

一般論文

過渡現象を利用するリチウムイオン電池の劣化診断技術の定置用蓄電池システムへの適用

Application of Deterioration Diagnosis Technology of Lithium-ion Battery Using Transient Phenomena to Battery Energy Storage System

大嶋 涼 吉田 翔治
R. Ohshima S. Yoshida
沖田 優斗 長岡 直人
M. Okita N. Nagaoka

概要

再生可能エネルギーの有効利用や災害時の電力供給を目的として、リチウムイオン電池を適用した定置用蓄電池システム（BESS）の導入が拡大しつつある。充放電や経年に伴い劣化していく蓄電池の健全性や特性を把握することはシステムを運用していく上で非常に重要であり、オンサイト&リアルタイムで蓄電池を診断することを目的に、電池固有の過渡応答特性に基づく電池劣化診断技術を同志社大学との共同研究で開発中である。本稿では、過渡応答特性に基づく電池劣化診断法の特長とBESSへの適用技術と検討結果について紹介する。

Synopsis

Battery Energy Storage Systems (BESS) using lithium ion batteries are expanding for the purpose of effective use of renewable energy or power supply in the event of a disaster. Understanding of the soundness of the battery, i.e., the deterioration due to charging/e discharging and aging is extremely important for a stable operation of the system. To realize an on-site and real-time diagnosis a detecting technology of the battery deterioration based on transient responses of the battery is being researched and developed with Doshisha University. This paper introduces the features of the battery diagnosis method based on the transient characteristics, and a technique for practical application of the method to BESS.

1. はじめに

地球温暖化対策における温室効果ガス削減への意識の高まりにより、再生可能エネルギーの有効利用や主力電源化への取り組みが進んでいる。また、頻発する自然災害に対応するため、電力供給を維持する電力レジリエンスの強化が求められている。太陽光発電や風力発電は発電電力が天候に大きく左右されるため、発電電力の有効活用には蓄電池の充放電による調整が欠かせず、停電時の電力供給に対しても蓄電池が重要となる。

再生可能エネルギーの発電電力を蓄電池による充放電で調整するような用途では、サイクル特性や自己放電特性、入出力特性等に優れるリチウムイオン電池が適用されることが多い。一方、化学電池であるリチウムイオン電池は、充放電の繰り返しや設置してからの経年でも劣化していくため、その健全性や劣化した特性を把握することは重要である。

本稿では、リチウムイオン電池の劣化診断技術を定置用蓄電池システム（BESS）に適用するための、当社の取り組みについて紹介する。

2. 電池劣化診断技術の開発

2.1 定置用蓄電池システムにおける電池劣化診断

定置用に限らず小型民生用や車載用を含め、リチウムイオン電池の劣化状態を診断することを目的に、多くの手法が試みられている。高精度で蓄電池の劣化状態を把握する手法として最も一般的な手法は、蓄電池の運用を停止し電池特性を直接計測する方法であり、蓄電池をSOC (State of Charge) 100%まで満充電してDOD (Depth of Discharge) 100%で完全放電させた際の放電容量を計測する方法（以下、容量確認試験法）や、蓄電池の直流内部抵抗を計測する方法がある。また、蓄電池に周波数を変化させながら交流電力を重畳させて等価回路上のパラメータをフィッティング解析する交流インピーダンス法が適用されることもある。

しかしながら、容量確認試験法で蓄電池の放電容量を計測するためにはBESSの運用を長時間停止して点検する必要があるため、頻繁に実施することは困難である。また、交流インピーダンス法は個別の電池セルに対して非破壊・高精度で診断出来る優れた手法であるものの⁽¹⁾、BESSで運用中の電池セルを診断のために取り外すことは現実的には困難であり、高周波を発生する交流電源や周波数特性分析器 (FRA) 等の高価な装置が必要となり、同様に適用は困難である。

BESSにおける蓄電池の劣化診断では、BESSの運用を停止せず、オンサイト&リアルタイムで蓄電池を診断することが重要である。我々は、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) における「過渡現象を利用する大規模蓄電システムの非破壊劣化診断技術の開発」⁽²⁾ に注目し、電池固有の過渡応答特性に基づく電池劣化診断技術を同志社大学との共同研究で開発を目指した。

