

蓄電池システムの稼働データを用いた 電池容量推定手法

Battery Capacity Estimation Method Requiring Only Operation Data of Battery Energy Storage Systems

水谷 麻美 MIZUTANI Mami 木内 麻紗子 KIUCHI Masako ミツ本 憲史 MITSUMOTO Kenji

長期使用を前提とする社会インフラ向け蓄電池システムでは、蓄電池の劣化状態を経時的に把握して、最適な時期に保守を行うことで、機能を維持することが必要である。広範囲なSOC（State of Charge：充電状態）で運用される電力系統用途での劣化判定には、電池容量の推定が重視される。

そこで、東芝グループは、通常運用中の蓄電池システムの稼働データだけを用いて電池容量を推定する手法を開発した。この手法では、電池固有の特性情報や、運用を中断して特定パターンの充放電運転でのデータ取得などが不要なことから、ユーザーは保守時期の最適化や運用コストの低減を図ることが可能になる。稼働中の太陽光発電の変動抑制用蓄電池システムで取得した電池容量の実測値と推定値はよく一致し、交流連系蓄電池システムで直流電流値が取得できない場合でも、交流電力値を用いて電池容量を推定できることから、この手法の実用性が確認できた。

Battery energy storage systems (BESS), which play a key role in social infrastructure, are expected to provide stable long-term operation. Effective means of grasping trends in battery performance degradation so as to facilitate maintenance at the optimal time are therefore required. Estimation of the capacity deterioration of batteries in BESS systems connected to the power grid, which must respond to a wide range of state of charge (SOC) conditions, is a particular focus of attention.

The Toshiba Group has developed a battery capacity estimation method that requires only the data of BESS systems in operation as input data. This method allows users to optimize the timing of maintenance and reduce operating costs without the need for information on the specific characteristics of the batteries nor for data obtained by specific charging and discharging cycles during the interruption of normal operation. We have applied this method to both an actual BESS system to suppress power fluctuations caused by a photovoltaic (PV) power generation system and a virtual power plant (VPP) system in which multiple consumers' BESS systems are interconnected to an AC power system, and confirmed that the evaluation of battery capacity in both cases is in good agreement with the actual trends. From the results obtained, we have confirmed that the performance of this battery capacity estimation method is sufficient for practical application.

1. まえがき

蓄電池システムは、電力需給バランスの維持やスマートグリッド社会の実現など、分散電源を利用するために核となる重要な技術である。また、気象条件などによって発電出力が変動する再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）電源の導入拡大に伴って、国内外で蓄電池システムの普及が進んでいる。特に、長期使用を前提とした社会インフラ向け蓄電池システムを構築する場合、蓄電池の劣化状態を経時的に観測して把握し、適切なタイミングで保守を行って機能維持を図ることが求められる。蓄電池の劣化状態を把握するための指標としては、“電池容量”と“内部抵抗”の二つがある。一般に、蓄電池の劣化に伴って、電池容量は低下し内部抵抗は増加する。再エネ発電量の変動補償やピークシフトへの対応などを行う電力系統用途では、広範囲なSOCで蓄電池を充放電する運用となるため、電池容量の推

定が重視される。

既に東芝グループでも、蓄電池の劣化判定に関して幾つかの推定手法を開発している^{(1), (2)}。例えば、森田らの手法⁽¹⁾は、電池を構成する部材の劣化にまで分離して推定することが可能である。しかし、特定の充電パターンでのデータ取得が必要であり、その間は、蓄電池システムを本来の用途で運用できない。また、山本らの手法⁽²⁾は、特定の充放電パターンでのデータ取得は不要であるが、電池の劣化状態の教師データが必要となる。

そこで今回、東芝グループは、通常運用中の蓄電池システムの稼働データだけを用いて電池容量を推定する手法を新たに開発した^{(3), (4)}。この手法は、電池固有の特性情報や特定の充放電パターンでのデータ取得が不要で、かつ事前の教師データも不要であるため、実用性が高いと考えられる。

ここでは、蓄電池システムの稼働データとして、蓄電池の

充放電電流（直流電流）を用いた電池容量の推定手法⁽³⁾、及び交流電力を用いた電池容量の推定手法⁽⁴⁾について、それぞれ述べる。また、太陽光発電の変動抑制用蓄電池システムにおける1日分の稼働データを用いた電池容量の推定事例、及び電力系統に連系された蓄電池システムにおける交流電力を用いた電池容量の推定事例について、それぞれの推定手法における妥当性の検証結果についても述べる。

