

# 架線ハイブリッド電車用リチウムイオン電池の 充電率推定手法

田口 義晃\* 小笠 正道\*\*

An Estimation Method of SOC of Lithium-ion Battery  
for Contact-wire and Battery Hybrid Electric Railway Vehicle

Yoshiaki TAGUCHI Masamichi OGASA

Nowadays, there has developed some railway vehicles equipped with the on-board secondary batteries to improve the energy saving performance. Concerning such vehicles, accurate and stable SOC (state of charge) estimation is important for the management of battery energy. In this paper, we showed a SOC estimation method developed for the lithium-ion batteries boarded on contact-wire and battery hybrid electric railway vehicle. This method enabled the stable SOC estimation and the automatic tuning of parameters such as battery capacity and its inner resistance. These characteristics of developed method had been evaluated through the running test on the JR-Shikoku railway main line.

キーワード：リチウムイオン電池，充電率（SOC），電池容量，架線ハイブリッド電車

## 1. はじめに

近年，鉄道車両に大容量バッテリーを搭載して省エネ性や省保守性を高める技術が盛んに開発されている。鉄道総研が2007年に開発した架線・バッテリーハイブリッド電車<sup>1)</sup>であるLH02形「ハイ！トラム」(図1)は，600V-120Ahのリチウムイオン電池(図2)を搭載している。これによって電化区間では省エネ性が高まり，非電化区間では架線レス走行が可能となる。非電化区間を架線レス電車として走行する際には，当然ながらバッテリー切れを防止しなくてはならない。このためには，搭載電池の充電率(以下，SOC: State of chargeと表記)を正確かつ安定に演算することが不可欠である。SOCは，非電化区間での到達駅の予測や，充電駅での所要充電時間算出の他，残量低下時のモータトルク制限などの制御にも活用される重要情報である。

既存のSOC推定手法には，演算に使用するパラメータを取得しにくいことや，SOC表示値が急に数パーセント変動すること等の課題があり，鉄道車両に適用するには改良の余地があった。そこで，パラメータの取得が容易であり，実用上十分な正確さと安定性を備えたSOC推定手法の開発を進めてきた<sup>2)</sup>。図2に示す車載バッテリーに開発したSOC推定手法を適用し，これまで二度の営業線走行試験において推定特性を確認した。

一度目は2007年11月から2008年3月にかけての札幌市交通局での試験<sup>3)</sup>であり，寒冷地環境で路面電車走行した条件での確認である。二度目は2009年11月のJR四国での試験<sup>4)</sup>であり，最高速度80km/hで鉄道線走行した際の，より厳しい負荷条件での確認となった。

本稿ではまず，開発したSOC推定手法について述べる。次いで，JR四国走行試験の実測データを基に開発手法の諸特性を確認したので報告する。

## 2. バッテリーシステムの構成

開発したLH02形の主回路構成を図3に示す。電源は架線とバッテリーのハイブリッド構成である。架線電力(1500Vまたは600V双方に対応)はチョッパ1(COV1)を介して供給され，バッテリーの電力はチョッパ2(COV2)を介して供給される。ハイブリッド走行時には



図1 LH02形電車の外観



図2 車載電池の一部

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

\*\* 車両制御技術研究部

特集：車両技術

架線との電力授受が優先され、架線電流の制限値を超える過不足分の電力はバッテリーと授受される。また、バッテリー電圧が設定範囲内となるように、ハイブリッド走行中には架線から調整充放電する機能を有する。

