる値である。

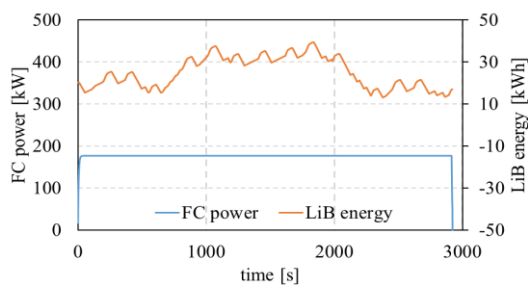
この時、FC出力エネルギーの最終的なずれの影響によって損失エネルギーの時間特性から求めたLiBエネルギー容量の値のほうが大きい。また、LiBエネルギー容量の誤差率は路線によって異なる。これは提案設計により求めたFC出力エネルギーの最終的なずれの影響が勾配の分布によって異なることと、走行シミュレーションでは蓄電池重量の変化を考慮するので、加速性能も変化し走行時間が異なるこ



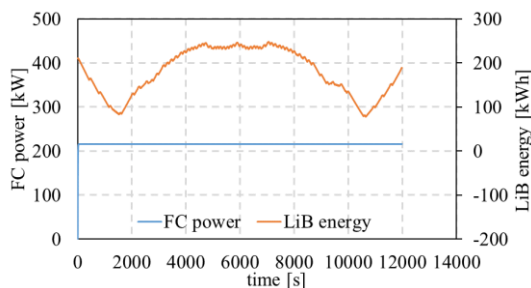
(a) Line (a)



(b) Line (b)



(c) Line (c)



(d) Line (d)

Fig. 4. FC power and battery energy.

とによる。

7. 既存車両との比較による FC・LiB 容量の評価

本検討では急勾配の特徴を持つ路線(d)での FC 出力容量および LiB エネルギー容量 (215kW および 285kWh) が最も搭載量が多く必要であった。この FC 出力容量は、既存車両 (JR 東日本 HYBARI) 2 両分の 240kW⁽⁵⁾と比べると少ないが、搭載 LiB エネルギー容量については、既存車両の

240kWh⁽⁵⁾に比べるとかなり大きい。以上から、路線(d)のような高負荷路線では、FC-LiB ハイブリッド車は現状では難しい場合がある。

8. まとめ

本稿では FC 出力-LiB エネルギー容量によらない消費エネルギーの時間特性から必要な容量を計算する方法を提案した。またその評価として、FC 出力制御及び LiB の特性を考慮した走行シミュレーションを行い、提案手法の妥当性を検証した。その結果、提案手法で得られた FC 出力-LiB エネルギー容量は実際の走行で必要な値と近い値となった。さらにこの結果を既存車両 (JR 東日本 HYBARI) の FC や LiB 搭載量で評価したところ、急勾配を持つ路線(d)のような山岳路線では、FC 出力 (215kW) に対して LiB は 285kWh 必要であり、現行の技術レベルでは、車両への搭載は難しいことがわかった。このように、高負荷路線では燃料電池ハイブリッド車が適用できない場合があることを明らかにした。

<謝辞>

本研究を遂行するにあたり、日立製作所の篠宮健志様、石川勝美様には大変なご助言承りましたことを感謝申し上げます。

文 献

- (1) 「世界初の水素燃料電池列車「Coradia iLint」が初披露ドイツ北部ニーダーザクセン州で運行を開始」 Axis Web Magazin, <https://www.axismag.jp/posts/2018/09/101660.html> (2022年8月10日閲覧)
- (2) 小川賢一・米山崇・須藤貴幸・柏木隆行・山本貴光:「燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化」, 鉄道総研報告, Vol.34, No5, pp34-10, (2020)
- (3) 東日本旅客鉄道株式会社・株式会社日立製作所・トヨタ自動車株式会社:「水素をエネルギー源としたハイブリッド車両(燃料電池)試験車両の開発」, 2020
https://www.jreast.co.jp/press/2020/20201006_4_ho.pdf
- (4) 小川賢一・近藤圭一郎:「燃料電池・リチウムイオン二次電池ハイブリッド鉄道車両の燃料電池・蓄電池容量設計法」, 電学論 D, Vol.139, No5, pp472-479(2018)
- (5) R. Ikeda, S. Yusya and K. Kondo, "Study on Design Method for Increasing Power Density of Induction Motors for Electric Railway Vehicle Traction," 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 1545-1550, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785087
- (6) Yahoo! 路線情報:「乗換案内、時刻表、運行情報」, <https://transit.yahoo.co.jp/>
- (7) 国土交通省 地理院 国土院:「地理院地図」, https://maps.gsi.go.jp/index_m.html#5/36.104611/140.084556/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1
- (8) 小川賢一:「燃料電池ハイブリッド鉄道車両の燃料電池出力容量および主回路質量の低減による低コスト化・軽量化に関する研究」, 千葉大学審査学位论文(2020)
- (9) GSYUASA:「産業用リチウムイオン電池 LIM シリーズ総合カタログ」