2. 充放電電流を用いた電池容量推定手法

充放電電流の積算値とSOCの相関に基づいて電池容量を推定する手法について、図1の時系列データを用いて説明する。ここで、静定状態は電流が流れていない状態を、非静定状態は電流が流れている状態を示している。

蓄電池の劣化の影響を受けにくい開回路電圧からSOC推定値 S_{EV} を求めるために、まず静定状態を検出して、そのときの S_{EV} を抽出する。次に、過去の静定状態 T_{i-n} 、 T_{i-2} 、 T_{i-1} それぞれから最新の静定状態 T_i までの電流積算値 ΣI ($i-n$)、 $\Sigma I(i-2)$ 、 $\Sigma I(i-1)$ を求める。ここで、 S_{EV} の変化 $DSOC$ (式(1))は、式(2)に示すように、電流積算値を電池容量 $Capacity$ (Ah)で除したものになる。

$$DSOC(T_{i-n}-T_i) (\%) = S_{EV}(T_{i-n}) - S_{EV}(T_i) \quad (1)$$

$$DSOC(T_{i-n}-T_i) (\%) = \sum_{t=T_i}^{T_{i-n}} I(t) \cdot \frac{100}{Capacity} \quad (2)$$

そのため、 $DSOC(T_{i-n}-T_i)$ と電流積算値の間には、図2に示すように T_i を原点とする直線関係(比例関係)が成立し、直線の傾きの絶対値が電池容量に相当する。

したがって、蓄電池システムの運用中に静定状態を検出

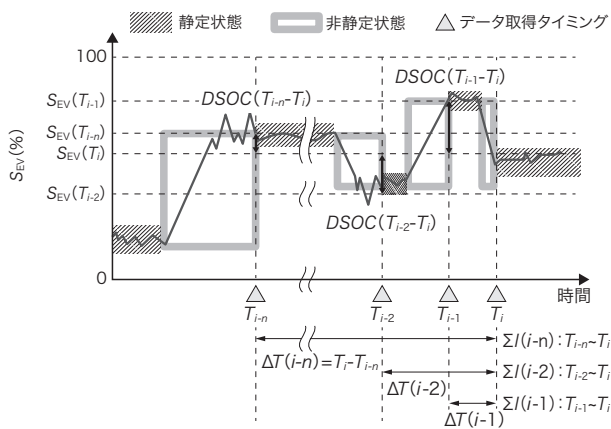


図1. 電池容量の推定に用いる時系列データの例

静定状態では、開回路電圧から S_{EV} を高精度に推定できる。

Example of time-series data for battery capacity estimation

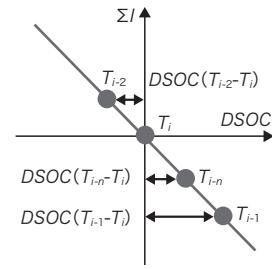


図2. DSOCから電池容量を推定する原理

開発した推定手法は、充放電電流の積算値と $DSOC$ をプロットしたとき、直線の傾きの絶対値が電池容量に相当することを利用する。

Battery capacity estimation using deviation of SOC (DSOC) during operation

し、 $DSOC$ と電流積算値を求めることで、電池容量の推定が可能となる。ここで、 $DSOC$ を横軸に取った場合と、 S_{EV} を横軸に取った場合では、原点は移動するが直線の傾きは維持されるため、図2以降のグラフでは S_{EV} を横軸に取っている。開発した手法では、電池容量の推定に S_{EV} を用いるが、一般に蓄電池の S_{EV} 推定誤差は、 $\pm 5\%$ 程度といわれていることから、今回の電池容量の目標推定誤差も $\pm 5\%$ 以内とした。

3. 交流電力を用いた電池容量推定手法

一般に、電力系統に接続される蓄電池システムは、図3に示すように交流で連系されるが、特に中小型の蓄電池システムでは、蓄電池の直流側の諸量(電流や電圧)を取得できない場合が多い。電力は電流と電圧の積であること、直流電力を交流電力に変換する電力変換器には損失があることから、検出された交流電力の積算値と S_{EV} とは直線的な相関関係が成立しない。