2.2 過渡現象を利用する電池劣化診断技術

リチウムイオン電池を含め蓄電池には固有の過渡応答特性があり、時定数に応じたインピーダンス成分に分離することが可能である。リチウムイオン電池の等価回路に、直流抵抗とRC並列回路、開回路電圧を組み合わせた図1に示す回路モデルを適用し、充放電に伴う電池の電圧電流過渡特性からz変換を用いて回路定数を導出することが出来る。

産業用の大型リチウムイオン電池セルを25℃、SOC50%に調整し、Cレート（電池の容量を1時間で完全放電させる電流の大きさを1Cと定義した換算値）を1.0Cとして10秒間放電し、放電後5分間の電圧値を0.1秒間隔で記録した。

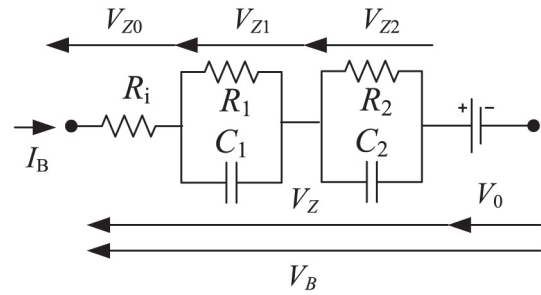


図1 リチウムイオン電池の等価回路

得られた電圧電流過渡特性から図1の等価回路を適用したフィッティング解析により等価回路定数を導出した。導出した等価回路定数により時間に対する過渡応答特性を求め、実測の電圧値と共に図2に示す。電池の過渡応答が良好に再現されており、適用した等価回路及び導出した回路定数が十分な精度を有することが分かった。

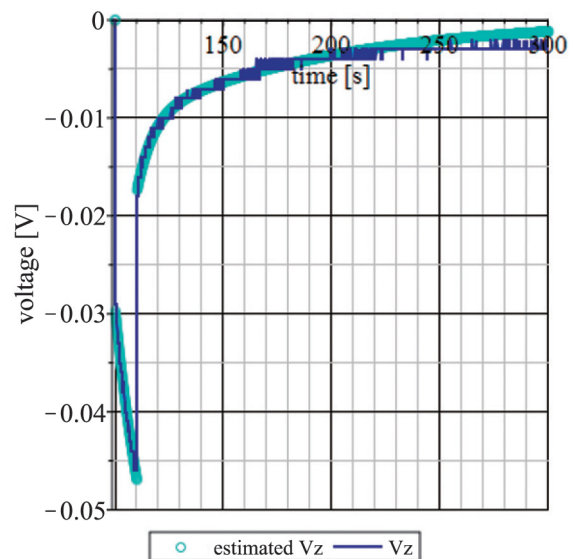


図2 電池放電後の電圧変化と等価回路での推定結果

リチウムイオン電池は劣化に伴い内部インピーダンスが変化することは広く知られている。電池の過渡応答特性に基づいた等価回路により内部抵抗値を導出し、その変化を観察することで蓄電池の劣化診断が可能であり、過渡応答解析法として定置用電池の劣化診断への適用を検討した。

2. 3 電池劣化診断技術の比較

蓄電池の劣化診断技術としては、2.1節に示した容量確認試験法、交流インピーダンス法に加えて、蓄電池を充電又は放電した際の電圧変化を観察する手法（以下、充放電曲線解析法）があるが、充放電曲線を取得するために長期間のシステム運用停止が必要であり、実用的では無い。

一方、オンサイト&リアルタイム性に優れた手法として、蓄電池の放電時の電流容量のみを積算し、公称容量で割ることで疑似的な充放電サイクル数を算出し劣化を推定する手法（以下、容量積算法）がある。本手法は鉛蓄電池の劣化に対しては比較的精度が高いことが経験上知られているが、リチウムイオン電池ではDODやSOC範囲の異なる充放電が劣化に与える影響は大きく異なり、実測されたサイクル寿命と積算容量から算出されたサイクル寿命は一致しない。また、電流計の計測精度によっては電流容量の誤差が大きくなり、電池劣化を高精度で予測することは困難である。

