

風力発電出力変動緩和用鉛蓄電池の 寿命・劣化予測モデル

A Model for the Life Prediction of VRLA Batteries for Wind Power Output Stabilization

郡司圭子* Keiko Gunji 小林康弘* Yasuhiro Kobayashi 渡辺雅浩* Masahiro Watanabe

下浦一郎** Ichiro Shimoura 福原啓介*** Keisuke Fukuhara 広瀬義和*** Yoshikazu Hirose 三谷 桂*** Katsura Mitani

風力発電の出力変動緩和用鉛蓄電池の運用条件は多岐にわたる。風力発電の運用条件下において、タグチメソッドを用いて鉛蓄電池の容量低下と電池構成部位毎の劣化を予測するための手法を検討した。これらの検討内容に基づき、電池寿命を予測するモデルを構築するとともに、寿命・劣化予測ツールを開発した。本開発において、鉛蓄電池の充電状態であるSOCを正確に把握することが重要な因子であった。SOCを正確に把握するため、鉛蓄電池の電圧を、電流、SOC、温度から推定する関係式を実験により求めた。得られた関係式および電流の実測積算値を基に、SOCを高精度に推定する手法を新たに開発した。The valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries for wind power output stabilization have been operated under various conditions. The prediction method for the capacity degradation and each component deterioration of VRLA batteries in wind power generation has been examined through the Taguchi method. On the basis of these examinations, a life prediction model has been built and the evaluation method of life and degradations for VRLA batteries has been developed. In this development, a state of charge (SOC) condition for VRLA batteries was one of the most important parameters. In order to evaluate SOC precisely, a voltage of VRLA batteries was to be expressed experimentally as a function of current, SOC, and temperature. Furthermore, by comparing the formula for the function and actual coulombs, a new method of calculations on precise SOC's has been developed.

〔1〕 緒 言

風力・太陽光などの自然エネルギーによる発電設備とともに蓄電池を電力系統に設置し、CO₂の排出を抑制しつつ、高効率で安定的に高品質な電力供給を可能にするスマートグリッドの構築が世界的に広まっている^{1)~3)}。

風力・太陽光などの自然エネルギーは、CO₂削減の観点からのメリットが大きいものの、大きな出力変動を伴うため、蓄電池により出力変動を緩和し、需要に合わせて電力を供給する必要がある。

風力発電設備のライフサイクルと同等の長寿命で安全性・安定性に優れた蓄電池が求められており、新神戸電機㈱では、期待寿命17年(推奨の使用条件下)を見込める風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池“LL1500-W形電池”(以下、LL-W形電池)を開発した⁴⁾。

LL-W形電池の開発は、出力変動緩和用の既納品蓄電池(LL形電池)の調査および同用途を想定したPSOC(半放電状態, Partial State of Charge)ベンチテスト(寿命評価試験, LL形電池で約80種類を試験)のデータ分析等

に基づいて実施した。これら調査を基に、蓄電池の劣化モードを把握し、劣化部の耐久性を向上させることにより、LL-W形電池の長寿命化を実現した⁴⁾⁵⁾。

このような長寿命化電池(LL-W形電池)の開発と並行して、風力発電の出力変動緩和用途で想定される様々な運用条件の組合せと、寿命・劣化の定量的関係の解明および寿命・劣化の関係のモデル化に取り組んでいる。

運用条件と寿命・劣化の関係を予測するモデル(以下、寿命・劣化予測モデル)を構築することで、鉛蓄電池の運用条件を種々の風力サイトで要求および期待される寿命に合わせて最適化することができる。

また、このような鉛蓄電池の運用条件を制御するためには、運用中の鉛蓄電池の充電状態SOC(State of Charge)を正確に把握する必要がある。そこで、温度、電流、電圧に依存して変化する鉛蓄電池の充電状態SOCを、高精度に推定するための手法の構築が必要である。

本報告では、寿命・劣化予測モデルとソフトウェア・ツールの開発、およびその前提となる高精度SOC推定手法について述べる。

*㈱日立製作所日立研究所 **技術開発本部 電池研究開発センタ ***名張事業所

〔2〕 寿命・劣化予測モデル

本報告では、鉛蓄電池の性能（容量低下）判定による寿命予測、および鉛蓄電池の主要劣化要因に着目した電池を構成する部位毎の劣化予測を可能とする、寿命・劣化予測モデルの構築を目標とした。

2.1 寿命・劣化に及ぼす運用条件

鉛蓄電池は、その運用方法により、寿命を迎えるまでの期間が大きく変化する。図1は、鉛蓄電池の運用条件と電池寿命および部位毎の主要劣化要因との関係の例を示す。

鉛蓄電池の運用条件のうち、制御可能であり、かつ寿命・劣化に影響すると考えられるものには、図1の左側に示すような均等充電間隔、目標SOC等の6条件がある。また、劣化要因としては、図1の右側に示す正極格子腐食、正極活物質の泥状化、負極サルフェーション、電解液成層化の4要因が考えられる。

