

交流架線式蓄電池電車のための 主回路システムの開発と評価

田口 義晃* 門脇 悟志* 仲村 孝行* 吉川 岳*
 畠田 憲司** 畑中 宏文** 金子 貴志***

Development and Evaluation of the Traction Circuit for Battery-Powered and AC-Fed Hybrid Train

Yoshiaki TAGUCHI Satoshi KADOWAKI Takayuki NAKAMURA Gaku YOSHIKAWA
 Kenji HATAKEDA Hirofumi HATANAKA Takashi KANEKO

Battery powered trains have been developed for further energy saving and less maintenance. We have developed a battery-powered and AC-fed hybrid train, series BEC819, loaded with the lithium-ion battery system of 360-kW large capacity and 1598-V high voltage. This train started commercial operation in Oct. 2016, on AC-electrified Chikuho main line and non-electrified Wakamatsu line. In this paper, we describe characteristics and important design aspect of the BEC819's traction circuit, focusing on electrical protection and cooling performance of the battery, in comparison with the previously developed test train, series 817. Then, evaluation of the traction circuit is presented based on the running test conducted before the revenue operation.

キーワード：蓄電池電車，交流電車，リチウムイオン電池，BEC819系，主回路システム

1. はじめに

蓄電池電車とは、非電化区間を蓄電池のエネルギーで走行し、電化区間または充電所にて充電を行う電車である¹⁾。1990年代からの高性能二次電池の普及を背景に、国内では2000年頃から各種試験車両が登場し、2014年にはJR鳥山線にてEV-E301系（愛称「ACCUM」、直流1500V架線対応）が190 kWhのリチウムイオン電池を搭載して営業運転を開始した²⁾。

一方、交流20000V架線に対応した交流架線式蓄電池電車については例がなかったため、著者らは2012年より車両開発に着手した。第一段階として、既存の交流電車817系を改造して主回路蓄電池（以下、蓄電池）を搭載した試験車（以下、改造試験車、図1）を開発し、蓄電池走行や急速充電といった基本性能を各季節において確認した³⁾。第二段階として、試験車における良好な実績と改善点を反映した営業車BEC819系（愛称「DENCHA」、図2）の開発を行い、2016年4月～8月の走行試験を経て同年10月からJR若松線にて営業運転を開始するに至った。

本稿ではまず、蓄電池搭載に対応するための主回路の事例や考え方を述べる。次いで、開発したBEC819系の主回路システムの特徴や、高電圧蓄電池の安全確保

や冷却設計といった設計上の要点を、改造試験車との比較を含めて整理する。さらに、営業運転開始前に実施した走行試験の結果とこれに基づく主回路システムの評価や、蓄電池の長期安定運用に向けた留意点について報告する。



図1 817系改造試験車の外観



図2 BEC819系「DENCHA」の外観

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室
 ** 九州旅客鉄道株式会社
 *** 株式会社日立製作所

特集：車両技術

2. 主回路システムの開発方針

直流電車の主回路に蓄電池を追加する場合、架線と蓄電池を直結すると制御不能な電流が生じることから、一般にチョッパ装置を用いた図3(a)に示す回路構成となる。チョッパ装置を介在させるため、蓄電池電圧を架線電圧に整合させる必要はなく、車載用リチウムイオン電池として実績の多い、600Vクラスの低電圧蓄電池が利用可能である。

交流電車の主回路に蓄電池を追加する場合には、チョッパ装置を省略できる。考案した主回路構成を図3(b)に示す。すなわち、既存のPWMコンバータに蓄電池電流の制御機能を追加すれば、新たなチョッパ装置を追加することなく、蓄電池を直流リンク部に直結できる。ただし、直結するには電圧を整合させる必要がある。在来線交流電車の直流リンクは1600～1800V程度の高電圧で設計されるため、ここに低電圧の蓄電池を直結すると電圧が不整合になり、架線から蓄電池に制御不能の充電電流が流れて過充電を招く。主回路機器全体の電圧を下げて低電圧蓄電池に整合させると、主変圧器の巻数比変更などの設計変更や主回路電流の増大を想定する必要が生じる。そこで、蓄電池電圧を高電圧化して既存主回路に整合させることとした。このために車載用としては例のない1000Vを大幅に超える高電圧蓄電池システムを開発することとなった。

