

電力貯蔵を支える蓄電デバイスの 使いこなし技術

福本久敏*
和田敏裕*
塩田 久*

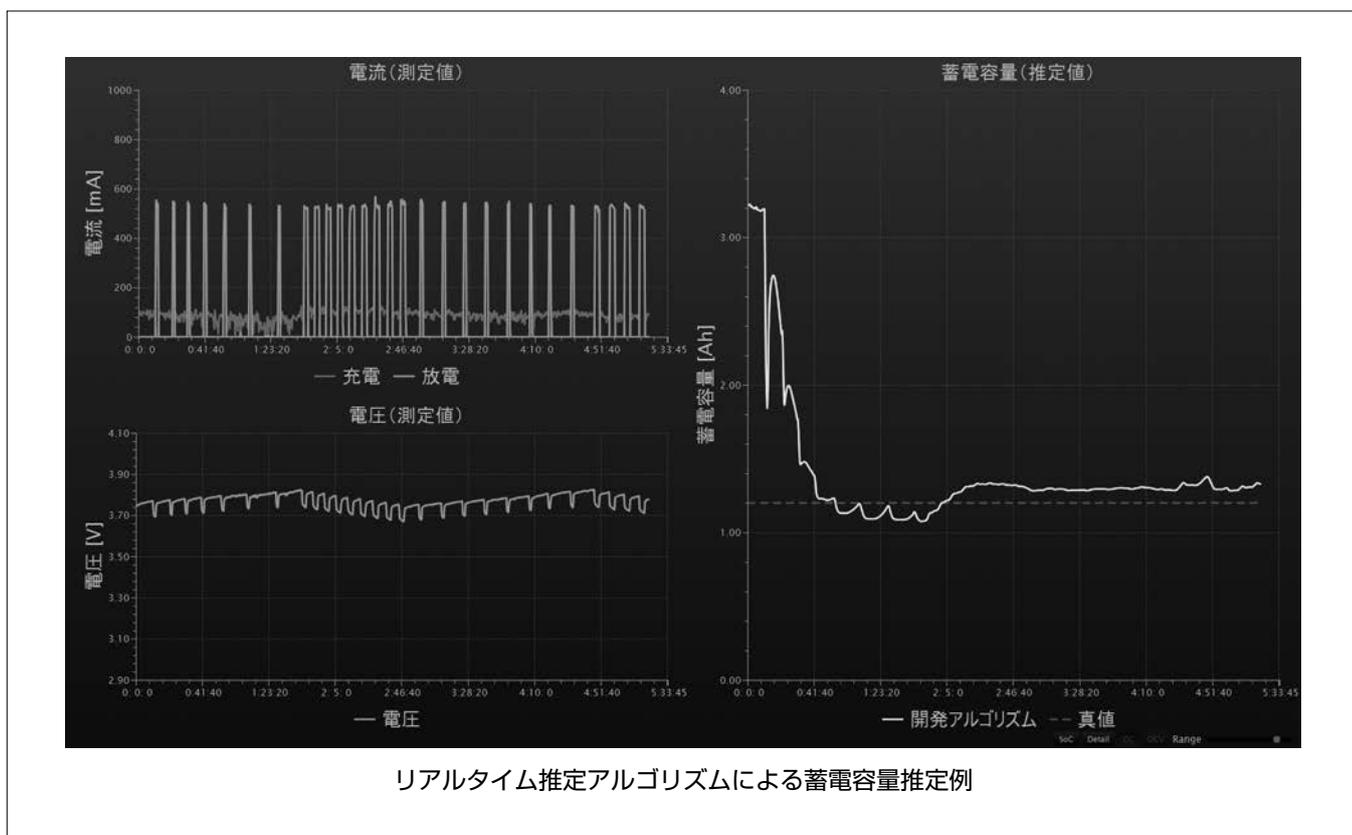
Batteries Management Technology for Electrical Energy Storage Systems