電池劣化診断技術の比較結果を表1に示す。過渡応答解析法はオンサイト&リアルタイム診断で優位性があることが分かる。

表1 電池劣化診断技術の比較

診断技術	診断精度	診断時間	リアルタイム性	コスト
過渡応答解析法	○	◎	◎	○
容量確認試験法	◎	△	△	○
交流インピーダンス法	◎	△	×	×
充放電曲線解析法	○	△	△	△
容量積算法	×	◎	◎	○

3. 電池劣化診断技術のBESS適用

3. 1 太陽光発電出力平滑化充放電パターンでの検証

BESSにおける電池劣化診断において、運用を停止せずオンサイト&リアルタイムで診断が行えることは大きなメリットである。これを過渡応答解析法で実現するためには、2.2節のような矩形波を任意に挿入して充放電させるのではなく、運用中の充放電データの過渡現象から内部抵抗値を算出する必要がある。

産業用の大型リチウムイオン電池セルを25℃、SOC50%に調整し、太陽光発電の発電出力を定格出力

に対して18%/分以下の変動率に抑制するために、蓄電池による充放電で出力を平滑化する太陽光発電出力平滑化用BESSの充放電パターンにより、電池セルの充放電データを0.01秒間隔で取得した。なお、試験を行った充放電装置の仕様から、充放電パターンは上限電流値を充放電共に50Aとした。図3に充放電電流、図4に電池電圧を示す。

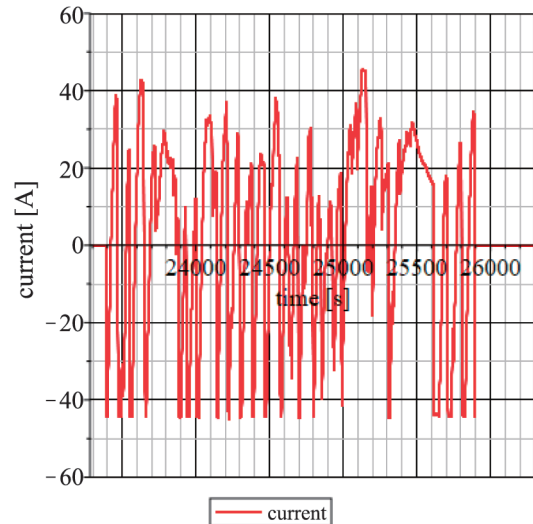


図3 太陽光出力平滑化パターンでの充放電電流

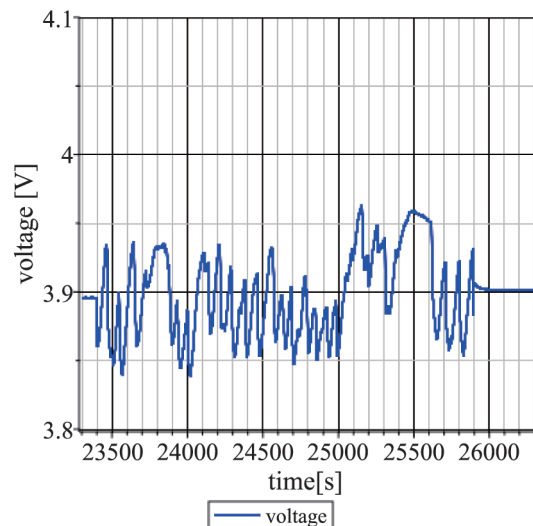


図4 太陽光出力平滑化パターンでの電池電圧

測定開始から200秒間の電圧電流過渡特性を取得し図5の等価回路を適用したフィッティング解析により等価回路定数を導出した。解析における計算時間を短縮するため、RC並列回路は一段とした。また、充放電容量によるSOCの変化に伴う開回路電圧(OCV)の変動を表すため、直列キャパシタCoを適