3. BEC819系の設計上の要点

3.1 車両の特徴

2016年に完成して営業運転を開始したBEC819系の特徴⁴⁾を、2013年に走行試験を行った改造試験車との比較とともに示す。車両主要諸元を表1に示す。蓄電池の十分な寿命と、非常時に対応するエネルギー余裕を確保するため、BEC819系の蓄電池容量は公称360kWhとした。蓄電池寿命を重視せずに設計した改造試験車の約4倍である。大容量蓄電池の搭載スペース（レール方向に約8m）を確保するため、制御機器の一部は床上機器室に収納した。BEC819系では3つの蓄電池バンクを並列接続しており、合計質量は約9tである。また、パンタグラフ周辺を低屋根構造とすることにより非電化区間での運用に対応させた。蓄電池の大容量化や低屋根構造を実現するため、BEC819系は改造ではなく新製となった。BEC819系では蓄電池への急速充電電力が改造試験車より増加するため、トロリ線の温度上昇対策としてパンタグラフのすり板は2列から4列に変更した。また、BEC819系では非電化区間と電化区間の境界駅において、パンタグラフの昇降状態が不正な場

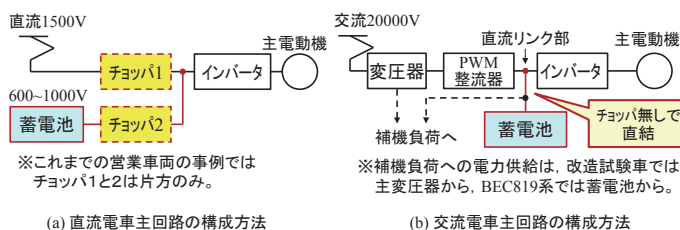


図3 蓄電池搭載に対応した主回路の構成方法

表1 車両主要諸元

車両名称	BEC819系	改造試験車
開発時期	2016年	2013年
編成	2両編成(1M1T)	同左
空車質量	72.1t	68.4t
主電動機	95kW全閉型誘導電動機×4台	150kW誘導電動機×4台
蓄電池仕様(公称値)	1598V-225Ah 360kWh	1382V-60Ah 83kWh
急速充電電力(最大値)	約810kW (約1800V-450A)	約580kW (約1600V-360A)
蓄電池箱質量	約3t×3箱	約1.7t×2箱
蓄電池搭載スペース	Tc車床下レール方向約8m分	Tc車床下レール方向約4m分
パンタグラフ仕様	空気上昇・ばね下降式、すり板4列、取付部は低屋根化	ばね上昇式、すり板2列

合にブレーキが作動するインタロックシステムを備えている。

3.2 主回路の概要

BEC819系の主回路構成を図4に示す。主変換装置は冗長化のため2群構成とし、これらの直流リンクと3バンク並列の蓄電池とを、平滑リアクトルBFLを介して直結している。不具合等で主変換装置や蓄電池の一部を開放しても、残りの健全な部位によって運転継続可能である。

一般的な交流電車や改造試験車においては、空調等の補機負荷への交流電圧の給電には主変圧器の3次巻線を用いている。改造試験車においては、蓄電池から供給した電力がPWMコンバータと主変圧器を経由して補機に至るまでの損失が大きい(8%以上)という課題が見られた。そこで、BEC819系では3次巻線を省略して補助電源装置SIVを搭載し、蓄電池からSIVのみを経由して補機に給電することで損失低減を図った。これにより、走行モード切替時に一旦補機を停電させる必要はなくなった。また、改造試験車では蓄電池走行モード時に屋根上に20000Vが逆加圧される課題があったが、これも解消した。

代表的な動作モードにおけるパワーフローを図5に示す。蓄電池走行モード時は図5(a)のように、全負

荷のパワーは蓄電池から供給され、ブレーキ時の回生パワーは主電動機から蓄電池と補機負荷に供給される。架線走行モードの惰行・停車時は、蓄電池充電用のパワーと補機用のパワーは架線から供給される（図5 (b)）。蓄電池が所定の充電率（約80%）まで充電されると、PWMコンバータは停止し、補機負荷への給電は蓄電池から行われる（図5 (c)）。その後充電率が所定値まで低下すると再度PWMコンバータが稼働して架線からの充電が行われる。架線走行モードの力行・回生時は図5 (d) に示すように、力行パワーは架線から供給され、回生パワーは蓄電池が満充電であれば架線へ、それ以外では蓄電池へ供給される。