Hisatoshi Fukumoto, Toshihiro Wada, Hisashi Shiota

要 旨

蓄電デバイスは、電力を貯蔵して利用する機器・システムのキーパーツである。蓄電デバイスを利用した機器・システムの性能を最大化するためには、種々ある蓄電デバイスの特長、特性及び限界を知り、パワーエレクトロニクスを用いて使いこなし技術が求められている。リチウムイオン電池、ニッケル水素電池、鉛蓄電池、電気二重層キャパシタが、現在主に用いられている蓄電デバイスである。蓄電デバイスを利用する機器の使用環境や使用目的によって、評価すべき性能信頼性や安全性の項目は異なる。蓄電デバイスの信頼性・安全性評価では、蓄電デバイス内部の様子を観察・測定する工夫がなされている。参照電極を挿入し、正負極電位を分離測定する手法や電解液濃度変化を追跡す

る手法、蓄電デバイスの使用時に流れる電流と電圧損とともに内部抵抗に起因するジュール熱を観測する手法などがある。また、蓄電デバイス利用システムの効率的な運用と信頼性向上を図るため、実使用状態での蓄電デバイスの健全性を高精度に診断する技術が求められている。要旨の図は蓄電池容量のリアルタイム推定例である。蓄電池の電圧と電流から2種類の手法で推定した2つの蓄電池残量を比較し、蓄電容量、内部抵抗、電流値誤差の修正・適正化を繰り返すことで、最終的に残量を1%以下の精度で推定する。この手法は蓄電システムを止めずに精度良く残量を推定できるため、自動車や産業用途システムへの適用が期待されている。



蓄電デバイスのオンライン診断技術

使用中のリチウムイオン蓄電池等の蓄電デバイスから比較的簡便に取得できる電流と電圧情報から蓄電デバイスの状態を表すパラメータをリアルタイムに算出・推定し、診断に供する技術である。蓄電池全体のシステムが2つの線形な部分システムに分解できることに着目し、適応フィルタを用いる2つの推定システムで相互に推定とパラメータ修正を繰り返し、残量を誤差1%以下で推定しつつ、同時に蓄電容量と内部抵抗を推定できる。

1. ま え が き

昨今の省エネルギーの推進や再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電気エネルギーを作り、送り、使う各シーンで電気を効率よく無駄なく扱うために、電力貯蔵技術が求められている。電気エネルギーをほかのエネルギー形態に変換して貯蔵する電力貯蔵には、貯蔵エネルギーの形態によって、揚水や圧縮空気のような機械的貯蔵、蓄熱体や温水に貯(た)める熱的貯蔵、水素やメタンなど燃料に変換する化学的貯蔵、電池等の蓄電デバイスを用いる電気化学的貯蔵がある。蓄電デバイスを用い、パワーエレクトロニクスを利用する機器・システムは、風力発電、太陽光発電の変動対策や需要家の負荷平準化設備、オフィス・データセンターのバックアップ電源、ハイブリッド車、電気自動車、電車等の移動体電源、携帯電話やパソコン、コードレスクリーナー等々発電から民生用途まで広く社会で用いられている。

蓄電デバイスを利用したこれらの機器・システムの性能を最大化するために、種々ある蓄電デバイスの特長、特性及び限界を知り、パワーエレクトロニクスを用いて使いこなす技術が求められている。

本稿では、蓄電デバイスの特長、特性、限界を知り信頼性・安全性を評価する技術や蓄電デバイスの内部状態を測定評価する技術、蓄電デバイスの性能診断をオンラインで行う技術など蓄電デバイスの使いこなし技術の一端について述べる。

2. 蓄電デバイスの特長と特性

2.1 蓄電デバイスの特長

表1にパワーエレクトロニクス機器に利用されている主な蓄電デバイスを示す。リチウムイオン電池は、ほかの蓄電デバイスと比較して小型で軽量という特長がある。そのためノートパソコンやスマートフォンなどの携帯機器、電気自動車やハイブリッド車等の自動車用電源として使用される。最近では再生可能エネルギーの大量導入に伴う電力系統の変動対策や需要家の負荷平準化用途への適用も拡大している。エネルギー密度が高いリチウムイオン電池は可燃性の有機溶媒を電解液として使用しているため、万一制