運用上の各条件は、何らかの形で、すべての劣化要因に影響するが、影響が強いと想定されるものについては太線で示した。以下に、各運用条件と劣化要因との関係を説明する。

- ①均等充電間隔：定期的に満充電状態とすることで、長期間、半放電状態で使用する時に起こり易くなる負極サルフェーションや電解液成層化を緩和し、鉛蓄電池の寿命を延ばすことができる。
- ②目標SOC：SOCレベルが高い、あるいは過充電となると、正極格子腐食が加速する。逆に、SOCレベルが低いと、負極サルフェーションが起こり易くなる。
- ③充放電サイクル：充放電のサイクル数が多いと、正極活物質の泥状化、負極活物質の比表面積の低下が進行する。（但し、風力発電出力のような周期が短く電流値が小さい充放電については、LL形電池の劣化に殆ど影響しないことをベンチテストで確認済みである。）
- ④充放電電流値：充放電する時の制限電流が大きいと、電池が発熱し、正極格子の腐食が進行したり、急激な容量低下を起こす可能性がある。
- ⑤温度：使用環境が高温であると、正極格子腐食が促進される傾向がある。

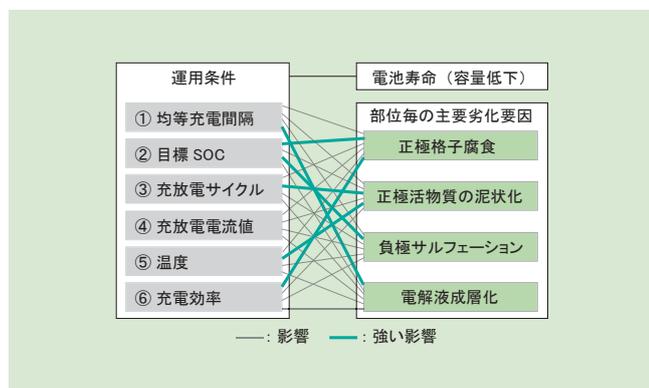


図1 鉛蓄電池の運用条件と電池寿命および部位毎の主要劣化要因との関係

Fig.1 Effect of operation conditions on battery life

⑥充電効率（蓄電池に入れた電力の中で実効的に取り出せる電力の割合、充放電を繰り返すときのSOCの推定に影響を有する）：真の充電効率と電流積算をベースとしたSOC推定に誤差が生じた場合に、SOCを低く判定したときは、過充電となって正極格子腐食が起きる。またSOCを高く判定したときは、過放電となって負極サルフェーションが起こる可能性がある。

2.2 タグチメソッドによる電池の寿命予測モデル

現実の蓄電池の運用に当たっては、単一条件だけでなく、条件の組合せと劣化要因の定量的関係が重要となり、タグチメソッド*は、この関係を効率よく実験的に解明するうえで有効と考えられる。本報では、寿命・劣化に関する知見に基づいて、6項目の運用条件の中で、均等充電間隔やSOCについて詳細化し、使用条件下で一定値と想定できる温度や充電効率を除いて、後述の8項目の制御因子に展開した。

タグチメソッドにより寿命予測モデルを構築する場合、まず要因分析を行い、モデルの設計段階で制御できる要因である制御因子を特定し、それぞれの制御因子が寿命（容量低下）に及ぼす影響の度合いとして要因効果（感度）を求める。このような個々の制御因子についての分析から、運用条件の複雑な組合せにおける影響を調べることができる。図2にタグチメソッドによる寿命予測手法をイメージで示す。図2の例では、制御因子に相当する均等充電間隔を下記(A)、(B)の条件で比較すると仮定する。

- (A) 均等充電間隔：2週間毎
- (B) 均等充電間隔：1ヶ月毎

(A)、(B)を比較した時、入力（電池使用期間）に対する出力（電池容量低下）の感度（ $\beta(A)$ ）と $\beta(B)$ の比が、 $\beta(B)/\beta(A) = 1/X (X > 1)$ であったと仮定すると、(A)の条件に比べて(B)の条件の方が容量低下の影響が $1/X$ に小さくなる。すなわち、(B)の方が容量低下の進行が遅く、寿命がX倍となることが予測できる。以上のように、タグチメソッドを使い、各々の制御因子の感度を調べることで、蓄電池の運用と寿命（容量低下）の定量的関係をモデル化することができる。

* タグチメソッド：技術開発、新製品開発を効率的に行うための開発技法

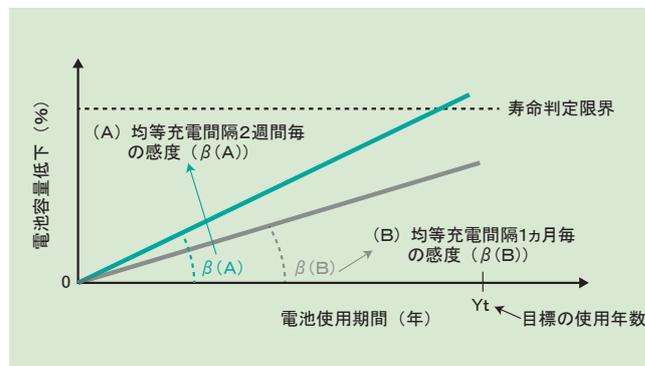


図2 タグチメソッドによる寿命予測（均等充電間隔を制御因子としたときの例）

Fig.2 Battery-life estimation procedure based on the Taguchi method with the equalization-charge interval as control factor

2.3 タグチメソッドによる電池構成部位毎の劣化予測モデル

鉛蓄電池の部位毎の劣化についても、鉛蓄電池の寿命(容量低下)と同様に、予測モデルを構築することが必要である。

表1には、電池の各部位毎の劣化を評価するための、測定項目の例を示す。今回検討する鉛蓄電池は、極板群が高圧迫で保持されている制御弁式鉛蓄電池であり、この電池は設置中ほとんど振動が加わらないことから、正極活物質の泥状化についての影響は小さいと考えられる。そこで測定項目を3項目とした。これらの項目を測定し劣化進行度を判定することで、使用限界に達したか否かを判定することができる。