3.3 車両性能設計

力行性能は改造試験車とはほぼ同等であり、従来の気動車（キハ40・47形）を上回るよう、速度約40 km/hまでは平坦区間で2.6 km/h/sの加速度とした。線区の条件によっては従来気動車に近い加速性能1.6 km/h/sも選択可能である。速度約40 km/h以上では蓄電池の放電パワーに上限を設けた影響で加速度は低下し、架線走行モード時より低い加速度となる。回生ブレーキ性能は、インバータからの回生電力最大値が改造試験車の約1.3倍となるよう設計した。これにより、扱われる頻度の高い停止ブレーキ（ブレーキ初速度約70 km/h以下かつB4ステップ以下）は回生ブレーキのみでブレーキ力が発揮でき、機械ブレーキの補足によるエネルギー損失を極力低減している。回生ブレーキ性能は、蓄電池電車の省エネ性を高め、蓄電池の消耗を抑制するための重要な設計要素である。

4. BEC819系の蓄電池システム

4.1 主要諸元

蓄電池システムの主要諸元を表2に示す。公称3.7Vの電池セルを6直列したモジュールを基本単位とし、全体では72モジュール直列したバンクを3並列接続した。電池が高温となると、55℃以上で通電電流の抑制が行われ、60℃で保護遮断となる。電池セルのタイプは、BEC819系では大容量をコンパクトに搭載する要請が厳しかったため、エネルギー密度が比較的高いタイプを採用した。

蓄電池容量の360 kWhは、若松線を2往復してさらに非常時の余裕も見込んだエネルギー量である。2往復としたのは、ラッシュ時間帯に折尾駅で殆ど充電できずに折り返すことを想定したためである。この容量であれば、各種基礎実験データに基づいて試算した推定寿命は8年以上となり、次回全般検査まで使用できる見通しを得た。