用した。導出された等価回路定数の中から内部抵抗値である R_i に着目し、 $R_i=0.5746\text{m}\Omega$ であることを確認した。

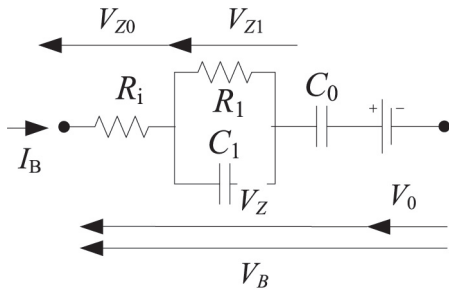


図5 リチウムイオン電池の解析用等価回路

引き続き、同じ種類のリチウムイオン電池セルを加速劣化させた劣化度の異なる電池セルに対して、 25°C 、SOC50%に調整して太陽光発電出力平滑化パターンで充放電データを取得し、過渡応答解析により内部抵抗値 R_i を取得した。また、各電池セルに対して 25°C 、SOC50%に調整して交流インピーダンス法による等価回路解析を実施し、内部抵抗値 R を取得した。図6に、各セルの過渡応答解析法による内部抵抗 R_i と交流インピーダンス法による内部抵抗 R を比較する。

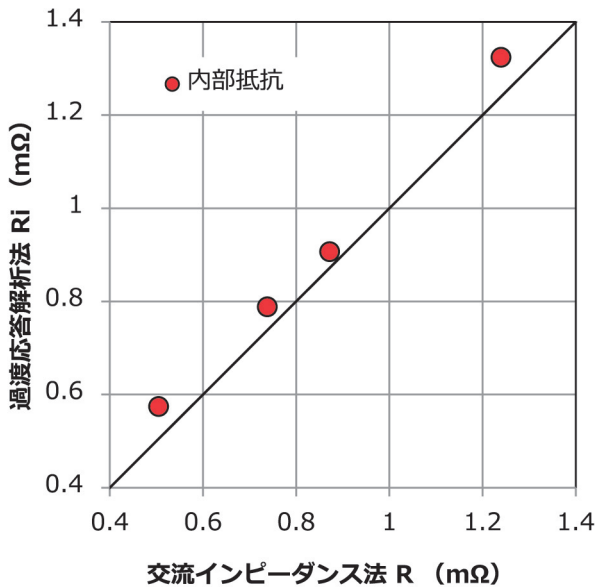


図6 内部抵抗値の比較

劣化に伴いリチウムイオン電池の内部抵抗が増加していることが、過渡応答解析法、交流インピーダンス法の何れの手法でも確認された。それぞれの手法で適用されている等価回路や解析対象時間、サン

プリング間隔等が異なるため、内部抵抗値は完全に同じ値とはならないが、劣化に対する依存性は一致しており、セル毎に両手法の内部抵抗値が比例関係にあることが分かる。これらの結果から、過渡応答解析法による内部抵抗値 R_i の導出により、リチウムイオン電池の劣化を診断出来ることが確認された。

3. 2 過渡現象パターンの抽出条件

前節で、太陽光発電出力平滑化パターンのような激しい充放電を伴うパターンでも過渡応答解析が可能であることが示され、同一のパターンに対して劣化度に応じた内部抵抗値 R_i が導出されることが分かった。しかしながら、実際のBESSの運用においては完全に同一の充放電パターンは存在せず、任意の充放電パターンに対して過渡応答解析を行う必要があるが、蓄電池の劣化状態や温度、SOCが同じであっても充放電パターンが異なる場合、内部抵抗値 R_i は必ずしも同じ値とはならない。このため、過渡応答解析に適した充放電パターンを抽出し、内部抵抗値 R_i のバラツキを抑制することが、その値を比較し電池の劣化診断を行う上で重要である。

蓄電池の過渡現象が確認出来る電流電圧データとしては、充放電が行われていない待機状態から急峻で短時間の充電または放電が発生した後、再び充放電が行われていない待機状態となる矩形波が理想的である。しかしながら、実際のBESS運用において、矩形波の充放電パターンが発生することは非常に稀であり、矩形波に近い急峻な電圧変動を伴う充放電パターンを抽出することが望ましい。

上記課題を解決するため、充放電に伴う電流電圧データに対して、電流値が急変する変動区間を定め、その変動区間の前区間と後区間の三区間に分けて、前区間での安定推移、変動区間での急峻な変動、後区間での安定推移を各閾値で判定するパターン抽出条件を検討した。下記に、具体的な条件を記す。