そこで、交流電力を用いた電池容量の推定手法を開発し

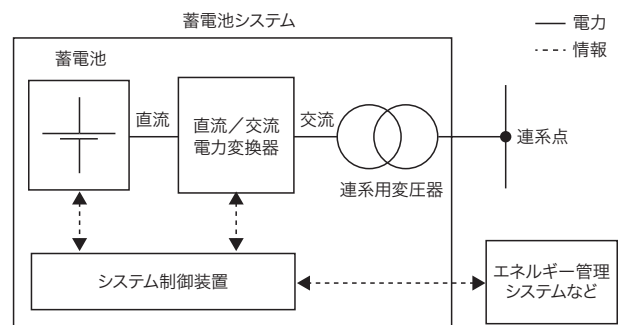


図3. 電力系統に交流で連系される蓄電池システム

一般に電力系統に接続される蓄電池システムは、交流で連系される。

BESS system combined with AC power system

た。開発した手法の詳細を、式(3)を用いて説明する。ここでは、完全放電状態から満充電状態までの電力積算値で表される初期電力容量 (kWh) に対する劣化した電力容量の比率が、電池容量の劣化比率と同等であると仮定して進め、4章でその評価を行う。

今回の手法では、電力変換器の効率 μ を考慮して、検出された交流電力値 Pac に対して式(3)に示すように Pac' に変換する。

$$\begin{aligned} \text{充電時: } Pac' &= Pac \times \mu \\ \text{放電時: } Pac' &= Pac / \mu \end{aligned} \quad (3)$$

この Pac' の積算値 $\Sigma Pac'$ と $DSOC$ には、蓄電池の電圧変動量が含まれるものの、図2と同様に最新の静定状態 T_1 を原点とする直線関係 (比例関係) が成立し、直線の傾きの絶対値が電力容量、すなわち最終的な電池容量に相当する。

4. 開発した電池容量推定手法の適用例

開発した電池容量推定手法を適用した、二つの事例について述べる。一つは、東芝グループの府中事業所に設置された太陽光発電システム及びその変動抑制用蓄電池システム (図4) の事例で、蓄電池の直流電流データを用いて電池容量の推定を実施した。もう一つは、複数の需要家蓄電池システムを統合して運用することを想定したVPP (Virtual Power Plant: 仮想発電所) の事例で、交流電力を用いて電池容量の推定を実施した。

4.1 太陽光発電の変動抑制用蓄電池システムへの適用

図4に示した蓄電池システムは、2010年9月から2020年7月まで無交換で運用されており、電池容量の測定も設置当初から継続的に実施している。今回、電池容量の実



図4. 太陽光発電システムと蓄電池システム

東芝グループの府中事業所に設置された太陽光発電システム、及びその変動抑制用蓄電池システムである。

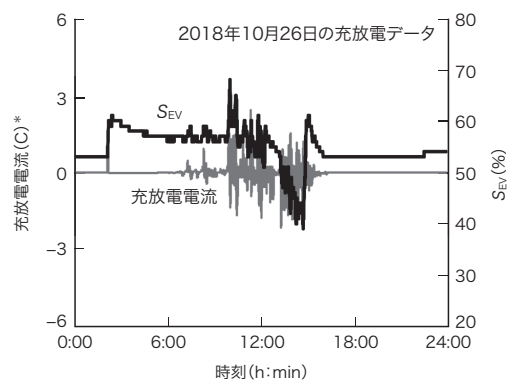
Overview of PV power generation system and BESS system

測結果と開発した手法を用いた電池容量の推定結果を比較した。

図5に、1日分の蓄電池システムの充放電データ例を示す。また、図6に図5の充放電データを用いた電池容量の推定結果を示す。図6の電流積算値は初期電池容量で規格化しており、近似式の傾きの絶対値96.0は電池容量推定値が96.0%であることを示している。9年間の電池容量の実測値と、複数日の充放電データを用いた電池容量推定値との比較を、図7に示す。図7は、実測値と推定値の差を△印でプロットしており、推定誤差は目標の±5%以内であることを確認した。

4.2 交流で連系された蓄電池システムへの適用

電力アグリゲーションビジネスの一つとして、分散配置された複数の需要家蓄電池システムを統合してあたかも一つの仮想蓄電池システムのように扱うVPPがあり、電力自由



* 電流の正值は充電を、負値は放電を表す
Cは、電池の充放電電流値の相対的な比率を表す単位

図5. 蓄電池システムの1日分の充放電データ例

太陽光発電の変動抑制用蓄電池システムにおける、1日分の充放電電流実測データと S_{EV} 推定値データである。

Example of daily charge and discharge data of BESS system

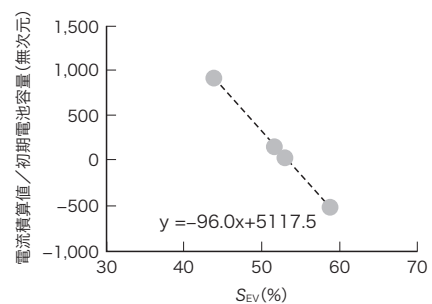
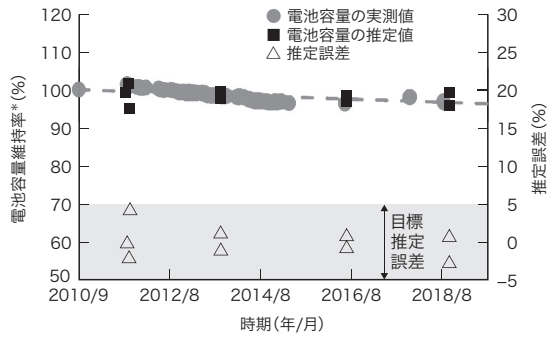