蓄電池電圧は公称1598Vと、改造試験車の1382Vより高めた。主な理由は、高速域での主電動機トルクを増

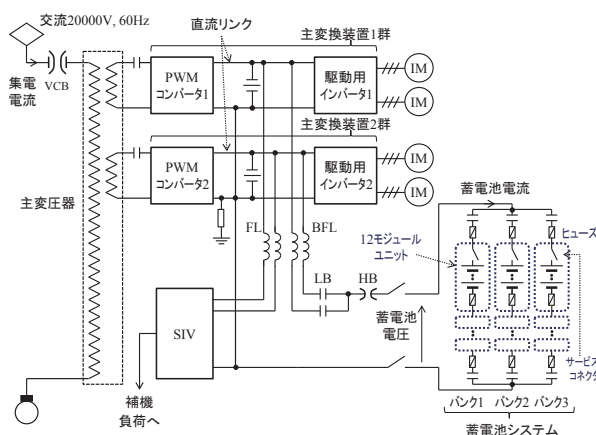


図4 BEC819系の主回路構成

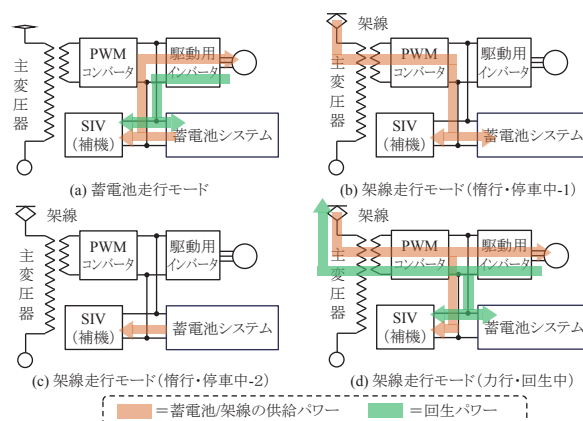


図5 BEC819系の代表的な動作モード

表2 蓄電池システムの主要諸元

正極活物質	マンガン酸リチウム
公称電池容量	75 Ah / cell
公称セル電圧	3.7 V / cell
質量	約23 kg / モジュール
過電圧保護	4.35 V (最大セル電圧)
低電圧保護	2.50 V (最小セル電圧)
最大電流	225 A / バンク (電流レート3C)
上限温度	55℃ (電流抑制開始), 60℃ (保護遮断)
蓄電池システム構成	1モジュール = 6セル直列接続 1バンク = 72モジュール直列接続 全体システム = 3バンク並列接続
システム定格	1598 V - 225 Ah (360kWh) : 公称値

加させること、架線から充電する際の帰線電流ノイズ⁽⁵⁾（低次の高調波）を低減するためである。

4.2 安全性の確保

有機系電解液を使用するリチウムイオン電池は、短絡電流が継続すると熱暴走反応に至り、可燃性である電解液の蒸気を噴出する懸念がある。電池システムを高電圧化すると短絡電流が増加傾向となるため、電氣的な安全

特集：車両技術

確保がより一層重要となった。そこで、直列モジュール間に中間ヒューズの挿入を行った。ヒューズ間の直列モジュール数は、式(1)で概算した短絡電流値⁶⁾に安全を見込んで12モジュールと決定した。

$$I_s = \frac{kn_s E_0}{R_s + kn_s R_0} \left(= \frac{E_0}{R_0} \cdot \frac{kn_s}{R_s/R_0 + kn_s} \right) \quad (1)$$

但し、 I_s : 短絡電流 [A], kn_s : 短絡セル数, E_0 : セルの起電圧 [V], R_0 : セルの内部抵抗 [Ω], R_s : 短絡抵抗 [Ω] を表しており、単一のバンクを対象とした短絡電流の概算式である。選定した電池セルの短絡電流 I_s の許容最大値が既知であれば、この範囲に収まるように短絡セル数 kn_s の許容最大数が決定される(図6)。ヒューズ間の直列セルが許容最大数以下となるようにヒューズを配置すればよい。蓄電池箱が衝撃を受けて箱内部で短絡が生じる場合にも、大規模な短絡は中間ヒューズで遮断されるため、熱暴走に至るリスクを低減可能である。

また、蓄電池の緊急遮断スイッチを運転台に設けており、制御伝送によらず編成内引通しの指令線によって遮断可能としている。この他に、12モジュール直列ごとに開放器(サービスコネクタ)を設け、保守作業時の感電リスクを低減している。

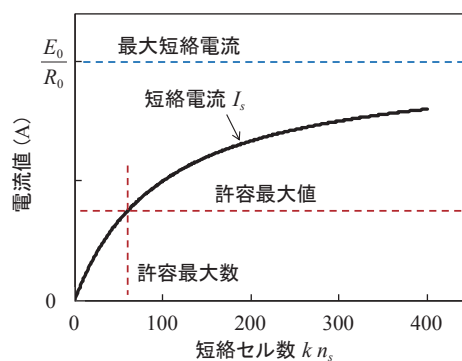


図6 概算した短絡電流の模式図

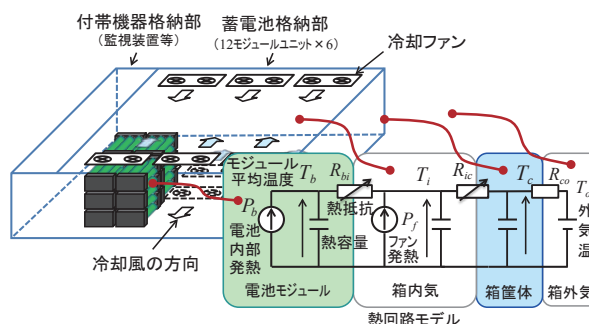


図7 蓄電池箱の冷却構造と構築した熱モデル

4.3 放熱構造と熱回路モデル

蓄電池箱内部の放熱構造を図7に示す。箱内外の換気は塵埃対策の観点から行わないこととした。よって、箱内冷却ファンの機能は、箱内気を循環させて伝熱を促進することである。

