

電力系統用蓄電池システムの健全性評価手法

Method to Evaluate State of Health of Lithium-Ion Batteries Used in In-Service BESS for Electric Power Systems

山本 幸洋 YAMAMOTO Takahiro 波田野 寿昭 HATANO Hisaaki 三ッ本 憲史 MITSUMOTO Kenji

電力系統の周波数変動抑制などの安定化対策として、電力系統用の蓄電池システム(BESS)が設置されている。BESSを構成するリチウムイオン二次電池は、使用に伴い劣化していくことから、その健全性を評価する技術が求められている。しかし、電力系統に連系されたBESSは充放電を繰り返しており、点検時の運用停止を最小化することが求められる。

東芝グループは、リチウムイオン二次電池 SCiB™ を搭載した定置型 BESS を製品化している。今回、運用中の充放電データから SCiB™ セルの健全性を評価できる電圧標準偏差法を開発した。評価専用の充放電パターンを必要としないため、定置型 BESS の運用を停止させることなくタイムリーに健全性評価が実施できる。

The installation of stationary battery energy storage systems (BESS) has recently been progressing for the frequency control of power grid lines. However, as the capacity of the lithium-ion rechargeable battery cells used in these stationary BESS systems is subject to deterioration depending on the conditions of use, there is a growing need for soundness evaluation technologies for lithium-ion rechargeable battery cells. Moreover, because the operation of a BESS system connected to an electric power system is characterized by repeated charging and discharging in short cycles, a strong need also exists to minimize the suspension of BESS systems for inspection purposes.

The Toshiba Group is supplying a lineup of stationary BESS systems equipped with its SCiB™ lithium-ion rechargeable battery cells. We have now developed a voltage deviation method to evaluate the state of health (SoH) of SCiB™ cells from charging and discharging data that can be obtained during the operation of a stationary BESS system. By eliminating the need to obtain charging and discharging patterns specifically for evaluation, this method makes it possible to facilitate timely inspections without suspending operation.

1. まえがき

モバイル端末から利用が始まったリチウムイオン電池は、車載や、定置型、鉄道車両などの社会インフラへと用途を広げてきている。東芝グループは、負極にチタン酸リチウムを使用し、安全性や寿命特性などに優れるリチウムイオン二次電池 SCiB™ を開発し、様々な用途で実績を積んでいる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

社会インフラとして使用される場合は、使用期間が長期化する傾向がある。そこで、電池を安心して使い続けるために、その健全性 (SoH : State of Health) を評価する技術が求められており、これまで種々の手法が開発されている。

一方、変動抑制など電力系統の安定化を目的とする電力系統用の蓄電池システム (BESS : Battery Energy Storage System) で使用される場合は、定期点検時の停止時間を最小化することが望まれる。そこで、評価専用の充放電パターンを必要とせずに、運用中の BESS の充放電データを用いて健全性を評価する電圧標準偏差法を開発した。ここでは、この手法の概要、及び米国で実証中の BESS の評価

結果について述べる。

2. 用途ごとに異なる健全性評価技術

電池の健全性を評価する技術は幾つかあり、用途によって機能要件が異なることが知られている (表1)。

これらの健全性評価技術 (劣化評価技術や残存性能評価技術) は、電池のリユースなどを想定して早くから各所で研究開発が行われている。東芝グループでも、定期点検時に電池の健全性を評価する充電曲線解析法を開発している⁽⁵⁾。また、各種手法の特徴を比較評価した報告⁽⁶⁾もある。これらの多くは、電気化学反応をベースにしたものであり、定電流動作で解析に必要な範囲の充放電を行うか、あらかじめ定められた矩形 (くけい) 波状のパターンで充放電を行って、取得した時系列応答を分析するのが一般的である。したがって、健全性評価を行っている期間は、通常稼働時ではなくオフライン時となる。

一方、周波数などの変動抑制を目的として電力系統に連系される BESS は、短周期の充放電を 24 時間 365 日行って

表1. 用途で異なる健全性評価技術

SoH evaluation technologies by application

用途	電力系統	車載	モバイル端末
ユーザー	送配電事業者 アンシラリーサービス事業者	車のオーナー 車検業者 中古車ディーラー	モバイル端末のユーザー
ユーザーの目的	電力系統の品質確保のためのBESS健全性の確認	車検 転売の際の値付け	ユーザー不便の緩和
評価タイミング	通常稼働時 ⇒オンライン	車検時, EV充電時 ⇒オフライン HEV稼働時 ⇒オンライン	通常稼働時 ⇒オンライン 充電時 ⇒オフライン
主たる定量評価値とユーザー指標	容量⇒受給電力量 充放電効率⇒運用益	容量⇒運行距離 負荷時電圧変動 ⇒出力, 満充電時間	容量⇒利用時間
必須機能要件	稼働データだけで評価 多並列, 多直列での評価	高い評価精度 広範囲な温度対応	多種電池への適用

