

車両駆動用蓄電池の簡易な劣化推定手法

車両制御技術研究部 駆動制御研究室
副主任研究員 門脇 悟志

1. はじめに

リチウムイオン二次電池の性能向上により、鉄道車両にもその適用が検討され、2014年3月からはJR東日本烏山線のバッテリー電車EV-E301系で実用化に至り、今後さらなる導入に向けた計画が進んでいる。これまで筆者らは、電池寿命の予測に主眼をおいた放電深度を考慮したサイクル寿命予測法や⁽¹⁾、電池ユーザー視点に立った温度、SOC (State Of Charge: 充電状態) の変動に対応する容量減少推定法などを提案している⁽²⁾。

一方で、鉄道車両が検査に供される機会は限られる。そのため、バッテリー電車がより広く普及するにあたり、編成毎に異なる日々の運用の中で電池の劣化状態を把握しておくことが望まれる。そこで、本発表では更に簡便さに主眼をおいた容量減少率を推定する手法を提案する。

2. 電池の特性把握試験

2.1 供試電池モジュール

今回試験では、図1に示すリチウムイオン電池モジュール（公称電圧3.2V、使用範囲2.4V~4.0V、30Ahセル×8直列）を計2モジュール使用する。これまでにモジュールNo.1には急速充電を含む電流パターンで通電し、モジュールNo.2には急速充電を含まない緩慢充電のパターンで通電しており、各モジュールにおいて通電履歴が異なっている。

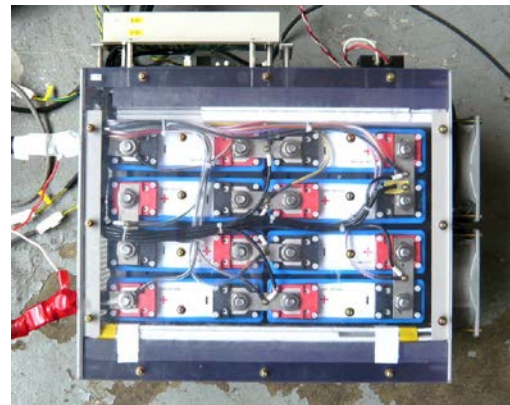


図1 供試電池モジュール

2.2 等温保管試験

充電した電池を保管すると、OCV (Open Circuit Voltage: 開回路電圧) は次第に減少することが知られている⁽³⁾。リチウムイオン電池はアルカリ電池などの他種の電池と比べてこの自己放電が少ない。そこで、通電終了直後に生じる過渡的な電圧変化も自己放電に含めて取り扱う。ここでは、保管温度と経過日数 t [days] に対する充電直後のOCVからのOCVドロップ電圧 ΔE の変化に着目する。図2に一例としてSOC80%まで充電後、保管温度35°Cにおける約1ヶ月間のOCVドロップの推移を示す。各モジュール3回、次節に示す容量減少率別に整理した。等温保管試験は、温度35°C、40°C、45°Cについて各モジュール計10回実測した。

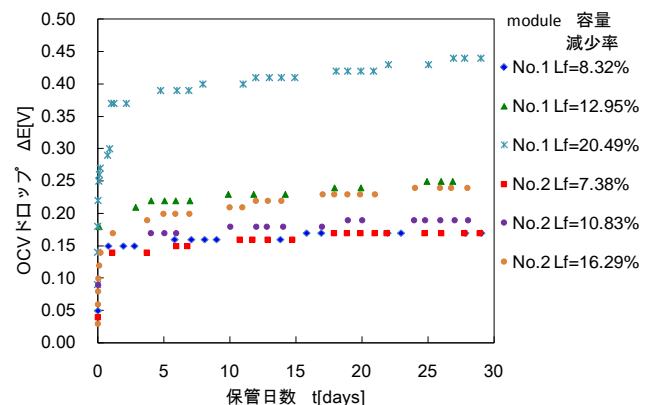


図2 35°C保管時のOCVドロップ

2.3 容量測定試験

約1ヶ月間の等温保管が終了した時点で電池の容量測定を実施した。実施方法は、30A一定で放電させた際の電圧カーブから電池容量を求める。モジュールNo.1の電圧カーブを図3に示す。横軸は時間ではなく放電量Ah(放電電流の時間積分値)としている。図3より、いずれの電池も新製時から徐々に放電に対して電圧の低下が早まっている。電池容量が減少していることが明らかである。ここで、電池容量をより定量的に評価するため、実際の使用範囲に適した通電中の電池電圧が26.5Vから21.0V(セル電圧