同図右下部には蓄電池セルから箱外気までの伝熱に関する熱モデルを示した。セルの内部発熱パワー、外気温度の推移、熱パラメータ(熱抵抗、熱容量)、各部初期温度が決まれば、電池モジュール平均温度の推移が簡易な逐次計算によって推定できる⁷⁾。熱パラメータの算定方法は、改造試験車の走行試験時は熱平衡試験および手動調整による精度向上を必要としたが、BEC819系走行試験においては複数走行日の走行試験データから自動でパラメータを同定するアルゴリズムを開発し、精度のよい熱モデルを効率的に構築した⁸⁾。

5. 営業運用に向けた主回路システムの評価

5.1 現車試験実施概要⁹⁾

BEC819系の走行試験を2016年4月から8月に実施した。殆どの試験は筑豊本線にて行われ、電化された中間～桂川間(30.4 km)では21日間、非電化の若松～折尾間(10.8 km, 愛称: 若松線)では7日間実施した。営業運用に向けて特に重要な評価結果は次節から5.4節で述べる。その他にも、蓄電池航続距離試験として最長

105.6 km(中間～桂川間を1.5往復余り)を走行可能であることを確認した。この際、夜間走行のため補機電力は小さく、通常の充電率下限より低い11%までの安定した放電を確認した。また、装置故障を模擬した縮退運転試験として、一部の蓄電池や主変換装置を開放して走行可能であることや、縮退運転後に蓄電池の充電率がアンバランスとなった状態からでも、安全かつ円滑に健全状態に復帰可能であることを確認した。さらに、定置にて蓄電池の充放電を実施し、急速充電時のトロリ線温度や蓄電池の容量値に問題がないことを確認した。

5.2 消費電力量の評価¹⁰⁾

若松線における消費電力量の測定結果を図8に示す。空車条件において若松線1往復に要した駆動用の消費電力量は、ダイヤに準拠して走行した15試番の平均で約31 kWh、制限速度に近い最高速度で駅間を走行した際には最大値の約46 kWhとなった。測定値に旅客荷重による増分および補機分を考慮した上で、電池寿命の試算には平均値を用い、蓄電池エネルギー容量の余裕は最大値を用いて評価した。

改造試験車と比較した、蓄電池走行モードにおける駆動用の消費電力量を図9に示す。改造試験車の走行時と各駅間の最高速度を揃えて1往復する条件で、BEC819系は改造試験車に比べて10.6%の省エネとなった。編成質量はBEC819系の方が5.4%増加しているが、3.3

節で述べたように回生電力最大値を増大した効果により、回生電力量が23.4%増大したことが大きく寄与した。

5.3 蓄電池温度上昇の評価¹¹⁾

蓄電池の通電に伴う温度上昇は、走行試験期間中の最大で53℃（モジュール平均では51℃）であり、電流制限が生じる55℃には達しなかった（図10）。外気温が35℃を超える盛夏に、駅間最高速度を極力高めた速達運転を主体としても蓄電池温度は許容範囲となった。

走行試験では測定できなかった条件については、構築した熱モデル（図7）を用いて推定した。蓄電池の飽和温度 $T_{b\infty}$ [℃]は、式(2)、(3)から推定可能である。

$$T_{b\infty} - T_o = (R_{bi} + R_{ic} + R_{co})P_b + (R_{ic} + R_{co})P_f \quad (2)$$

$$P_b = R_b I_{brms}^2 \quad (3)$$

ここで、 I_{brms} [A]は蓄電池1バンク当たりのRMS電流、 R_b [Ω]は蓄電池の内部抵抗（温度依存性を考慮）、 P_b [W]は蓄電池の内部発熱パワー、 P_f [W]は冷却ファンに由来する発熱パワー、 T_o [℃]は外気温、 R_{bi} と R_{ic} と R_{co} は熱抵抗 [K/W]（図7参照）を示す。