本研究で用いたバッテリーシステムの諸元を表1に示す。セルの公称電圧は3.6V、公称電池容量は30Ahである。8セルを直列したものをモジュール、21モジュールを直列したものを群と称している。システム全体は4群の並列接続で構成される。何らかの異常時は群毎に独立したブレーカによって異常な群のみを開放する。これによって健全な群のみによる運転継続を可能としている。群内のいずれか1セルでも端子電圧が2.5V～4.3Vを一定時間以上逸脱すると過放電異常または過充電異常が検知される。本稿でのSOCの定義は、現実的に使用可能な電圧範囲を考慮して、セルの開回路電圧（以下、OCV: Open Circuit Voltage と表記）が平均4.1Vの状態を100%とし、平均2.9Vの状態を0%とする。ここでOCVとは、数時間無電流（開回路）として、一定となった端子電圧のことである。SOCが100%から0%に至るまでの放電量(Ah)を本稿では電池容量と称してQ(Ah)と表記する。これは電池製造時の公称電池容量ではなく、経年変化を経た現在値であり、提案方式では推定値として取得する。上限・下限以外のSOCは満充電からの放電量D(Ah)に対して直線的に変化するように式(1)で定義する。

$$SOC = \frac{Q - D}{Q} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで、QやDを車載状態で測定または推定する場合には誤差が無視できず、真値を得るのは困難である点に留意する必要がある。

表1 LH02形電車の電池システム仕様

正極活物質	マンガン酸リチウム
定格電池容量	30 Ah / cell
定格セル電圧	3.6 V / cell
質量	約2.0 kg / cell
過電圧保護	4.3 V (最大セル電圧)
低電圧保護	2.5 V (最小セル電圧)
温度上昇保護	65℃
100%SOCの定義	4.1 V / cell (開回路電圧平均値)
0%SOCの定義	2.9 V / cell (開回路電圧平均値)
バッテリーシステム構成	1モジュール = 8セル直列接続 1群 = 21モジュール直列接続 全体システム = 4群並列接続 (総計672セル)
システム定格	604.8 V - 120 Ah 1000A 急速充電対応

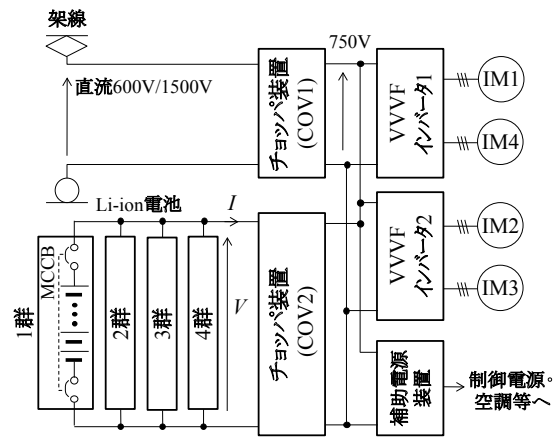


図3 架線ハイブリッド電車 LH02 の主回路構成

### 3. SOC推定の基本的手法

SOC推定の基本となる手法は図4に示すように2種類あり、本稿では各々を電圧参照方式と電流積分方式と呼ぶ。また、電圧参照方式で求めたSOCをS<sub>1</sub>、電流積分方式で求めたSOCをS<sub>2</sub>と表記する。

#### 3.1 電圧参照方式

電圧参照方式とは、OCVの実測値または推定値Eを、電池固有のテーブルまたは関数を用いてSOCに変換する方法である(図4(a))。今回の電池システムについて特性を取得した結果、式(2)に示すEの3次式f(E)によって精度よく近似できた。

$$S_1 = a_3 E^3 + a_2 E^2 + a_1 E + a_0 \quad (\equiv f(E)) \quad (2)$$

ここで、a<sub>0</sub>～a<sub>3</sub>は電池システム固有の係数である。

以下に、電圧参照方法の長所(○印)と短所(▲印)を示す。

- 積分演算がないので電流測定誤差が蓄積しない
- 劣化等による電池容量Qの変動に影響されない
- ▲ 電流変化時はOCV推定誤差によって変動する
- ▲ 関数f(E)が実態と異なると誤差を生じる