図3には、SOCの使用範囲(中心値と幅)が、正極格子腐食と負極サルフェーションに与える影響を調べた例を示す。図3では、SOC使用範囲の水準を、(a) 20～60% [中心値40%]、(b) 30～70% [中心値50%]、(c) 40～80% [中心値60%] のように定めた例で示す。

一般的には、SOCが高い領域で正極格子腐食を促進する

表1 劣化要因の測定項目の例

Table 1 Evaluation items of deterioration factors

劣化要因	測定項目
正極格子腐食	格子腐食量
負極サルフェーション	硫酸鉛量
電解液成層化	電解液比重差

る影響が出やすく、SOCが低い領域で負極サルフェーションを促進する影響が出やすい傾向がある。上記(a)～(c)の水準において実験し、要因分析した結果、感度が図3に示す関係であったと仮定する。すなわち、SOC使用範囲(b)のケースでは、正極格子腐食[図3(A)]の進行が、目標の使用年数 Y_t を達成するか否か、不明確なところであるが、使用範囲を(a)に下げると、正極格子腐食の進行が著しく遅くなる(長寿命化する)とする。一方、負極サルフェーション[図3(B)]については、SOC使用範囲を(b)から(a)に下げても、まだ使用限界まで余裕があり、目標の使用年数 Y_t をクリアできるとする。その場合、劣化予測の観点から、風力発電用鉛蓄電池のSOC使用範囲は、(a)とした方が目標の使用年数を達成できることが分かる。

2.4 予測モデル構築のための実験計画

タグチメソッドを使った予測モデルを構築するため、L18実験計画法による実験組合せを採用した。設定したL18実験の八つの制御因子と水準を表2に示す。なお、温度条件は、風力発電に併設される蓄電池建屋内で温度管理されることを想定し、室温とした。

表3には、L18直交表を示す。現在、L18実験計画に従って得られたデータに基づく知見により、制御因子に対する感度を定量的に想定できるようになったため、予測方法を適用

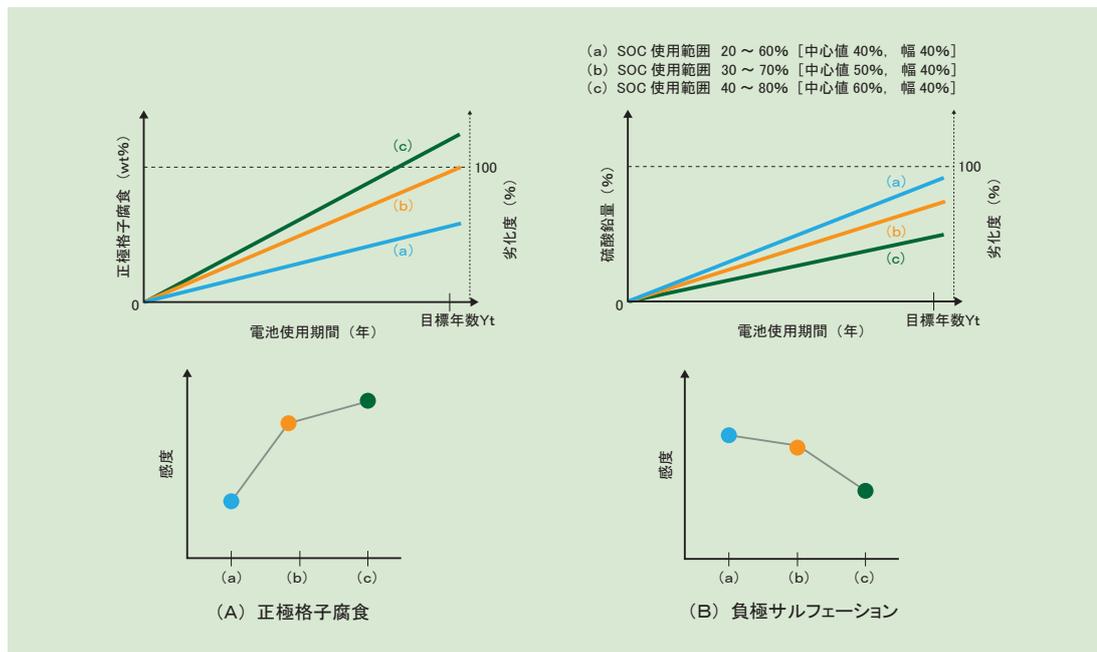


図3 SOCの使用範囲(中心値)の違いによる正極格子腐食と負極サルフェーションに対する影響の例

Fig.3 Dependence of SOC range on the cathode lattice corrosion and the anode sulfation, and their sensitivity

表2 風力発電出力変動緩和用鉛蓄電池のL18実験の制御因子と水準

Table 2 Control factors and level data in L18 experiments of the batteries for wind power output stabilization

項目	水準		
	1	2	3
A : 短周期サイクル [秒]	a1	a2	—
B : 均等充電量 [%]	b1	b2	b3
C : 均等充電電圧 [V]	c1	c2	c3
D : 均等充電間隔 [日毎]	d1	d2	d3
E : SOC使用範囲(中心値) [%]	e1	e2	e3
F : SOC使用範囲(幅) [%]	f1	f2	f3
G : 充放電電流(短周期) [CA]	g1	g2	g3
H : 充放電電流(長周期) [CA]	h1	h2	h3