概算した蓄電池飽和温度を図11に示す。外気温は35℃で一定と仮定し、電池が新品の場合と劣化した場合の試算例である。蓄電池RMS電流は、電化区間（折尾～直方間）まで直通運転を行う場合を100%として示しており、非電化区間（若松～折尾間）のみを往復する場合は134%と大きい。これは非電化区間では急速充電をはじめ、蓄電池に大電流を通電する時間の比率が大きいためである。現状では蓄電池が新品状態に近く、非電化区間を長時間往復する運用は行わないため、上限温度60℃に到達する心配は少ない。しかし、将来蓄電池が劣化して内部抵抗が1.5倍に増加し、蓄電池RMS電流値が大きい運用とする場合には上限温度に接近するため留意が必要である。このような場合には、急速充電の電流値低減、放熱性能の強化等の対策を行うか、新しい蓄電池への交換が必要と考えられる。

5.4 充電性能の評価¹¹⁾

急速充電時の実測波形例を図12に示す。蓄電池温度24.4℃から充電を開始した時の方が、45.2℃開始時より内部抵抗が高いため、充電末期にCV（定電圧）充電に移行した際の電流の絞込みが顕著である。この電流絞込みにより、CC（定電流）充電のみで充電完了する場合の最短充電時間よりも所要時間が長くなるが、所定の充電率80%までの充電においては最大でも1.5分の増大に収まった。この程度の増加であれば運行上の支障は小さい。冬季低温環境での所要時間はさらに増大する懸念があるが、現車試験では測定できなかった。そこで推定