OCVは通電中や通電直後には観測できない。よって推定値で代用するために、電池モデルを用いた推定演算が必要となる。電池モデルは、電圧源に抵抗とコンデンサの並列回路を複数段直列接続するものが一般的である。文献5), 6)には、直列接続する段数が多いほど、推定の精度が高まることが示されている。

しかし、鉄道車両への適用を考えるとこのような電池モデルの使用は実用的とは限らない。配線の抵抗等も考慮するためには実車に電池を搭載してから多数のモデルパラメータを取得する必要があること、さらに電池の経年劣化に伴って定期的にパラメータをチューニングする必要があり、いずれも専用の設備と少なからぬ作業期間

を要するであろうことが理由である。

そこで、著者らはパラメータ取得が容易でシンプルな電池モデルを用い、それによる OCV 推定精度の限界を考慮して次節の演算と併用する方式とした。

### 3.2 電流積分方式

電流積分方式とは、演算周期  $T$  の間の放電量変化分  $\Delta D_2$  から SOC の変化分  $\Delta S_2$  を求める方法である (図 4 (b))。これらは、次式 (3), (4) で算出可能である。

$$\Delta D_2 = \frac{1}{3600} \int_t^{t+T} I \, dt \quad (\text{Ah}) \quad (3)$$

$$\Delta S_2 = -\Delta D_2 / Q \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

ここで、 $t$  は時刻 (s) である。この方式はクーロンカウント法と呼ばれる場合もあり、式 (1) での定義に即している。以下に本方式の長所 (○印) と短所 (▲印) を示す。短所が存在するため、単独で用いることは難しい。

- 演算が容易で SOC の時間変化は連続的となる
- ▲ 電池容量  $Q$  の推定誤差に影響される
- ▲ 演算開始時の初期値  $S_2(0)$  は別途求める必要がある
- ▲ 電流測定誤差が積分演算によって蓄積される

## 4. SOC 推定の提案手法

本章では提案する SOC 推定演算について述べる。3 章に記した 2 つの基本方式を併用して、それぞれの短所を補い合う手法を採用している。

### 4.1 推定手法の概要

電圧参照方式と電流積分方式の双方を併用する方式は従来から知られているが、モデルパラメータが多数ある手法や、パラメータの逐次推定をかける複雑な手法も存在する。

今回開発した SOC 推定手法は、シンプルな併用方式で

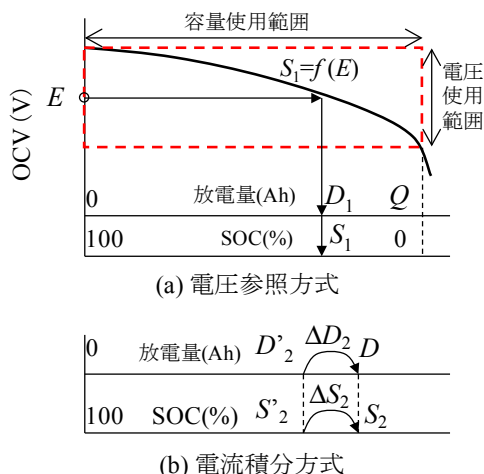


図4 SOC 推定の基本手法

あるゆえにパラメータ変動に強く、鉄道車両に特有なドア開閉情報を利用する特徴がある。全体概要を図 5 のブロック図に示す。使用する信号は端子電圧  $V$ 、電池電流  $I$ 、電池平均温度  $T_b$ 、開扉信号であり、他に記録専用として電池アラーム情報、車両速度も入力している。演算した SOC はディスプレイに表示し、このほかの OCV や電池容量、電池内部抵抗などの演算結果とともに記録する。次節以降において、各ブロックの演算を詳細に述べる。