EV: 電気自動車 HEV: ハイブリッドEV

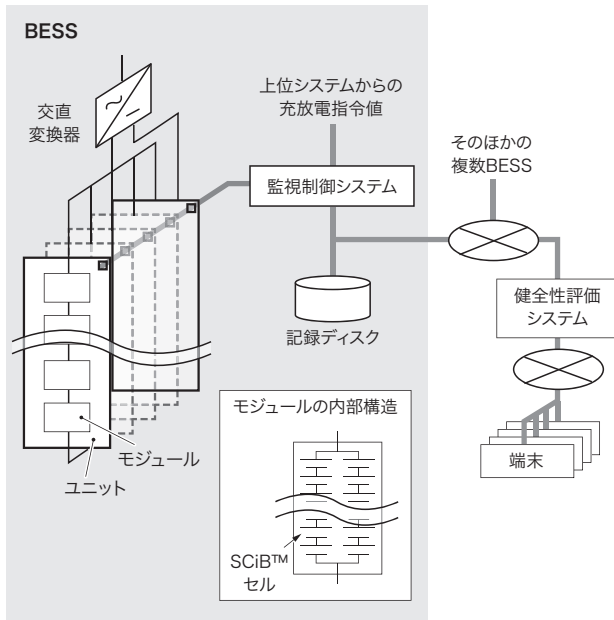
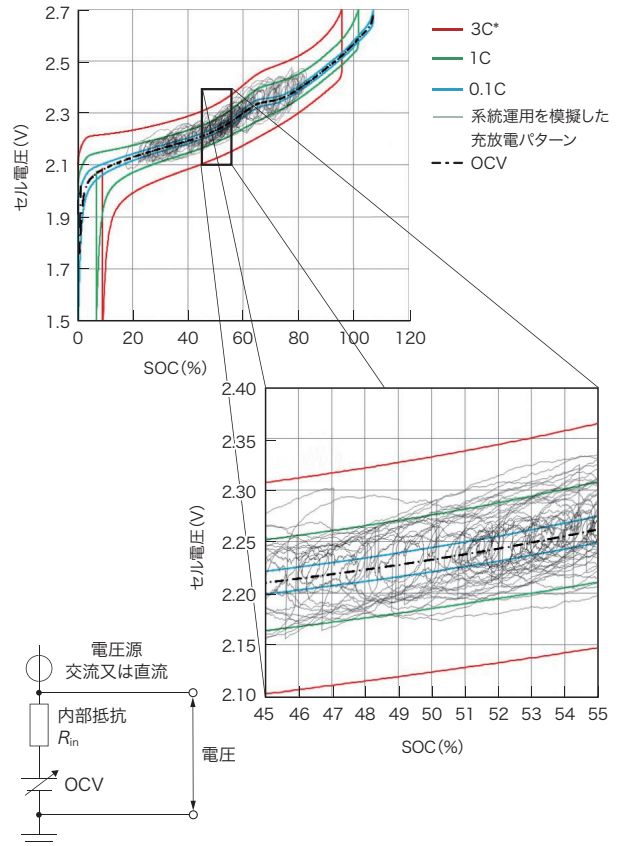


図1. BESSの健全性評価システムの構成例

印加された電力は、多並列、多直列に接続されたセルに電荷として蓄えられる。BESSの動作データは記録され、外部回線を通じ、遠隔で健全性がオンラインで評価できる。

Example of configuration of BESS system to evaluate SoH of SCiB™ cells

いる。したがって、健全性評価は、BESSを停止することなく、通常稼働時の充放電パターンで定量評価できること（オンライン評価）が機能要件となる。BESSの健全性評価システムの構成例を図1に示す。



*Cは、電池の充放電電流値の相対的な比率を表す単位。電流値(A)/容量(Ah)で算出される。例えば、公称容量が10 Ahの電池では、1Cが10 A, 3Cが30 Aの充放電電流値を表す。