表1. 主な蓄電デバイス

| 種類 | リチウムイオン電池 | ニッケル水素電池 | 鉛蓄電池 | 電気二重層キャパシタ |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------|
| 電極材料/電解液 | 炭素, 遷移金属酸化物/有機電解液 | ニッケル化合物, 水素吸蔵合金/アルカリ水溶液 | 鉛/硫酸 | 炭素/有機電解液又は硫酸 |
| 用途 | 携帯機器(パソコン, スマートフォン), xEV, 電力貯蔵 | 乾電池代替, HEV, 電力貯蔵 | 電力貯蔵・非常用電源, エンジン始動 | 負荷変動, 自動車ISS |
| 体積エネルギー密度(Wh/L) | 200~400 | 150~300 | 90 | ~5 |
| 質量エネルギー密度(Wh/kg) | 100~160 | 60~80 | 35 | ~5 |
| 出力密度(W/kg) | 400~3,000 | 150~2,000 | 100~200 | >1,000 |
| 寿命(サイクル) | 600~5,000 | 1,000~1,500 | 300~1,500 | >10,000 |

EV: Electric Vehicle, HEV: Hybrid EV, ISS: Idling Stop System

御不能に陥った場合は、火災等の重大事故につながる可能性がある。そのため、事故を回避する安全対策を機器・システム設計に盛り込むことが求められる。ニッケル水素電池のエネルギー密度はリチウムイオン電池に劣るが、電解液がアルカリ水溶液のため不燃性で、かつ過充電に強いため安全性は高い。鉛蓄電池は、質量エネルギー密度は低く過放電に弱い。安価で過充電には強い。UPS(Uninterruptible Power Supply)などの非常用電力源や自動車用として、現在も世界中で高いシェアを占めている。最近、自動車のアイドリングストップ用に充放電サイクル性に優れた電池も登場した。電気二重層キャパシタは、電気化学反応を伴わない、電極表面へのイオンの吸着脱離によって充放電する蓄電デバイスである。エネルギー密度は電池に劣るが、大電力の高速充放電が可能である。瞬低補償装置や自動車のアイドリングストップへの適用例がある。

2.2 蓄電デバイスの特性評価

蓄電デバイスはその種類によって適正な用途が異なり、また同じ種類でも、構造や使用材料によって特性が異なる。蓄電デバイスを利用するパワーエレクトロニクス機器・システムの設計を進める上で蓄電デバイスの特性を十分に把握することが重要である。

蓄電デバイスの特性評価は、性能信頼性評価と、安全性評価の2つに大別することができる。性能信頼性評価は、蓄電デバイスの通常の使用範囲で電気特性を評価する手法で、蓄電容量や内部抵抗、入出力特性などの蓄電デバイスの基本性能を、電圧、電流、温度を主なパラメータとして試験を行う。初期の基本性能の評価だけでなく、機器の使用条件で性能が、経時的にどのように変化するかを評価する充放電サイクル試験などの寿命試験も、蓄電デバイスの信頼性を評価するために重要な手法である。製品の使用期間内での信頼性を評価するためには、長期間の充放電試験を、数多くの条件に対し実施する必要がある。そのため、製品と同じ使用環境での試験と並行し、温度による加速評価を取り入れ効率化が図られる。

安全性評価は過充電、過放電、過昇温、短絡、破壊など、蓄電デバイスが、通常使用の範囲外に置かれた場合の挙動(発熱、破裂、発火など)を評価する。特に、携帯機器や車両に搭載される蓄電デバイスは、定置用システムと比べて、落下や衝突などの外力による破壊や、加熱など、異常な環境にさらされる可能性が高いため、これらを想定した事前の安全性評価が重要となる。