### 4.2 OCV の推定

OCV 推定に用いる電池モデルは 3.1 節に記した理由から図 6 の簡易な回路とする。電圧  $V_{rr}$  についての関係式は次式となる。

$$V_{rr} = \frac{1}{C_r} \int_0^t (-I - \frac{V_{rr}}{R_r}) \, dt \quad (5)$$

式 (5) の積分方程式を、台形公式で近似差分方程式に改めたものを使用する。電圧  $V_{rd}$  は、

$$V_{rd} = -R_d I \quad (6)$$

であるから、OCV 推定値  $E$  は、次式 (7) から求まる。

$$E = V - V_{rd} - V_{rr} \quad (7)$$

このようにして算出した  $E$  を式 (2) に代入することで電圧参照方式による SOC 推定値  $S_1$  を得る。

### 4.3 併用のアルゴリズム

図 7 に SOC 演算全体のフローチャートを示す。1 演算周期毎に図 7 のフローを実行する。今回開発したシーケンスは、電流積分方式による  $S_2$  を常時表示し、演算開始時および車両開扉直後のみ電圧参照方式による  $S_1$  を  $S_2$  に代入して  $S_2$  の誤差を補正する。その結果、常時は電流積分方式の特性によって SOC 変化は連続的となり、誤差が補正される時のみ不連続な変化が発生する。 $S_1$  は常時参照されるわけではないが、算出には電流・電圧の履歴が必要なため常時演算しておく。

### 4.4 パラメータの自動補正

開扉直後には推定電池容量の補正を実施する。 $S_2$  が  $S_1$  から乖離する要因は、式 (4) における推定電池容量  $Q$

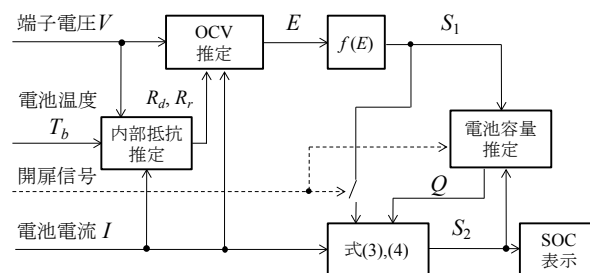


図5 SOC 推定手法の全体ブロック図

特集：車両技術

が実態と異なるためと考えると  $Q$  を補正する。具体的には図8に示すように、前回の補正時と比較して  $S_2$  の増え方や減り方が  $S_1$  のそれより少ない場合は、 $Q$  の推定値が実際より大きかったと考えると  $Q$  を通減する。反対に  $S_2$  の増え方や減り方が  $S_1$  のそれより多い場合は、 $Q$  を通増する。この操作を繰り返すと  $Q$  は真の電池容量に収束していくと考えられる。ただし、 $S_2$  が  $S_1$  から乖離する要因には電流の測定誤差等も考えられる。よって、推定電池容量  $Q$  の収束値の妥当性は試験的に確認する必要がある。

電流が急変した直後には内部抵抗値の補正も実施する。SOCの演算周期  $T$  (1秒) は十分小さいため、この間に  $V_r$  および  $E$  は変化せず、端子電圧  $V$  の変化は  $V_d$  の変化に等しいと考えるとよく、式(8)が成立する。

$$R_d = -(V - V') / (I - I') \quad (8)$$

式(8)では、変数  $X$  の現在時刻での値を  $X$  と表記し、1サンプル前の値を  $X'$  と表記している。保持している  $R_d'$  が新規に演算した  $R_d$  に近づくよう、 $R_d$  が演算される毎に  $R_d'$  を通増または通減させる。 $R_d$  の初期値は、電池温度の関数として得るようにしている。上記補正動作はこの初期値と実態の相違を補正する動作である。

なお、 $Q$  および  $R_d$  いずれの補正に関しても不感帯を設けてあり、過剰な補正動作が生じないようにしている。

4.5 等価回路パラメータの取得

図6に仮定した電池の等価回路パラメータは、図9に示す過渡応答波形から求めた。この波形は走行試験の準備期間に取得しており、測定時の電池平均温度は23℃であった。時刻0秒で充電電流が101Aから0Aに変化した際の波形である。電池端子電圧  $V$  について、期間0～100秒までを抽出して一次遅れの関数で近似した結果、図9中に示す近似式が得られた。時定数は35.8秒であり、ここから図6中の等価回路定数は、 $R_d = 62.0 \text{ m}\Omega$ ,  $R_r = 30.1 \text{ m}\Omega$ ,  $C_r = 1190 \text{ F}$  と求めた。この結果