注) 第1水準<第2水準<第3水準

したツールを開発した。今後、さらに蓄積したデータを本ツールにより評価し、予測方法の高精度化に活用していく。

2.5 鉛蓄電池寿命・劣化予測ツール

タグチメソッドに基づく予測モデルを、電池寿命および部位毎の劣化状況の予測に適用した寿命・劣化予測方法のフローを図4に示す。本方法に基づいて鉛蓄電池寿命・劣化予測ツール（以下、本ツール）のプロトタイプを試作した。

図5に、本ツールの入力画面の例を示す。以下、本ツールの機能を説明する。

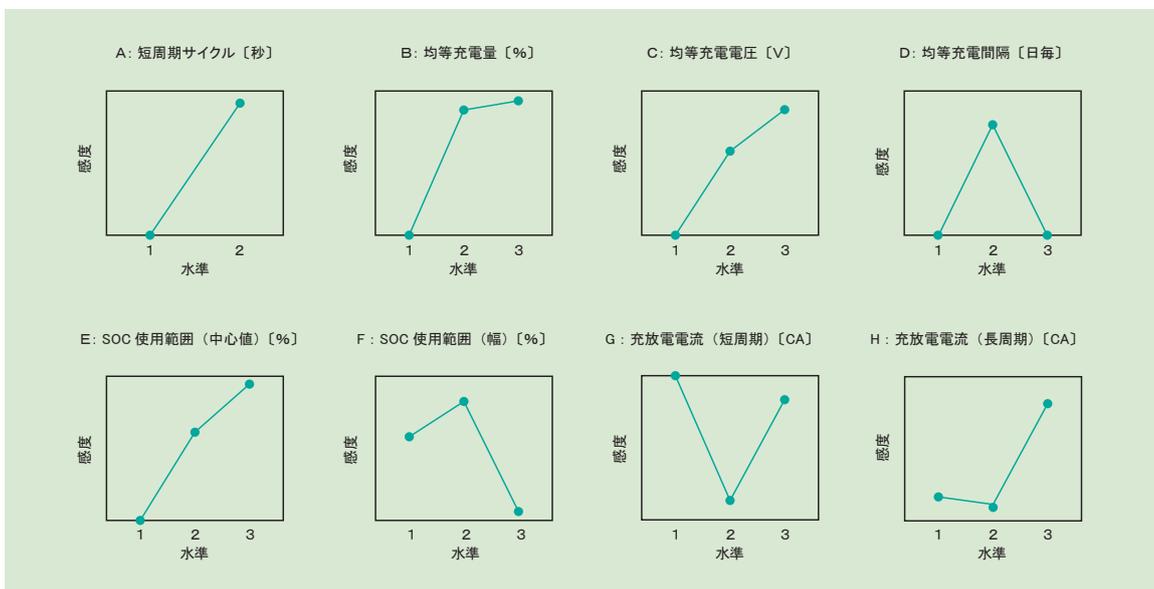
画面左枠内に表示されているメニューで、鉛蓄電池の運用条件を指定すると、鉛蓄電池の寿命や部位毎の劣化が予測できる。運用条件は、前節で検討した制御因子（A～H）という形に展開して表現しており、条件設定バーをスライドして、風力発電用鉛蓄電池の実験水準（A：2水準，B～H：3水準）の値を指定する。運用条件指定後、図5に示す画面右上枠内の評価ボタン（寿命予測，正極格子腐食など）を選択する。評価ボタンを押すと、左のメニューで選んだ運用条件および最適な運用条件で、鉛蓄電池が寿命となるまでの年数や、部位毎の使用限界年数の予測値が表示される。

表3 L18 直交表（18 ケースの実験に対する制御因子の水準を割り付けるためのマトリクス）

Table 3 L18 orthogonal array of respective control factors assigned to 18 experiments

実験No.	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

図6 要因分析の出力画面
Fig.6 Output screen of the sensitivity-factor analysis



ここで述べている、最適な運用条件での寿命予測値とは、L18 直交表に基づき、寿命を最長とするような制御因子の組合せから解析的に得られた値である。

一方、図5に示される右下枠内のボタン（容量予測，正極格子腐食など）を押すと、左のメニューで選んだ運用条件および最適な運用条件で、指定した年数経過後の鉛蓄電池の容量や、部位毎の劣化度合いが表示される。

図6に、劣化予測モデルに関する本ツールを用いて実験データのタグチメソッドの要因分析を実行した例を示す。

本ツール画面上には、各々の制御因子毎に、3水準（Aのみ2水準）での感度をグラフ表示する。縦軸は感度であり、感度が低い方が、寿命・劣化が進みにくく、長寿命条件の運用方法であることを示す。

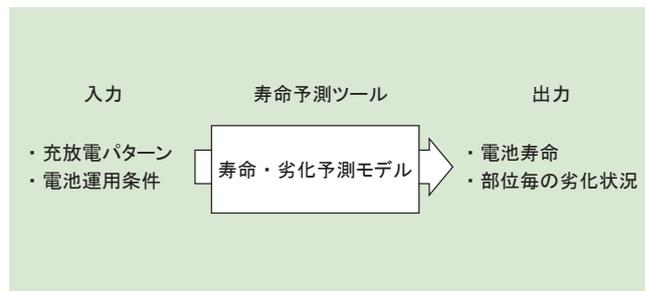


図4 鉛蓄電池寿命・劣化予測方法のフロー図
Fig.4 Flow diagram of the VRLA battery life-estimation method



図5 鉛蓄電池寿命・劣化予測ツールの入力画面
Fig.5 Input screen of the level values in the battery life estimation method