図2. 電池の充放電カーブの例

OCVを起点とし、実運用を模擬した充放電指令値に従って流れた電流を、 R_{in} で生じた電圧の軌跡として描けば、充放電中の状態をプロット(QVプロット)できる。

Example of charging and discharging curves of lithium-ion battery

3. 電圧標準偏差法の概要

3.1 基本原理

SOC (State of Charge: 電池セルの充電量で、単位はAh若しくは定格容量で規格化した百分率)とOCV (Open Circuit Voltage: 開回路電圧で、単位はV)の関係はOCV曲線と言う。電池セルに外部から電圧を印加すると、外部電圧とOCVの差によって電流が流れる。このとき電池セルの端子電圧(セル電圧)は、電池の内部抵抗 R_{in} が存在するために、充電時はOCVより上昇した値、放電時はOCVより下降した値が計測される。横軸をSOC、縦軸をセル電圧とした平面上で、充放電中の電池の状態をプロットした軌跡図をQVプロット(図2)と呼ぶことにする。

QVプロットを用いることで、SoHの低下が可視化できる(図3)。SoHが低下すると電圧の分布が広がることを利用して、運用中の電圧計測値からSoHを推定することが可能となる。充放電を繰り返していくと、材料劣化によって R_{in} が増加するため、充放電電力が同じであってもQVプロット上のセル電圧分布は拡大する。この原理を利用し、SoHのオンライン評価手法として開発したのが電圧標準偏差法である(図4)。

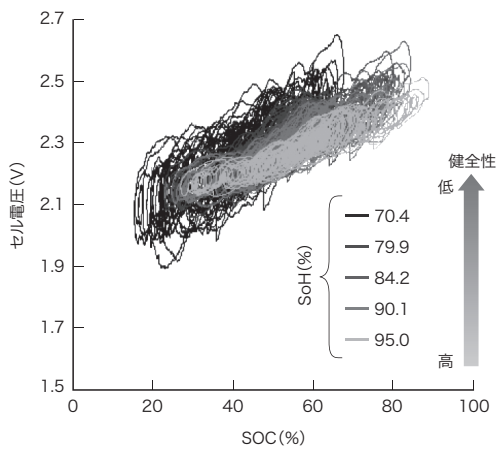


図3. 電池の健全性低下を可視化した例

電力システムの運用パターンをモデル化した充放電データとして、健全性(劣化度合い)の異なるセルを充放電したときのQVプロットを用いると、健全性の低下に伴って電圧の分布が広がっていくことが分かる。

Example of SoH deterioration visualized using charging and discharging data of lithium-ion battery

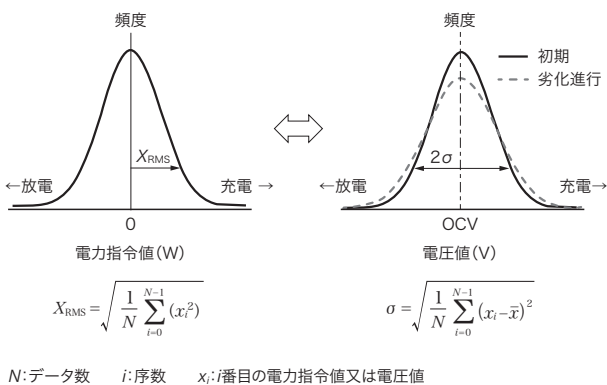


図4. 電圧標準偏差法の原理

OCVをオフセットとみなすことで電力実効値(X_{RMS})と電圧標準偏差(σ)を関連付ける。材料劣化で R_{in} が増加するため、充放電電力が同じでも、QVプロット上のセル電圧分布は拡大する。

Principle of voltage deviation method to evaluate SoH of lithium-ion battery

3.2 電圧標準偏差法によるSoHの評価

電圧標準偏差法を用いた健全性評価の概要を図5に示す。ここでは、充放電電力指令値の分布に従う電圧分布が、電池の劣化に伴い変化していくことを利用している。電池の健全性を定量的に推定するには、充放電指令値、セル電圧、SOCに加え、セル温度も一定周期(例えば、1秒ごと)で取得する。取得したデータを用いたSoHの算出は、所定の期間単位(例えば、1日単位)で行う。