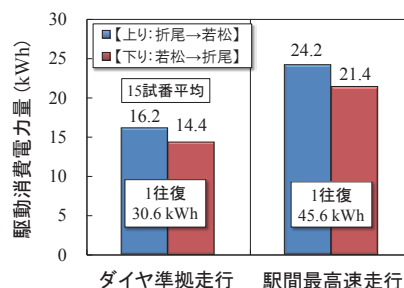


図8 駆動用の消費電力量測定結果（若松線 若松～折尾間）

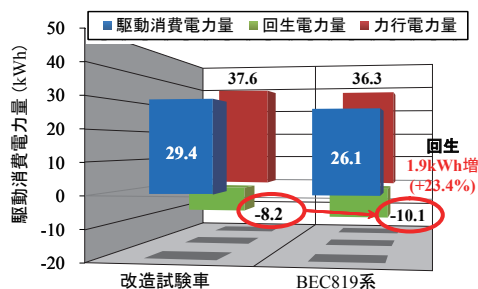


図9 改造試験車との消費電力量比較（筑豊本線 中間～直方間往復）

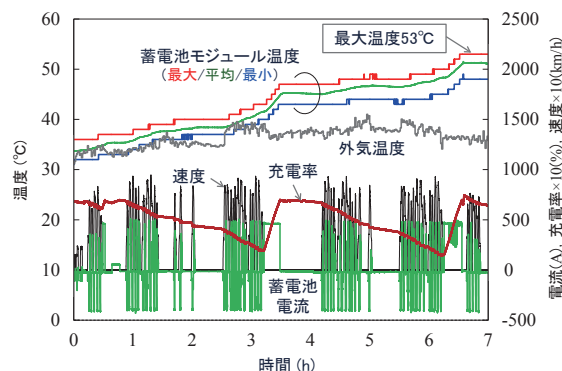


図10 走行試験における電池温度等の推移（試験期間中の最高温度記録日）

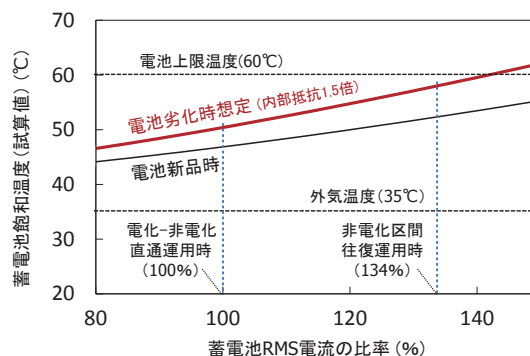


図11 蓄電池飽和温度の試算例

特集：車両技術

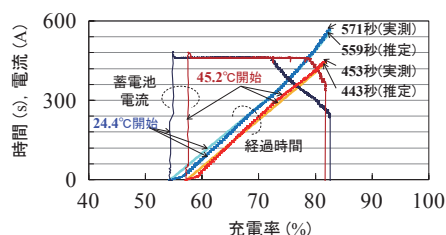


図 12 急速充電の所要時間比較例

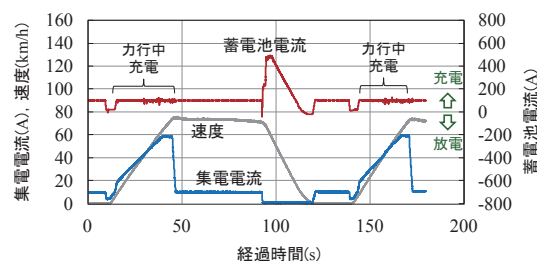


図 13 走行充電の波形（力行中の充電も実施）

手法³⁾によって別途把握した。図 12 のデータを用いて所要時間の推定精度を評価した結果、実測との誤差は 10% 未満となった。

電化区間を走行しながら緩慢に充電する走行充電を行えば、蓄電池温度上昇が小さく変電所負担も小さい。架線から充電するのは停車中と惰行中のみとしたが、力行中の充電についても試験的に実施した（図 13）。将来さらに充電機会を増やす必要が生じた場合には、集電電流の増加に留意すればこの制御を活用可能である。

6. まとめ

交流架線式蓄電池電車 BEC819 系「DENCHA」の主回路システムを開発し、営業走行に向けた性能評価を行った。主回路の特徴と性能評価結果の要点を以下に記す。

- (1) BEC819 系の蓄電池は、長寿命と非常時のエネルギー余裕を確保するため、360kWh の大容量とした。
- (2) 1598V の高電圧蓄電池を直流リンク部に直結する主回路構成とし、蓄電池短絡対策として複数の中間ヒューズを蓄電池箱内に配置した。
- (3) 回生ブレーキの性能を向上したため、改造試験車と比べて回生電力量が 23.4% 増加して省エネとなった。
- (4) 将来蓄電池が劣化して内部抵抗が増加すると、蓄電池温度が上限温度に接近する可能性があることを、熱回路モデルを用いた試算によって示した。

BEC819 系は、2016 年 10 月から順調に営業運転を行っている。今後は、蓄電池電車のさらなる拡大に寄与する技術開発を行うとともに、蓄電池の長期的な信頼性確保のため、鉄道車両に適した劣化診断・予測技術の深度化に取り組んでいく予定である。

謝辞

改造試験車の開発では GS ユアサ株式会社より、現車測定の実施に際しては株式会社テスの関係各位より多大なるご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

文献

- 1) 小笠：バッテリー電車の最近の動向，鉄道総研報告，Vol.29, No.9, pp.51-60, 2015
- 2) 長谷部ほか：EV-E301 系蓄電池電車，車両技術，No.248, pp.28-44, 2014
- 3) 田口ほか：交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と走行試験による蓄電池性能評価，鉄道総研報告，Vol.28, No.7, pp.17-22, 2014
- 4) 畑中：BEC819 系蓄電池駆動交流電車，車両技術，No.254, pp.74-87, 2017
- 5) 田口ほか：交流電車の蓄電池電車化に向けた主回路方式の開発，電気学会論文誌 D，Vol.135, No.4, pp.403-410, 2015
- 6) 田口ほか：車載高電圧蓄電池の短絡電流抑制のためのヒューズ配置指針，平成 28 年電気学会全国大会，No.5-196, pp.191-192, 2016
- 7) 田口ほか：車両駆動用リチウムイオン電池の簡便な温度上昇推定手法，鉄道総研報告，Vol.30, No.11, pp.41-46, 2016
- 8) 吉川ほか：蓄電池電車用リチウムイオン電池の温度推定用熱モデルパラメータ同定手法の基礎検討，電気学会研究会，TER-16-69, pp.29-34, 2016
- 9) 畠田ほか：「DENCHA」の開発，第 53 回鉄道サイバネシンポジウム，No.527, 2016
- 10) 門脇ほか：「DENCHA」の開発と走行試験結果（第 2 報），J-RAIL2016，No. S3-4-7, pp.583-586, 2016
- 11) 田口ほか：「DENCHA」の開発と走行試験結果（第 3 報），J-RAIL2016，No. S3-4-8, pp.587-590, 2016