蓄電デバイスを利用する機器の使用環境や使用目的によって、評価すべき性能信頼性や安全性の項目は異なる。そのため、電気用品安全法などの法規やISO, IEC(International Electrotechnical Commission), UN(United

Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods), UL(Underwriters Laboratories)やJISなどの規格では、蓄電デバイスを利用する機器の種類ごとに、評価試験方法が定められている。これらの法規や規格に準拠した評価結果は、蓄電デバイスを製造するメーカーから入手することもでき、各社のデバイスの性能比較に有用である。ただし、これらの標準的な試験方法だけで機器の設計や信頼性が担保されるわけではない。機器の性能信頼性、安全性の評価には、その使用状態に則した評価が重要となる。

三菱電機はスティッククリーナーのような家庭用製品から、人工衛星のような宇宙機器まで幅広い分野の製品に蓄電デバイスを搭載している。規格化されていない評価が必要な場合も多く、このような製品独自の評価については、社内で評価できる体制を確立している。

3. 蓄電デバイスの内部状態評価技術

鉛蓄電池やリチウムイオン電池などの蓄電デバイスは、電気エネルギーと化学エネルギーを相互に変換する仕組みである。この変換が進行する過程で、蓄電デバイスを構成する電極、セパレータ、電解液等の材料や構造に生じた変質の積み重なりが、電池容量等の蓄電デバイス性能の低下につながると考えられている⁽¹⁾⁽²⁾。

蓄電デバイス内部の電極や電解液の状態変化の様子を観察・測定するために、様々な工夫がなされている。例えば、リチウムイオン電池の正極と負極の電位変化を観測するために金属リチウムを第3の電極として、蓄電池内に挿入する手法がある⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。光田らは、正極及び負極張り出し辺を設けた3極参照極付リチウムイオン電池セルを組立て(図1)、電位変動挙動を解析し、リチウムイオン電池の安全性にかかわる金属リチウムの電極張り出し部分での析出リスクについて知見を得ている⁽⁷⁾。

また、市販の開放型鉛蓄電池の上部蓋を開口して挿入した動的水素電極DHE(Dynamic Hydrogen Electrode)を参照電極として電位挙動を解析し、屈折率計を用いて硫酸電解液サンプル濃度を測定している。この手法によって、開放型鉛蓄電池を急速充電した場合に、電解液の硫酸濃度が、蓄電池の上部と下部で異なってしまう成層化現象と、濃度差が解消される方向に向かう緩和現象の実測を行っている。緩和現象で、従来の上下間での硫酸及び水の拡散移動メカニズムでは上部と下部の濃度緩和の時定数は同じと考えられていたが、実測値から得られる緩和の時定数が4倍異なることが分かり、上下間拡散移動メカニズムに加え、正極及び負極それぞれの上下間での硫酸濃淡電位差を駆動力とする局部電池反応による硫酸及び水の生成又は消費による緩和メカニズム(図2)を提案⁽⁸⁾している。