具体的には、当該期間におけるSoHを算出する関数として、参照関数を作成する。参照関数は、当該期間の充放電指令値の実効値(二乗平均平方根値)とセル温度の平均値を用いて決定され、SOCに応じたセル電圧の標準偏差値を独自に統計処理した値を入力として、その期間のSoHを算出するものである。参照関数を作成するには、劣化の程度が異なる(SoHが異なる)複数のセルを用いた充放電実験を行い、あらかじめデータベースを構築しておく。つまり、この手法は、電池の運用データを統計的に処理して健全性を推定する方式である。

この手法では、通常稼働時における充放電の時間間隔と同じオーダーで変化する R_{in} の影響や、電圧の時間応答波形を分析する方式で問題となるような、回路インダクタンスの過渡的な影響を受けず、安定した推定結果が得られる。また、セルからモジュール、ユニットまでスケラブルに適用可能であり、原理的には、SCiB™以外の電池にも適用

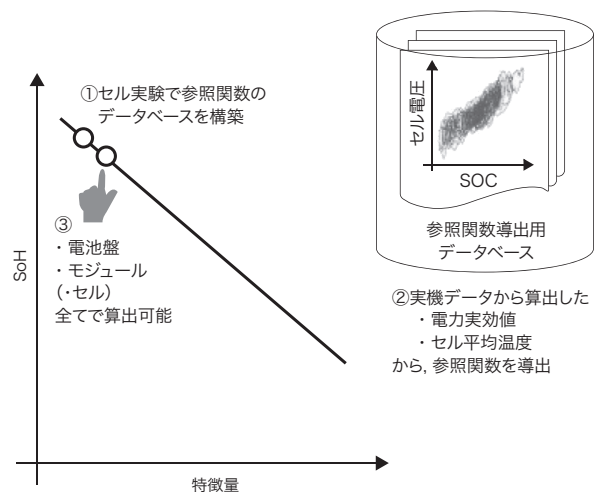


図5. 電圧標準偏差法を用いた健全性の評価

充放電電力指令値の分布に従う電圧分布が、劣化に伴って変化していくことを利用して、健全性を定量的に推定する。

SoH evaluation using voltage deviation method

可能である。

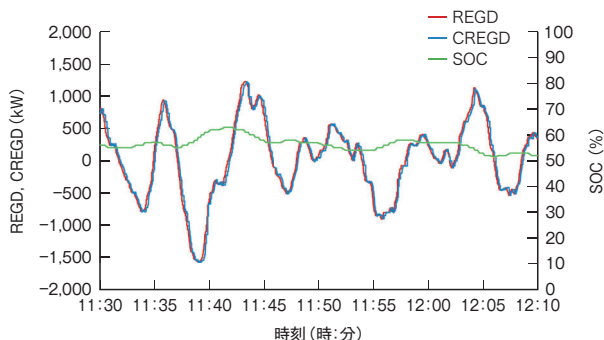
4. 電圧標準偏差法の適用事例

米国の独立系統運用機関であるPJMは、ペンシルバニア州を含む13州及びワシントンD.C.の電力系統と電力市場を運営しており、その周波数調整市場には数多くのBESSが参加している。BESSが受信する2秒周期の充放電電力指令値の履歴はPJMのWebサイトで公開されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、オハイオ州において、デュークエナジー社と共同でSciB™を搭載したBESS(2 MW-785 kWh)の実証を2015年から実施しており、PJMの周波数調整市場に参加して24時間充放電を行っている(図6)。今回、運用開始から900日を超えたこのBESSに、電圧標準偏差法を適用した。

4.1 BESSに適用する際の留意事項

3章では、電池セルを対象として電圧標準偏差法を説明し

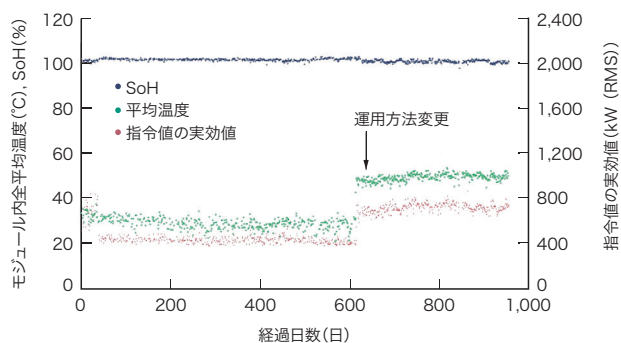


REGD : Regulation Signal(PJMからの信号)
 CREGD : Current Regulation(相互接続点のメーター測定値)
 *国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が公募した「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」の援助を受けて実施