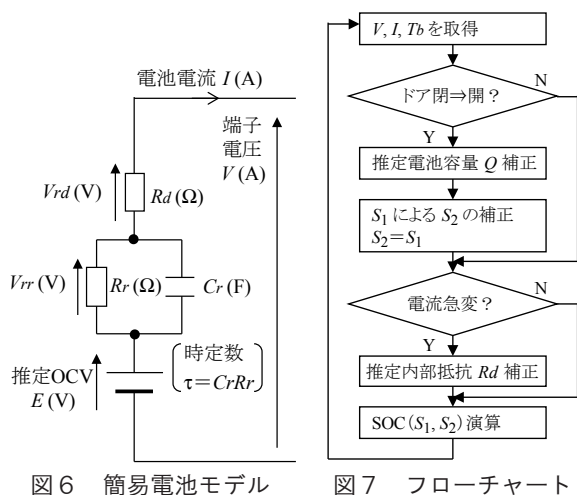


図6 簡易電池モデル

図7 フローチャート

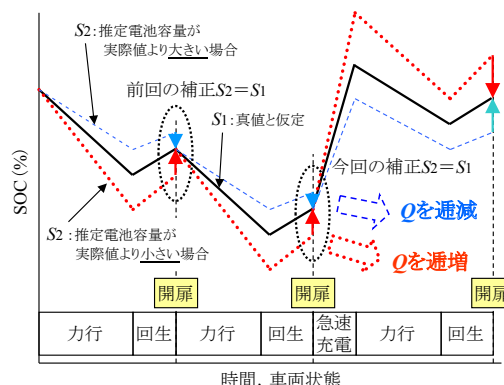


図8 推定電池容量の補正原理

から、 $R_d : R_r$  の比率を62 : 30で固定する。 $R_d, R_r$  が変化して前節の方法で  $R_d$  が自動補正されると、次いで  $R_r$  は前記の比率から  $R_r = 30/62 \times R_d$  として算出される。また、 $C_r = 1190 \text{ F}$  は温度によらず一定とした。

5. 走行試験による推定特性確認

ここでは、走行試験によるSOC推定特性の確認結果について述べる。実用性を評価するための指標として、

- ① 放電量  $D(\text{Ah})$  に対するSOC表示の直線性
- ② SOCの補正時に生じる表示値変動の小ささ

の2点を用いた。SOC推定精度については、本来は真値に対する誤差で評価すべきである。しかし、2章で述べたように、実装状態でSOCの真値を得るのは困難であるため、①を指標とした。また、②の指標を導入したのは、停車中などにSOC表示値が急変するのは、補正のためとはいえ運転支援情報として好ましくないためである。

5.1 走行試験の概況

2009年11月に、JR四国予讃線(多度津～坂出間11.4km)において走行試験を実施した。速度80km/hまでの速度向上、バッテリー単独による走行性能や車体応力の測定を主な目的とし、深夜時間帯の試験ダイヤに従って走行した。バッテリーを深く放電する走行は計4