蓄電デバイス内部で進行する化学反応等の事象には、熱の出入りが伴う。蓄電デバイスの使用時には、内部にも電

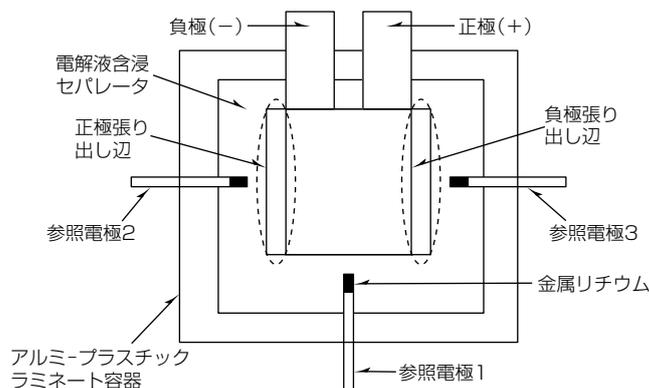


図1. 3極参照極付リチウムイオン電池セル

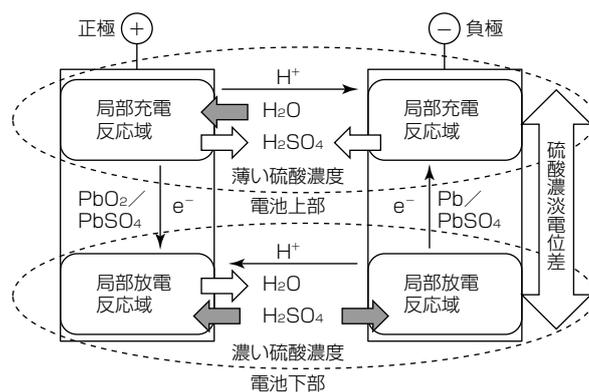


図2. 局部電池機構による濃度緩和メカニズムの模式図

流が流れ、内部抵抗に起因する電圧損とともにジュール熱が観測される。熱量計内に置いた小型リチウムイオン電池に充電器等から出るリップル電流を模擬した交流成分を重畳させて発熱挙動を評価した例がある⁽⁹⁾。このほか、X線CTを用いて蓄電デバイス内部の状態を画像観察する例⁽¹⁰⁾や、放射光を貫通入射させて充放電中の電極材料の結晶構造変化を追跡した例⁽¹¹⁾などがあるが、いずれも使用中の蓄電デバイスの状態・特性を簡便に調べる手法とは言い難い。使用中の蓄電デバイスから比較的簡便に取得できる情報は、電流と電圧及び表面温度である。これらから蓄電デバイスの状態を表す、内部抵抗や蓄電容量、残量をリアルタイムに算出・推定する技術についての当社の取組みを次に述べる。

4. 蓄電デバイスのオンライン診断技術

蓄電デバイス(電池)の内部的な状態のうち最もよく利用されるものは残量であり、携帯電話やノート型パソコン等でもなじみ深いものである。しかし電池の劣化によって残量の精度が悪化することは一般に知られているところであり、自動車や産業用途への適用では精度の向上が求められている。電池の劣化度はまた、蓄電池の長期利用時の信頼性向上や、残寿命等の見積りのためにも重要な指標である。

電池の劣化度は、蓄電容量の減少と内部抵抗の増加(ただし温度要因を除く)でとらえられる。蓄電容量を測定するには、電池を満充電し、そこから完全放電させるまでに

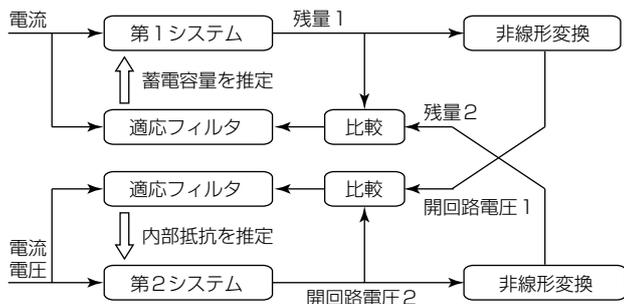


図3. リアルタイム推定アルゴリズム

要した電気量を計測すればよい。しかしこの測定を電池利用中に行うことは不可能であり、また計測精度の確保のためには少なくとも数時間程度の測定時間を要する。そこで当社は、電池の電流、電圧から電池の残量、蓄電容量、内部抵抗を電池使用中にリアルタイムに推定する手法について検討を進めてきた。

これら電池の内部状態を電流、電圧の時系列データから推定するためには、システム理論の立場からの検討が必要である。蓄電池を、電流を入力、電圧を出力とする動的システムとみなすとき、残量はシステムの状態、蓄電容量や内部抵抗はシステムのパラメータとみなすことができる。線形なシステムに関しては、システムの状態推定法としてルーエンバーガーオブザーバやカルマンフィルタ、パラメータ同定法として適応フィルタといった既知のアルゴリズムが利用できる。しかし蓄電池は全体として非線形システムであり、そのままでは適用できない。非線形システムに対応した一般の推定アルゴリズム⁽¹²⁾も存在するが、計算量やロバスト性の面で課題があった。