図7は、図5に示す画面上で右上の「寿命予測」の評価ボタンを押したときの例を示す。画面上部に、鉛蓄電池の「容量低下 30%」の評価であることが示される。この例では、メニューで選択した運用条件（画面中央）での予測寿命は17.4年であり、L18 直交表に基づいて得られた最適な運用条件（画面右）での予測寿命は、19.4年であると示された。

実際の蓄電池システムの運用においては、必ずしも八つの制御因子の組合せとして、最適条件で運用できるとは限らず、最適条件から解離した運用を迫られる場合が想定される。このような場合に、選択条件での予測値と最適な運用条件での寿命予測値との間に大きな解離が生じないことが望ましい。このような意味において、図7に示した選択条件での予測値と最適条件での予測値を比較できることは重要である。

図8は、図5に示す画面上で右下のボタン（使用 20 年後の電解液の「成層化」）を選んだ場合の出力画面の1例を示す。画面上部に、使用 20 年後の電解液の「成層化」を予測しており、使用限界となる電解液の比重差を 100（対寿命期%）と示された。メニューで指定した運用条件（画面中央）での 20 年後の電解液の比重差は 120（対寿命期%）と使用限界を超えているが、最適な運用条件（画面右）では 100 と予測されている。すなわち、最適な運用条件では、20 年後も電解液の使用限界に辛うじて留まる結果となった。

本ツールを用いることにより、実験により収集したデータから予測モデルを構築することができ、データを蓄積するに従って予測の信頼度が向上するものと期待でき、広く風力発電用鉛蓄電池システムの運用計画への応用が期待される。



図7 鉛蓄電池寿命・劣化予測ツールの出力画面（1）
Fig.7 Output screen of the estimated life in the battery life estimation method



図8 鉛蓄電池寿命・劣化予測ツールの出力画面（2）
Fig.8 Output screen of the estimated battery status in the battery life estimation method

例えば、寿命や劣化度が異なる鉛蓄電池で蓄電池システムを構成した場合でも、開発した寿命・劣化予測モデルを用いることにより、そのときの蓄電池の組合せに対して最適な運用方法を検討する手段を提供することができる。

また、長期運用中の蓄電池の一部抜き取り調査により、部位毎の劣化状況が把握できるような場合、その後の運用において、特定のグループの蓄電池の劣化の進行を抑制することにより、蓄電池全体としての寿命改善が期待される。

【3】新規 SOC 推定手法の開発

蓄電池の寿命は、充放電に伴う経時的な容量低下の度合いをもって計量化されるため、寿命予測モデルの開発において、さらには寿命予測モデルの適用において、重要な制御因子となっている充電状態 SOC を精度良く推定することが前提となる。風力発電用鉛蓄電池システムの運用に際して、電流・電圧などを計測している。しかし、出力が一定でなく常に充放電を行っている鉛蓄電池では、その SOC を正確に把握することは困難である。そこで以下では、SOC の高精度な推定手法について検討した結果を述べる。

3.1 SOC 推定の現状と研究例

現在広く用いられている方法は、満充電状態にすることで充電量の基準点を更新し、電流計による電流の積算分から SOC を推定する方法である。この方式は、満充電により基準点を更新した直後は、SOC を正確に把握することができる。しかし、満充電からの使用時間が長くなるに従い、電流計の誤差が累積し、SOC 推定精度が悪くなる。満充電による基準点の更新を頻繁にすれば高い精度を維持しやすいが、サイクル寿命の観点からは、頻繁な満充電にすることは電池劣化要因となる。そのため、頻繁な満充電による基準点更新を必要としない SOC 推定手法が求められている。

電流積算法の代替となる可能性を有する SOC 推定手法として、まず開放電圧 (OCV)、すなわち充放電電流での電圧と SOC の対応関係から SOC を推定する方法がある。電池の反応速度論と平衡論によれば、充放電の切り替え時、すなわちリアルタイムに OCV と SOC の関係を直接定量化することは原理的な障壁がある。両者の対応関係を求める際には、温度および電流がゼロとなつてからの時間などの影響を考慮する必要がある。したがって、蓄電池が充放電していない休止時間に SOC を推定することが必要になる。

これらに対して、嶋田一黒川らは、充放電電流がゼロとなる条件を、充放電電流が一定となる条件に緩めることにより、リアルタイムで SOC を推定する手法を報告している⁸⁾。充放電電流が一定となる系統的な試験データを得るため、充放電電流 (一定), SOC (ほぼ一定), 温度 (一定) を制御して、その時の電圧を測定する試験を、それぞれ数点の充放電電流, SOC, 温度の組合せに対して繰り返すことにより、充放電電流 (I), SOC (S), 温度 (T) から電圧 (V) を推定する関係式 $V = V(I, S, T)$ を導いている。

しかしながら、この方法は、前述の OCV から SOC を推定する方法と同様、電圧を推定する際には、誤差に注意する必要がある。例えば、大きな電流値（一定）、SOC（ほぼ一定）の条件で電圧を測定しようとしても、測定中にも SOC は大きく変化するため、推定式のパラメータ生成時の誤差要因になると考えられる。

3.2 高精度 SOC 推定手法

本研究では、嶋田－黒川の電圧推定式⁸⁾の基本構造を参考にオリジナルな電圧推定式を作成し、SOC を推定する手法を開発した。さらに、電流積算は短期間であれば SOC の変化分を精度良く求められるという特徴を生かし、前述の電圧推定式を利用して求めた SOC 推定結果を補正し、高精度化する手法（高精度 SOC 推定手法）も開発した。