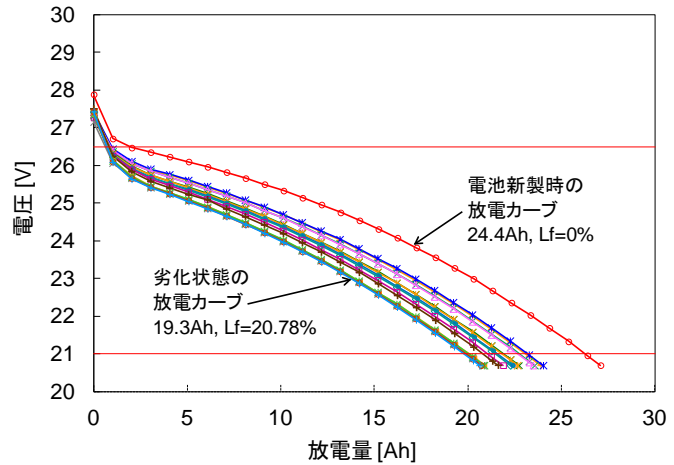


図3 モジュールNo.1容量試験時の放電カーブ推移

3.3125V~2.625V)になるまでの放電量を区間放電量と定義し、その値で電池容量を求めている。

毎回同一の環境でこのような容量試験を実施すれば、正確に電池容量を測定できる。しかし、これには時間と装置が必要となるため、本発表ではより簡便な方法を提案する。

3. 容量減少率と自己放電特性の対比

3.1 容量減少率と線形自己放電係数の関係

図2において、 ΔE について式(1)で線形近似する。このときの傾き a_{li} を線形自己放電係数と定義する。

$$\Delta E = a_{li} t + b_{li} \dots \dots \dots (1)$$

図4は実測した容量減少率 L_f と、保管試験により取得した線形自己放電係数 a_{li} の関係を保管温度、電池モジュール毎に整理した結果である。温度に依存して、容量の減少率の増加とともに線形自己放電係数も増加する傾向が確認できる。また、モジュールNo.1とモジュールNo.2を比較すると、急速充電履歴の有無は影響しないとも読みとれる。

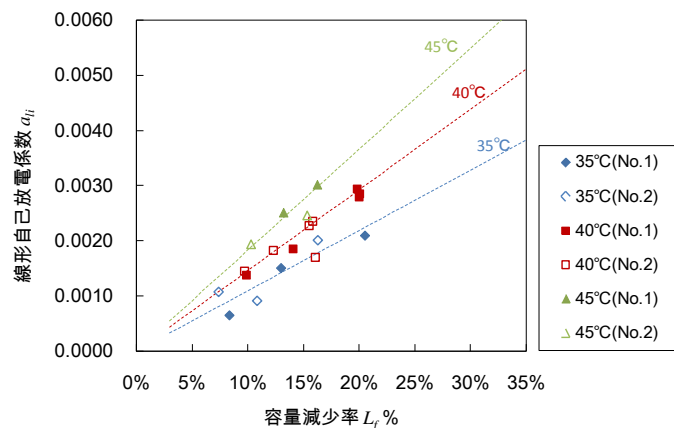


図4 容量減少率と線形自己放電係数の関係

3.2 容量減少率と対数自己放電係数の関係

次に、図2において、 ΔE について式(2)で対数関数によって近似する。このときの係数 a_{lg} を対数自己放電係数と定義する。

$$\Delta E = a_{lg} \ln(t) + b_{lg} \dots \dots \dots (2)$$

図5は図4と同様に実測した容量減少率 L_f と、保管試験により取得した対数自己放電係数 a_{lg}

の関係を保管温度，電池モジュール毎に整理した結果である。容量減少率の増加とともに対数自己放電係数も増加する傾向は図4と同傾向だが，温度依存性は弱いため同一の近似直線を適用可能である。

4. 容量減少率の簡易推定による劣化判定

4.1 線形自己放電係数に基づく容量減少率推定

線形自己放電係数 a_{li} を容量減少率 L_f ，保管中の電池温度 T_b の関数として式(3)で表せるものとし，最小自乗法によって係数 p, q を求める。

$$a_{li} = L_f (p + q T_b) \dots\dots\dots (3)$$

全20プロットから最小自乗近似すると， $p = -1.67 \times 10^{-2}$ ， $q = 7.83 \times 10^{-4}$ と求まる。ゆえに，等温環境で一定期間電池を保管することで得られる a_{li} と，電池の温度 T_b を式(5)に代入することで容量減少率 L_f を推定することができる。

$$L_f = \frac{a_{li}}{7.83 \times 10^{-4} T_b - 1.67 \times 10^{-2}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

なお，図4中の破線は，式(4)で35, 40, 45℃における近似線である。例えば，ある電池の寿命を初期容量の7割と想定していれば，電池の温度 T_b とOCVドロップ電圧 ΔE を測定しておき線形自己放電係数 a_{li} を算出した結果， $T_b = 40^\circ\text{C}$ において $a_{li} = 0.0044$ 程度が得られれば「寿命」と簡易判定することができる。