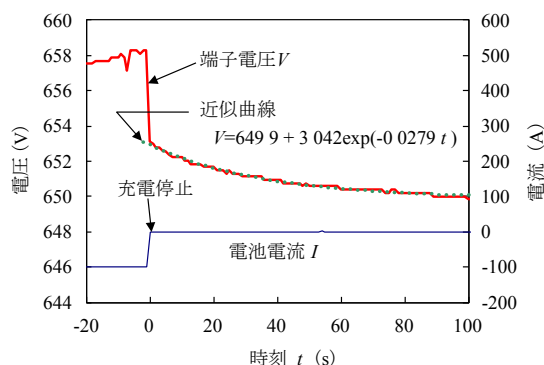


図9 パラメータ取得用の過渡応答波形

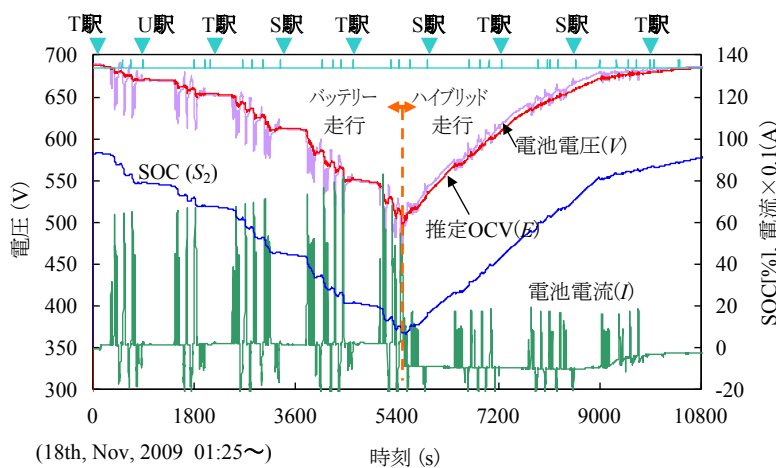


図 10 走行試験全体のチャート

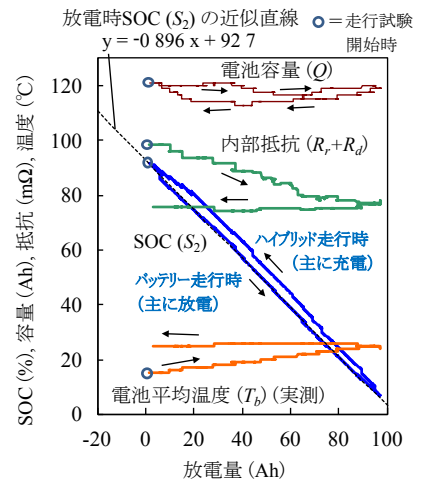


図 11 各パラメータの推定特性

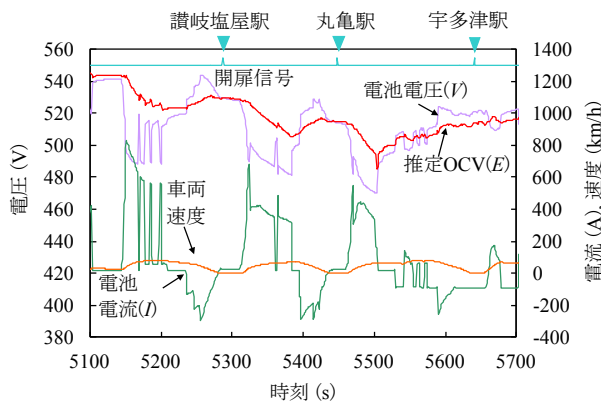


図 12 拡大波形－1

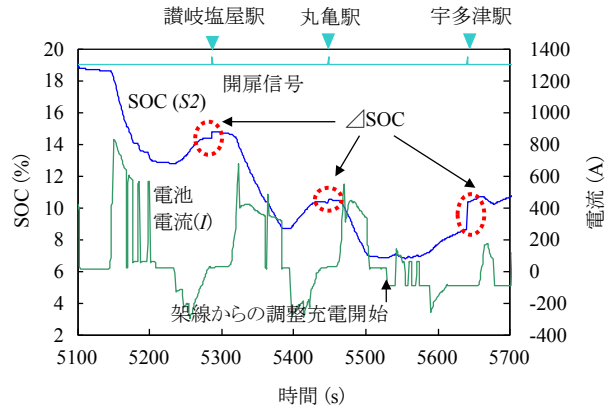


図 13 拡大波形－2

回実施したが、このうち 11 月 18 日のデータに基づいて SOC 推定特性を検証する。

図 10 に全体チャートを示す。チャート上部の駅名は、T：多度津、U：宇多津、S：坂出を表す。多度津駅から出発して 2 往復の走行後、3 往復目の時刻 5500 秒付近（丸亀～宇多津間を力行中）で低電圧保護が作動するまでをバッテリー走行とした。低電圧保護は第 3 群と第 4 群のバッテリーで作動した結果、自動的に第 1 群と第 2 群のバッテリーのみによるモータトルク縮退運転となった。その後速やかにノッチオフとし、惰行中に架線充電開始（ハイブリッド走行への切替）を行った。バッテリー走行終了時点での電池 SOC は 6.8% となった。本来、SOC が 0% となる以前に低電圧保護が作動するのは好ましくない。この点を改善するには、第 2 章で定義した  $SOC = 0\%$  に対応する OCV を高くして使用電圧範囲を再定義すればよい。ハイブリッド走行に切り替えた後は、架線からの充電によって電池 SOC は回復し、ほぼ測定開始時と同程度に至っている。チャート全体を、深く放電・充電した 1 サイクルと捉えることが可能である。