図6. 米国で運用されているBESSとその運用データ

SciB™を搭載したBESS(2 MW-785 kWh)の実証を2015年から実施しており、このBESSに電圧標準偏差法を適用した。

BESS operating in United States and example of actual data



RMS:Root Mean Square

図7. SoHと推定に用いた変数の時系列変化の例

SoHは101.5%から100.3%へ僅かに低下したが、連日の出力ばらつき(RMSe:平方根二乗誤差)は0.58%に抑制できた。これによって、劣化しにくいSciB™の特性が裏付けられた。

Example of time-series variations in SoH and variables for BESS evaluation

たが、実際のBESSは、図1に示したように、複数の電池セルをモジュール化し、それらを直並列に接続した電池ユニットから構成されている。そのため、以下の取り扱いとした。

- (1) セル電圧には、ユニット電圧を用いる。
- (2) セル温度には、代表複数セルの平均値を用いる。
- (3) SOCには、全セルの平均値を用いる。

また、PJMの周波数調整市場で実際に充放電しているときの指令値データの分布は、分析した結果、ほぼ正規性を有しており、図4に示した充放電電力値の条件が満足されていることを確認した。

4.2 結果と考察

毎秒サンプリングで収集される稼働データは、1日単位で保存され、そのデータを用いて健全性を推定した。推定結果の一例を図7に示す。

PJMは、2017年1月に周波数調整市場の運用方法を変更した(図中の“↓”マークの時期)。この変更で、PJM内の各BESSはより大きな充放電運用を求められるようになり、それに伴って電池温度も大きく上昇した。BESSにとっては、電池の劣化が促進される要因になるが、図7に示したように、電圧標準偏差法で推定したSoHに変化は見られなかった。この結果は、別途実施した容量測定試験の結果とも整合しており、劣化しにくいSciB™の特性を裏付けるものと言える。

5. あとがき

今後、太陽光や風力など気象条件によって発電出力が変動する電源の導入が、更に進むと予想される。そのため、

電力の安定供給と品質維持の観点から、需給バランスの調整手段としてのBESSは、更に重要性を増す。

一方、電池の劣化 (SoHの低下) は、徐々にではあるが確実に進行する。東芝グループが開発した電圧標準偏差法は、BESSの利用状態の変化に追従し、オンライン評価で健全性を推定する手法であり、BESSを停止することなく劣化の度合いをタイムリーに捉えることができるので、電力系統用蓄電池システムの保守に好適である。

文 献

- (1) 小林武則, ほか. SCiBを適用した定置型蓄電池システム. 東芝レビュー. 2012, 67, 6, p.48-51.
- (2) 豊崎智弘, ほか. 電力の安定供給を実現する定置型蓄電池システム. 東芝レビュー. 2013, 68, 8, p.14-17.
- (3) 猿渡秀郷, 山本 大. アイドリングストップ車・マイクロHV向け二次電池10Ah級SCiB™. 東芝レビュー. 2016, 71, 2, p.44-47. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/02/71_02pdf/f07.pdf>, (参照 2018-07-25).
- (4) 廣田航介. SCiB™を用いた鉄道車両向け車上蓄電システム. 東芝レビュー. 2016, 71, 4, p.16-19. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/04/71_04pdf/a05.pdf>, (参照 2018-07-25).
- (5) 星野昌幸, ほか. 電池の長期使用を実現する電池診断技術 —充電曲線解析法の有用性とその適用性. 東芝レビュー. 2013, 68, 10, p.50-53.
- (6) 三菱総合研究所. 定置用蓄電池の普及拡大及びアグリゲーションサービスへの活用に関する調査 報告書. 2017, 164p. <http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000479.pdf>, (参照 2018-07-25).



山本 幸洋 YAMAMOTO Takahiro

研究開発本部
研究開発センター
システム技術ラボラトリー
System Engineering Lab.



波田野 寿昭 HATANO Hisaaki

研究開発本部
研究開発センター
システム技術ラボラトリー
System Engineering Lab.



三ツ本 憲史 MITSUMOTO Kenji

東芝エネルギーシステムズ (株)
電力流通システム事業部 電力IoTプロジェクト
計測自動制御学会・電気学会・IEEE 会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.