図6. 充放電データから求めた電池容量の推定結果例

図5のデータを用いて、電池容量を推定した。

Example of result of battery capacity estimation using charge and discharge data



* 初期電池容量に対する比率

図7. 電池容量の実測値と推定値の比較

電池容量の実測値と推定値の誤差は、目標の±5%以内で、両者はよく一致していることを確認した。

Comparison of long-term measurement data and estimation results

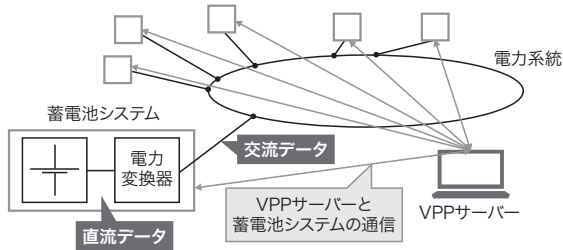


図8. 需要家の蓄電池システムを統合したVPPの構成

複数の需要家の蓄電池システムを統合した、VPPの構成である。

Configuration of VPP system integrating consumers' BESS systems

化に対応した電力リソースとして期待されている。

図8にVPPの構成を示す。VPPでは、運用可能な電力量の把握が重要となるが、現状、蓄電池システムから S_{EV} が提示されるものの、蓄電池の電池容量の低下は提示されない。また、蓄電池システムのVPPへの適用を考えた場合は、上位システムであるVPPサーバーなどで電池容量の低下を把握することも考えられるが、多数の蓄電池システムと上位システムとの間で多くの通信項目や短い通信周期を確保することは難しい。ここでは、通信項目として直流側の蓄電池の電流・電圧情報が得られず、交流側の電力情報だけが得られる状況を想定した。また、通信周期は、4.1節の検討ではデータ取得周期120msであったが、ここでは、表1に示すように60sを想定した。

交流電力を用いて電池容量を推定する手法の妥当性を、交流・直流両方のデータが得られる5か所の施設で、需要家蓄電池システムについて評価した。3章で述べたように、電力変換器の効率を考慮して電池容量の推定演算を行った。施設番号1の推定結果を、図9に示す。 μ を適用する

表1. 需要家蓄電池システムの主な仕様

Main specifications of consumers' BESS systems

施設数	運用年数	電池容量	公称電圧	電力容量	データ取得周期
5か所	4年	80 Ah	193 V	15.4 kWh	60 s

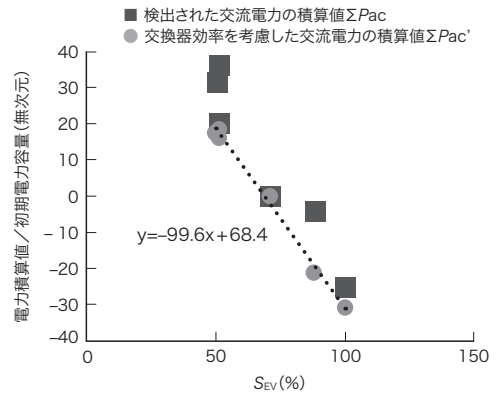


図9. 変換器効率を考慮した交流電力を用いた電池容量の推定結果例

検出された交流電力の積算値に対し、変換器効率を用いて換算することで、交流電力を用いた電池容量の推定が可能となる。

Results of battery capacity estimation from AC power taking efficiency of power converter into consideration