## 5.2 SOC 表示値の直線性

図 11 に各種パラメータの推定特性を示す。時刻 5500 秒までのバッテリー走行時に対応する SOC（右下がりの部分）は良好な直線性を有し、この期間から求めた近似直線（破線）との差は 1.5% 未満である。しかし、ハイブリッド走行時に対応する SOC（左上がりの部分）は弓なりのカーブを描いている。一因として、式 (2) に示す関数  $f(E)$  の実態が放電時と充電時とでわずかに異なる（ヒステリシスを有する）ことが考えられる。式 (2) は放電時の特性から得ているため、充電が支配的なハイブリッド走行時には差異が生じた可能性がある。ハイブリッド走行時の SOC は、バッテリー走行時の近似直線より最大 6.6% 大きく、真値との誤差も同程度となっている可能性がある。この点の改善は今後の課題であるが、充電が支配的な期間でのみ生じる表示誤差であるため、バッテリー切れに直結するリスクは低い。

SOC が 80% から 90% に至る間は時刻約 9000 秒以降の定電圧充電の期間であり、充電電流は次第に減少する。この間に SOC のヒステリシス成分は解消していき、走行試験開始時の SOC プロットに漸近する。

特集：車両技術

5.3 その他パラメータの推定特性

電池平均温度は出庫時に 15℃、入庫時に 25℃まで上昇している。これに応じて電池内部抵抗推定値 ( $R_r+R_d$ ) は次第に減少している。式 (8) の補正による小刻みな増減も行われており、所期の推定挙動となった。

電池容量推定値  $Q$  は 113 ~ 122Ah で推移している。放電時 SOC の近似直線 (図 11) の傾き (-0.896%/Ah) から SOC100%分の放電量 (電池容量の実際値) を算出すると 112Ah となる。推定値  $Q$  はこれに概ね整合しており、妥当な数値に収束したと言える。

図 12 の拡大波形には、OCV 推定値  $E$  の変化も示している。 $E$  の波形は電流急変時に、端子電圧  $V$  の変動の影響をわずかに受けている。しかし、影響がわずかであることに加えて、電流急変直後に OCV が参照されて SOC 補正が実施される可能性は低い。通常、補正タイミングである開扉に至るまでに、車両は駅に向けて減速してくることから、電池電流は緩やかに減少してくるためである。このため、OCV の推定誤差が問題になる可能性は低い。