本研究で提案する SOC 推定手法の全体構成を図9に示す。SOC 推定手法の構成要素は、以下の3点である。

(1) 電圧推定式

図10に放電条件での電圧推定式を構成する関係式と変数の構造を例示する。この図に示すツリー構造は、上位のモデル変数が、下位のモデル変数の関数として表されることを示している。対象とした鉛蓄電池の試験データから内部抵抗RやIa係数の SOC 依存性や温度依存性が嶋田－黒川の電圧推定式と異なる傾向を有することを確認し、R変数やIa変数の SOC 依存性や温度依存性を表わす関係式の構造を決定した。

電圧推定式は、SOC100%からSOC20%程度まで放電した後、SOC100%まで充電するという大きなステップの途中（SOCの定点）で、電流値(I)を階段状に変化させて電圧(V)を測定したデータを用いて、多数のモデルの変数等を決定する。電圧(V)は、電流(I)、SOC(S)、温度(T)に依存するが、下記の式(1)、(2)で表現されている。

式(1)は放電条件に関するものであり、電圧は、以下のよう

$$V = V(I, S, T) = E(S, T) - V_d(I, S, T) \quad (1)$$

V：端子電圧、E：起電力、Vd：電流による電圧降下

$$V_d = RI + V_a(S, T) (1 - \text{Exp}[-|I| / I_a(S, T)]) \quad (2)$$

R：抵抗成分、I：放電電流、Va：飽和成分（分極電圧）の最大値、Ia：飽和成分の最大値

充電条件のモデル関係式は、充電終盤の水の電気分解に相当する電圧上昇分が追加される点が異なっており、この電

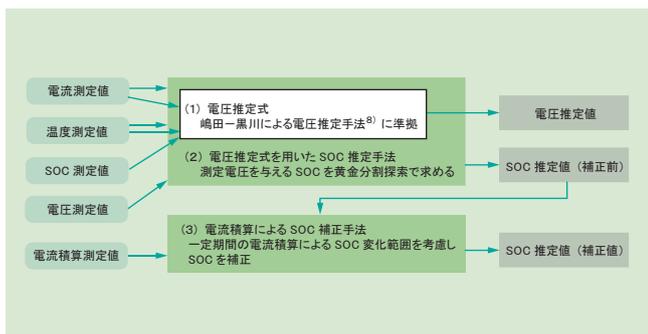


図9 高精度 SOC 推定手法

Fig.9 Method of the precise SOC estimation

圧上昇過程部分（式(3)のVg)については、電圧上昇の高さやタイミングや緩急を扱うことができるステップ状の関数を用いて関係式を決定した。

$$V = V(I, S, T) = E(S, T) - V_d(I, S, T) + V_g(I, S, T) \quad (3)$$

V：端子電圧、E：起電力、Vd：電流による電圧降下、Vg：充電終盤の電圧上昇

$$V_d = RI + V_a(S, T)(1 - \text{Exp}[-|I| / I_a(S, T)]) \quad (4)$$

R：抵抗成分、I：充電電流、Va：飽和成分の最大値、Ia：飽和成分の最大値

(2) 電圧推定式に基づく SOC 推定手法

前項(1)にて説明した電圧推定式 $V = V(I, S, T)$ を利用し、測定したV、I、Tがこの関係式を満たすSOC(S)を求める手法である。仮のSOC(S)初期値を与えて、電圧推定式 $V = V(I, S, T)$ から算出した電圧推定値(V')と、実際に測定した電圧(V)の二乗偏差が最小となるように、仮のSOC(S)を逐次更新するプロセスを繰り返し、二乗偏差が最小値であるゼロとなるSOCを決定する。この問題は、SOCを独立変数とし、電圧の二乗偏差を目的関数とする最小化問題に帰着できる。したがって、目的関数の最小値ゼロを与えるSOCとして、実測電圧に対応するSOCを求めることができる。この二乗偏差最小化には、SOCの上下限値が与えられることから、区間内の最小点を効率的に求める黄金分割探索法を使用した。

(3) 電流積算による SOC 補正手法

前述のとおり、電圧推定式は、充放電電流（一定）、SOC（ほぼ一定）、温度（一定）の条件で作成した推定式である。従って、短期間に電流が大きく変化するような状態で電圧推定式を利用してSOCを推定しようとすると、推定結果にバラツキが生じ、誤差が大きくなることがある。そこで、電流積算は短期間であればSOCの変化分を精度良く求められるという特徴を生かし、ある時点で電圧推定式を用いて推定したSOCを、その前の時点で求めたSOCからの変化分（電流積算で求めたSOCの変化分）を考慮して補正することにより、高精度にSOCを推定することが可能となる。独立に推定して求めた推定結果を、推定時点間の電流積算の変化分と整合性を保つように補正する。