4.2 対数自己放電係数に基づく容量減少率推定

対数自己放電係数 a_{lg} を容量減少率 L_f の関数として式(5)で表し，最小自乗法によって係数 r, s を求める。

$$a_{lg} = r L_f + s \dots\dots\dots (5)$$

全20プロットから最小自乗近似すると， $r = 2.04 \times 10^{-1}$ ， $s = -4.15 \times 10^{-3}$ と求まる。よって，式(6)に代入することで容量減少率 L_f を推定することができる。

$$L_f = \frac{a_{lg} + 4.15 \times 10^{-3}}{2.04 \times 10^{-1}} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式(6)は電池の温度が適合範囲であれば，式(4)と異なり保管温度を考慮する必要がない点で簡便である。図5は，式(6)を用いた L_f の推定線と実測点のグラフである。前節同様に，ある電池の寿命を初期容量の7割と想定していれば，対数自己放電係数 a_{lg} を算出した結果， $a_{lg} = 0.057$ 程度が得られれば「寿命」と簡易判定することができる。なお，図5からはモジュールNo.1とモジュール

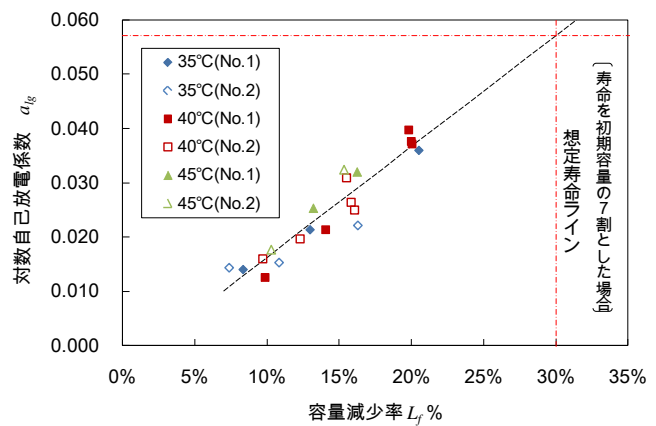


図5 容量減少率と対数自己放電係数の関係

ル No.2 に明瞭な差はなく、急速充電履歴の有無は、ほぼ影響しないと読みとることができる。

4.3 対数自己放電係数に基づく劣化判定手法

図 6 は、モジュール No.2 を 35°C で等温保管した際のデータについて、横軸に保管日数の対数、縦軸に OCV ドロップ電圧 ΔE としたグラフである。

この結果より、約 1 ヶ月をかけて求めた容量減少率と数時間で求めた容量減少率は、それほど大きく乖離しないことが確認できる。すなわち、容量減少率の概算値つまりおおよその劣化状態を得る程度であれば、充電電流の遮断後数時間で容量減少率を求めることができる。そのため、日々の運用を終えて夜に車庫に戻ったバッテリー電車が充電を行い、電流遮断後に翌朝の出区点検までの OCV を逐次計測することで OCV ドロップ電圧 ΔE がわかり、式(2)を整理することで a_{lg} を求めることができる。その結果、得られた a_{lg} から容量減少率すなわち劣化状態を簡易推定できる可能性がある。

なお、電池型式毎に r, s の値を予め把握しておけば、今回用いた供試電池モジュール以外にも応用可能と考える。

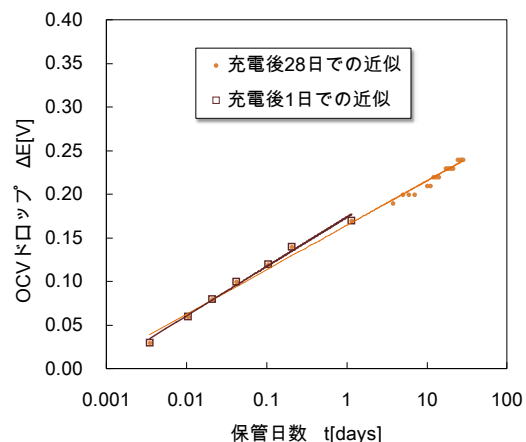


図 6 保管日数の対数に対するドロップ

5. まとめ

本発表では、保管温度 35~45°C の範囲におけるリチウムイオン電池の自己放電特性を整理、分析した。線形自己放電係数 a_{li} は、容量減少率 L_f 、保管中の電池温度 T_b の関数として表せるものと仮定して最小自乗法により容量減少率推定式を求めた。また、同様に対数自己放電係数 a_{lg} は、容量減少率 L_f の関数として表せるものと仮定して最小自乗法により容量減少率の推定式を求めたことで、簡易的に電池の容量減少率を推定する方法を明らかにした。

今後は電池 SOC 状態の違いや、低温での特性把握を進め、容量減少率推定法の実用性を向上させたいと考えている。

参考文献

- (1) 米山・田口・小笠・山本：リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法，平成 17 年電気学会産業応用部門大会講演論文集第 3 分冊，p.193-196 (2005)
- (2) 田口・門脇：リチウムイオン電池の温度変動に対応した容量減少推定法と劣化係数測定法の提案，平成 23 年電気学会産業応用部門大会講演論文集第 3 分冊，p.429-430 (2011)
- (3) 齋藤・鹿野・小林：熱測定によるリチウムイオン電池の保存時の劣化反応解析，第 51 回電池討論会講演要旨集，p.72 (2010)