5.4 SOC 表示値変動の発生状況

図 13 の拡大波形に SOC 表示値の波形を示す。時刻 5640 秒付近で補正した際の SOC 表示値変動の絶対値 ( $\Delta$ SOC) は約 2% となっている。このようにバッテリー走行からハイブリッド走行 (架線からの充電) に切り替わった直後には  $\Delta$ SOC が大きくなる場合があった。この理由としては、前述した  $f(E)$  のヒステリシス性が考えられる。

図 14 に、測定期間中に発生した全  $\Delta$ SOC の度数分布を示す。開扉信号入力時の SOC 補正は計 35 回実施され、 $\Delta$ SOC の平均値は 0.59%、最大値は 2.08% であった。0.5% 程度の SOC 変動は実用上問題にならないが、まれに生じる 2% 近い変動は運転支援情報の精度として不十分な場合も想定される。さらなる  $\Delta$ SOC の低減については今後の課題としたい。

6. まとめ

バッテリー駆動型の車両には、自動車の燃料計に相当する電池の残量計が必要である。残量の指標である充電率 (SOC) は、バッテリー走行時の残走行可能距離の把握や、満充電の確認等に活用される重要情報である。本研究では、架線・バッテリーハイブリッド電車のリチウムイオン電池 (600V-120Ah) 用に SOC 推定手法を開発し、走行試験での実測データに基づいて推定特性を確認した。その結果、以下に示すように、実用上ほぼ問題のない安定した SOC 推定特性を確認することができた。

- 1) 放電量に対する直線性 (放電時近似直線との差)

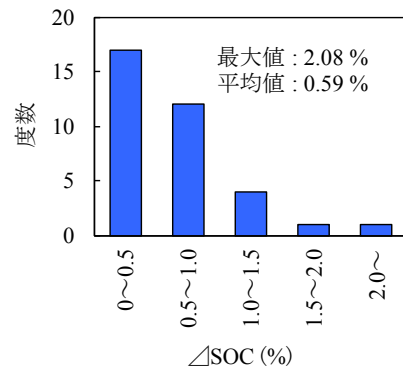


図 14 発生した SOC 表示値変動の度数分布

- ・放電主体のバッテリー走行時：最大 1.5% の差
- ・充電主体のハイブリッド走行時：最大 6.6% の差

2) SOC 表示値変動：平均 0.59%，最大 2.08%

また、劣化指標として重要な電池内部抵抗および電池容量についても同時に推定可能であり、いずれも妥当な推定特性であることを確認した。

謝 辞

本研究は経済産業省からの交付金を原資とし実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして、NEDO 技術開発機構との委託契約に基づき実施した。走行試験の実施と推定手法の実装に際しては、四国旅客鉄道株式会社と株式会社ジーエス・ユアサの関係者に多大なるご尽力を頂いた。心より感謝の意を表す。

文 献

- 1) 小笠・田口：「複電圧架線ハイブリッド型の電力変換回路と制御法の開発」, 鉄道総研報告, Vol.22, No.9, pp.29-34, 2008
- 2) 田口・小笠：「架線・バッテリーハイブリッド LRV (架線レス LRV) 搭載リチウムイオン電池の SOC 推定試験結果」, 2008 年電気学会産業応用部門大会, 3-17, pp. III 183-186
- 3) 小笠・田口・大江・廿日出・末包・門脇・仲村：「架線・バッテリーハイブリッド LRV (架線レス LRV) の軌道線走行試験結果概要」, 2008 年電気学会産業応用部門大会, 3-18, pp. III 187-190
- 4) 小笠・田口・門脇・仲村・大江・末包・脇谷：「架線レス LRV の JR 線走行時の消費エネルギー」, 2010 年電気学会全国大会, 5-070, pp.119-120
- 5) 乾・渡邊・小林：「リチウムイオン二次電池の電圧過渡応答の数値シミュレーション」 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.5, pp.532-538, 2006
- 6) 宮本・森本・森田：「架線レス電車用の電池のオンライン SOC 推定法」 電気学会論文誌 D, Vol.129, No.2, pp.201-206, 2009