時間を空けて2時点で電圧推定式を用いてSOCを推定するものとする。このとき、SOCの誤差が一定の確率分布に従

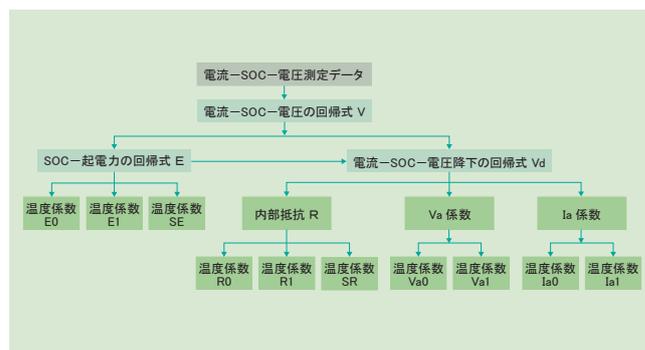


図10 電圧推定式（放電条件）の構成

Fig.10 Variable structure of the voltage-estimation formulae in discharge state

うものとして、補正量の期待値が最小となるように補正する。2時点の間隔が短ければ、2時点のSOCの差分は電流積算から精度良く求められるので、2時点のSOCの差分が一定となる制約条件下で、補正量の期待値を最小化する。この方法は、任意の数の時点におけるSOC推定に拡張できる。一般に、制約条件付きの最小二乗法の問題は、制約条件なしの最小二乗法の問題よりも複雑となるが、このケースにおいては、これらの制約条件を用いて変数を減らすことができるため、より単純な制約条件なしの最小二乗法の問題に帰着できる。

[4] 開発したSOC推定手法の評価

4.1 電圧推定式に基づくSOC推定手法の評価結果

制御弁式据置鉛蓄電池 (50Ah-2V単セル) 6個組 (以下で、2V電池を単セルと称する) に対して、温度について5℃、25℃、45℃の3点、電流について1.25～20Aの6点、SOCについて25～95%の8点、それぞれ電圧を測定し、測定データに基づいて電圧推定式を作成した。各単セルの電圧推定式に基づいて、推定式作成の単セル (基準単セル) と、他の単セルのSOCを推定し、推定誤差 (標準偏差) を評価した。どの単セルで電圧推定式を作成したかによって、6ケースの評価がある。図11は、SOC推定手法を適用した結果の充放電別、温度別の誤差のヒストグラムを示す。

各グラフで、横軸の数字は単セル6個の中の、どの単セルで電圧推定式を作成したかを表わしており、一群のバー (6本) は、その推定式を単セル6個に適用したときの誤差を表している。例えば、図11 (a) の最も左側のグループ (6本のバー) では、単セル1のデータで電圧推定式を作成し、単セル1から6のSOCを推定した結果である。図11 (a) の左側から2番目のグループでは、単セル2のデータで電圧推

定式を作成し、単セル1から6のSOC推定に適用した結果である。

まず平均的な誤差の水準に注目すると、温度条件に依らず、充電条件に比べて、放電条件での推定精度が良く、放電時のSOC推定でより高い精度が期待できる。充電条件では、充電終盤の電圧上昇が潜在的に大きな誤差要因となっていると考えられる。

放電条件では、基準単セルによって誤差にバラツキがあることが読み取れる。例えば、(b) のケース (25℃) では単セル1、単セル6を基準単セルとしたときに、(a) のケース (5℃) と (c) のケース (45℃) では単セル2を基準単セルとしたときに、誤差が顕著となっている。これら特定の単セルで精度が低下する現象を解明することにより、SOC推定精度を改善できる可能性がある。