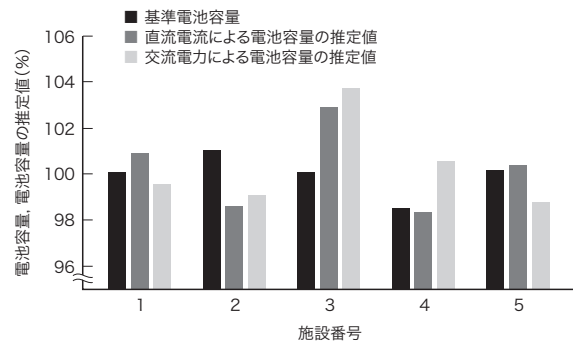


図10. VPPを構成する各蓄電池システムの基準電池容量、及び直流電流と交流電力による電池容量の推定結果

VPPを構成する各蓄電池システムについて、基準電池容量を算出するとともに、直流電流と交流電力を用いてそれぞれ電池容量を推定した。

Results of estimations of battery capacity and battery power capacity of each consumer's BESS system from DC current and AC power

ことで、直線性が確保できることが確認できる。近似式の傾きの絶対値から、電池容量推定値は99.6%であり、この結果から、蓄電池の電圧変動量の影響は小さいと考えられる。

基準電池容量、直流電流による電池容量の推定結果、及び交流電力による電池容量の推定結果を、図10と図11に示す。ここで、基準電池容量は、電流積算によって得ら

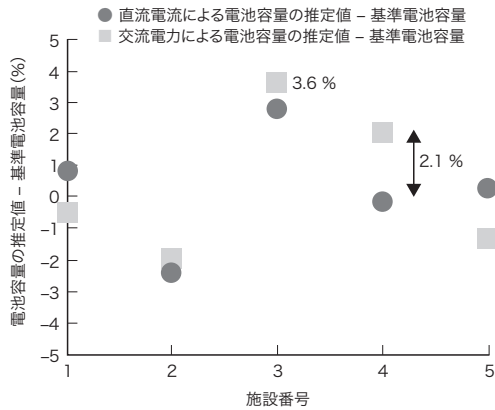


図11. 基準電池容量に対する直流電流と交流電力による電池容量推定値の差

それぞれの推定誤差は、目標の±5%以内であることが確認できた。

Differences between reference battery capacity and battery capacity estimated from DC current and AC power

れた電池容量とした。直流電流による電池容量推定値と交流電力による電池容量推定値の差は最大2.1%、基準電池容量に対する推定値の差は最大3.6%であり、どちらも目標推定誤差±5%以内であることが確認できた。これらの結果から、交流電力データによる推定結果が直流電流データによる推定結果とほぼ同等であり、データ取得周期を60sに延伸した場合でも、蓄電池の劣化診断が可能であることが分かった。

5. あとがき

一般的な蓄電池システムで取得可能な電力あるいは電流や S_{EV} などの情報を用いて、電池容量を推定する手法を開発した。開発した手法は、蓄電池固有の特性情報や特定パターンでの充放電運転データなどの取得を必要としないため、簡便で実用性が高いと考えられる。また、通常運用中の蓄電池システムの稼働データから劣化状況を把握できるため、点検・保守の最適化が可能となる。更に、蓄電池システムのオーナーにとっても、長期間の運用コストを低減できるメリットがある。

今後、開発した手法における新たな展開として、蓄電池システムの監視制御装置への組み込みに加え、遠隔保守などの幅広いアプリケーションやサービスへの適用拡大を図り、蓄電池を長期間にわたって安心・安全に利用できる社会の実現に貢献していく。

文献

- (1) 森田朋和, ほか. 内部状態の推定により電池の健全性を可視化する充電曲線解析法. 東芝レビュー. 2013, 68, 10, p.54-57.
- (2) 山本幸洋, ほか. 電力系統用蓄電池システムの健全性評価手法. 東芝レビュー. 2018, 73, 6, p.46-50. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2018/06/73_06pdf/f01.pdf>, (参照 2020-03-02).
- (3) 水谷麻美, ほか. “蓄電池長期運用と電池容量測定・推定の推移”. 平成31年電気学会全国大会講演論文集. 札幌, 2019-03, 電気学会. 2019, 7-033, p.49-50. (DVD-ROM).
- (4) 木内麻紗子, ほか. “SOC差を用いた蓄電池容量推定手法の交流連系蓄電池システムへの適用検討”. 令和元年 電力・エネルギー部門大会論文集. 広島, 2019-09, 電気学会. 2019, 230, p.6-3-5 ~ 6-3-6. (CD-ROM).



水谷 麻美 MIZUTANI Mami, D.Eng.
東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター
電機応用・パワーエレクトロニクス開発部
博士(工学) 電気学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



木内 麻紗子 KIUCHI Masako
東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター
電機応用・パワーエレクトロニクス開発部
電気学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



三ツ本 憲史 MITSUMOTO Kenji
東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・アグリゲーション
事業部 蓄電・エネルギーマネジメント技術部
電気学会・計測自動制御学会・IEEE 会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.