そこで、蓄電池全体のシステムが2つの線形な部分システムに分解できることに着目した。第1のシステムでは電流が入力であり、残量が出力であり、蓄電容量がパラメータである。第2のシステムでは電流及び電圧が入力であり、電池の開回路電圧が出力であり、内部抵抗がパラメータとなる。開回路電圧と残量は非線形な関数によって相互変換できる。

まず第1のシステムで適応フィルタを用いることで、電流と残量から蓄電容量を推定できる⁽¹³⁾。同様の手法は第2のシステムでも適用でき、電流、電圧と開回路電圧から内部抵抗を推定できる⁽¹⁴⁾。最後にこれら推定法をフィードバック構造の中で相互結合し、互いに推定と修正を繰り返すことで、蓄電池の残量を誤差1%以下で推定しつつ、同時に蓄電容量と内部抵抗をリアルタイムに推定できるアルゴリズムを開発した⁽¹⁵⁾(図3)。さらに、実使用環境でのセンサ誤差や、マイクロコントローラ実装時での課題についても検討の上、解決している⁽¹⁶⁾。

また、推定精度の向上や対応蓄電池の拡大のため、要素技術の開発を継続している。例えばリン酸鉄リチウムなどヒステリシス特性が支配的となる電池に対応するアルゴリ

ズム⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾や、イオン拡散が支配的となる低温時への対応を考慮した手法⁽¹⁹⁾、数学的モデルの立式自体が困難な電池に対しても適用が可能な手法⁽²⁰⁾などを提案している。

5. む す び

蓄電デバイスは、電力を貯蔵して利用する機器・システムの性能の最大化にかかわる。今後出現する新たな蓄電デバイスも含め、パワーエレクトロニクスを用いて使いこなす技術を高めていく。

参 考 文 献

- (1) Vetter, J., et al : J.Power Sources **147**, 269~281 (2005)
- (2) Akamatsu, K., et al : GS Yuasa Technical Report **4**, 18~23 (2007)
- (3) Dolle, M., et al : J.Electrochem.Soc., **148**, A851 (2001)
- (4) Wu, M.S., et al : J.Electrochem.Soc., **152**, A47 (2005)
- (5) Delacourt, C., et al : J.Electrochem.Soc., **161**, A1253 (2014)
- (6) Ender, M., et al : J.Electrochem.Soc., **159**, A128 (2012)
- (7) Mitsuda, K., et al : Electrochemistry, **84**, 79~86 (2016)
- (8) Aihara, S., et al : Electrochemistry, **82**, 985~991 (2014)
- (9) Mita, Y., et al : CRIEPI Research Report, T03041 (2004)
- (10) Finegan, D.P., et al : Nature Communications, **6**, A6924 (2015)
- (11) Kaji, H., et al : SPring-8 Section B : Industrial Application Report, 2012B4700, 2013A4700/BL15XU
- (12) Wan, E.A., et al : IEEE AS-SPCC, 153~158 (2000)
- (13) Kim, T., et al : IEEE Trans.Energy Convers., **30**, 3, 842~851 (2015)
- (14) Wada, T., et al : ACC, 2494~2498 (2015)
- (15) Takegami, T., et al : CCTA, to be appeared
- (16) Wada, T., et al : ASCC (2015)
- (17) Wang, Y., et al : IEEE Trans. Control Syst. Technol., **23**, 3, 948~962 (2015)
- (18) Kim, T., et al : J.Power Sources, **295**, 16~27 (2015)
- (19) Tang, S., et al : ACC, 5871~5877 (2015)
- (20) Ozcan, G., et al : IECON (2016)