4.2 電流積算によるSOC補正手法の評価結果

図12に、電流積算によるSOC補正手法を適用したSOCの推定例を示す。

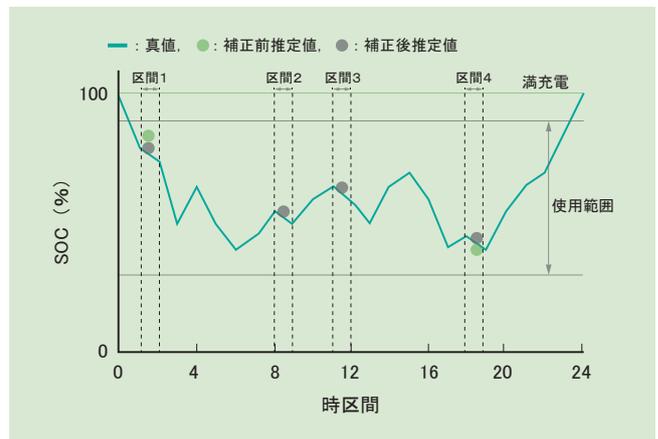


図12 SOC誤差補正手法の評価例

Fig.12 Evaluation results of SOC error correction method

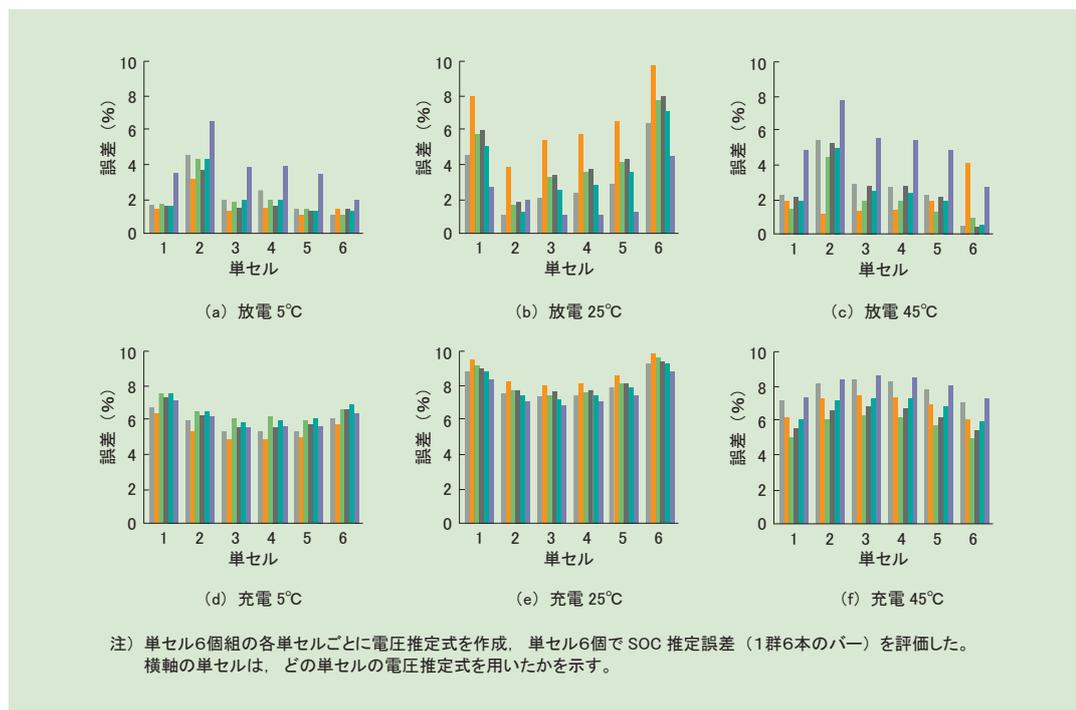


図11 電圧推定式に基づくSOC推定手法の誤差評価
Fig.11 Error of the SOC estimated from SOC-voltage correlation formulae

注) 単セル6個組の各単セルごとに電圧推定式を作成、単セル6個でSOC推定誤差 (1群6本のバー) を評価した。横軸の単セルは、どの単セルの電圧推定式を用いたかを示す。

この図は、使用時間を細分化することにより、SOC の変化が区分的に線形となる仮想的な充放電パターンを示している。充放電電流の大きさは、SOC 変化の傾きに対応している。図 12 で、24 区間中で、放電電流値が小さな（SOC 下降が小さな）区間1～4の4区間に対して、電圧推定式による SOC 推定手法を適用し、SOC を推定した。このとき、補正の効果を見やすくするよう、推定精度に関して、標準偏差 10% でモデル誤差がランダムに発生することを仮定して、SOC 補正の効果を評価した。その結果、SOC 推定値は、図中の補正前推定値から補正後推定値に修正され、グラフ上の真値に近づいている。中央の2点においては、補正量が小さいため、補正前後のシンボルが重なっている。

これらの評価を通じて、SOC 補正手法は、推定誤差を標準化する効果が大きいこと、特に誤差に偏りが見られないようなケースでは、誤差低減が期待できることが分かった。

〔5〕 結 言

- (1) 風力発電の出力変動緩和用鉛蓄電池（以下、風力発電用鉛蓄電池）を長期にわたって効率的に運用するためには、様々な運用条件に基づいて蓄電池の寿命・劣化をいかに正確に予測するかが鍵となる。多岐にわたる運用条件から、風力発電用鉛蓄電池の寿命・劣化を予測するため、タグチメソッドを用いて均等充電間隔や SOC 使用範囲に関連した八つの制御因子による実験結果に基づいた予測モデルを開発した。
- (2) L18 実験に基づいて、風力発電用鉛蓄電池の寿命予測および劣化について要因分析を可能とする寿命・劣化予測ツールのプロトタイプを開発した。
- (3) 鉛蓄電池の運用に寿命・劣化予測モデルを適用するにあたっては、運用中の鉛蓄電池の充電状態 SOC (State of Charge) を的確に把握する必要がある。そこで、運用中の鉛蓄電池の電圧を、電流、SOC、温度から推定する関係式を求め、電圧推定値を逆算して求める SOC 推定値を電流積算値で補正する高精度 SOC 推定手法を新たに開発した。
- (4) これらの技術を風力発電用鉛蓄電池の運用に適用し、高度なシステム運用計画の立案への応用が期待できる。例えば、寿命や劣化度が異なる蓄電池グループが混在するときにも、グループごとに運用条件を変えることによりシステム全体の長寿命化をはかることができる。

〔参考文献〕

- 1) 五味敬芳, 三谷桂, 高林久顯, 小林康弘: 新エネルギー導入をサポートする電力貯蔵を用いた系統安定化技術, 日立評論, Vol.92, No.3, pp.42-45 (2010).
- 2) 今家和宏, 近藤真一: 次世代送配電ネットワーク構築に向けた対応技術, 日立評論, Vol.92, No.4, pp.62-65 (2010).
- 3) 伊瀬敏史, 田中祀捷: 電力システムにおける電力貯蔵の最新技術, シーエムシー出版, pp.71-89 (2006).

- 4) 佐野伸一, 三谷桂, 広瀬義和, 若田部浩之, 高林久顯, 下浦一朗: 風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池“LL1500-W型”, 新神戸テクニカルレポート, No.15, pp.15-20 (2011).
- 5) 向谷一郎, 下浦一朗, 覚野博司, 坂本剛生, 高橋勇: 据置鉛蓄電池開発におけるCAE技術, 新神戸テクニカルレポート, No.21, pp.21-25 (2011).
- 6) 田口玄一: ロバスト設計のための機能性評価—効率的開発の方法, 日本規格協会 (2000).
- 7) 広瀬健一, 上田太一郎: Excel でできるタグチメソッド解析法入門, 同友館 (2003).
- 8) 嶋田尊衛, 黒川浩助: 階段状電流を用いた鉛蓄電池シミュレーションモデリング手法, 電気学会B部門論文誌, Vol.128, No.8, pp.1027-1034 (2008).