- ・ 開始点の電流値を I_0 とし、前区間で電流値の変動が α 以下である時間が T_1 以上継続する
- ・ T_1 経過後に変動区間に移行し、 T_3 以内に電流値が I_0 から β 以上変動する
- ・ 変動区間に移行後 T_4 以内に、サンプリング間隔間の電流値変動が γ 以下となる
- ・ 電流値の変動が γ 以下である時間が T_5 以上継続した後区間とする
- ・ 電流値の変動が γ 以下である時間が T_5 未満の場合は変動区間が継続しているものとし、再度 T_4 以内にサンプリング間隔間の電流値変動が γ 以下となり T_5 以上継続しているか確認する

図7に、上記の充放電パターン抽出条件を模式的に示す。本抽出条件を用いて、太陽光発電の発電出力を定格出力に対して18%/分以下の変動率に抑制する為に蓄電池による充放電で出力を平滑化する太陽光発電出力平滑化用BESSの1年間の充放電パターンから、過渡現象パターンの抽出を行った。抽出条件の各閾値を変更することにより、年間で約10～約100パターンの抽出が可能であることが確認された。

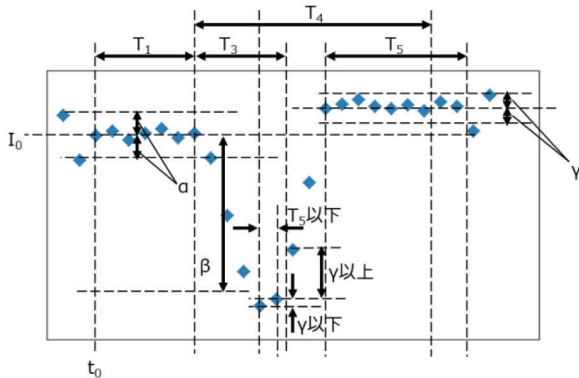


図7 充放電パターン抽出条件

4. まとめ

定置用蓄電池システムに搭載されたリチウムイオン電池の劣化状態を診断する為、蓄電池固有の過渡応答特性から等価回路により内部抵抗を導出する過渡応答解析法による電池劣化診断技術を開発した。過渡応答解析法は、定置用に搭載される産業用大型リチウムイオン電池に適用可能であり、オンサイト&リアルタイム性に優れた手法であることを確認した。

運用中の充放電データから電池劣化診断を行う為、過渡現象パターンの抽出条件を検討し、前区間、変動区間、後区間の三区間に分けて閾値を設定した条件により、太陽光発電出力平滑化用BESSの1年間の充放電パターンから、過渡現象パターンの抽出が可能であることを確認した。今後は、抽出された過渡現象パターンの内部抵抗値を検証していくと共に、その高精度化に取り組んでいきたい。

再生可能エネルギーの有効利用や災害時の電力供給を目的としてBESSの活用が期待されているが、危険物である有機電解液を含有するリチウムイオン電池に対して安全性への懸念が払拭されていない。電池劣化診断技術は、電池の劣化状態を診断するだけでなく、異常を検出する上でも有効であり、当社のBESS及びSPSS^(*) (Smart Power Supply Systems, スマート電力供給システム) への適用を目指していく予定である。

参考文献

- (1) 明神、得永 他：「リチウムイオン電池の劣化要因解析－保存試験後の内部抵抗増加要因－」、JARI Research Journal、20140201
- (2) NEDO平成23年度～平成27年度成果報告書 安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発 共通基盤研究「過渡現象を利用する大規模蓄電システムの非破壊劣化診断技術の開発」(委託先) 学校法人同志社 同志社大学

(*) 「SPSS」は、日新電機㈱の登録商標です。

執筆者紹介



大嶋 涼 Ryo Ohshima
研究開発本部
材料技術開発研究所 グループ長



吉田 翔治 Shoji Yoshida
研究開発本部
材料技術開発研究所



沖田 優斗 Masato Okita
研究開発本部
材料技術開発研究所



長岡 直人 Naoto Nagaoka
同志社大学 理工学部 電気工学科 教授
国際インフラシステム研究センター
センター長