

蓄電池制御技術

吉岡省二*
吉瀬万希子**

Battery Charge Discharge Control Technology

Shoji Yoshioka, Makiko Kise

要旨

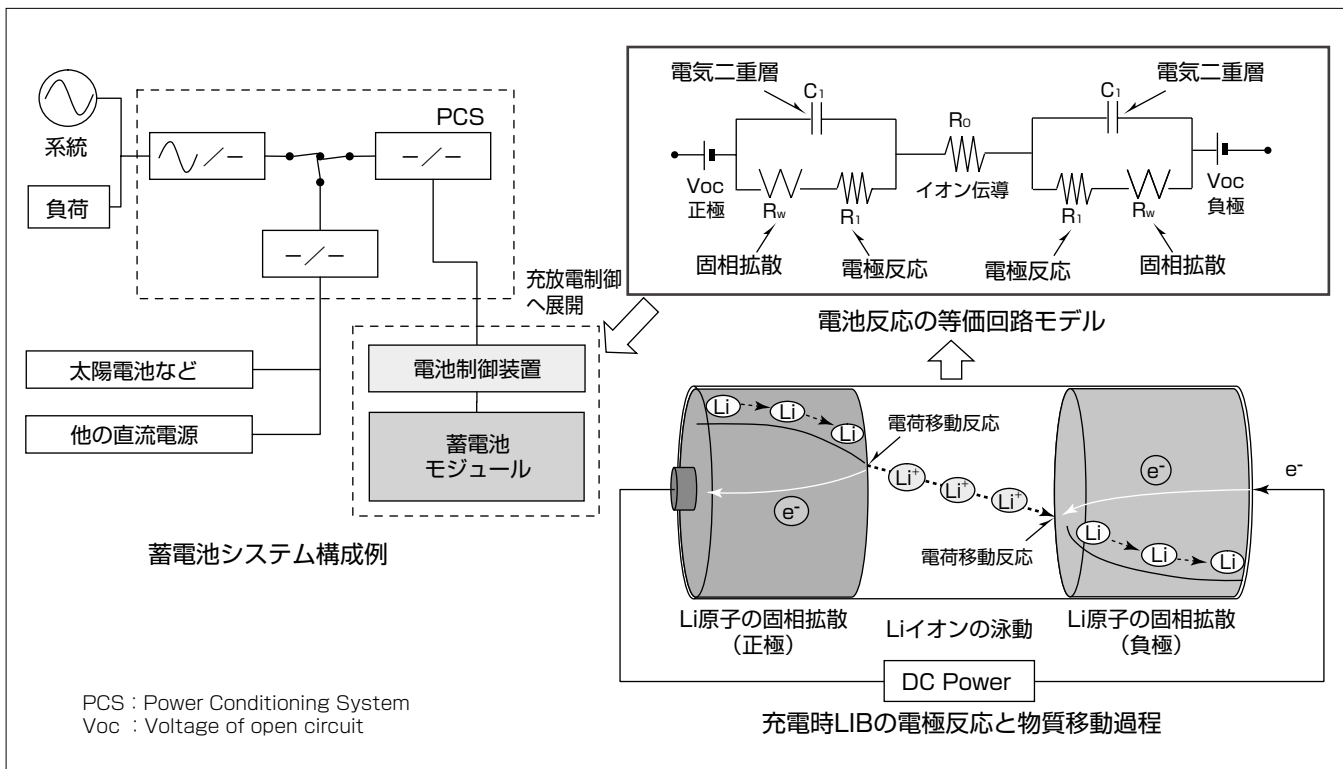
太陽光、風力等の自然エネルギーで発電した電力の有効利用には、変動する発電電力を効率良く貯蔵し、需要に応じた電力を供給することが条件となる。再生可能エネルギーを本格導入するには、電力需給バランスの精密制御が必要で、それを可能にする電力インフラがスマートグリッドである。家庭、ビル、工場等に設置された太陽電池モジュールで発電される電力と、需要家の電力消費は一致しないため、電力の過剰供給と過負荷防止には、電力バッファとなる蓄電池システムがスマートグリッドには不可欠である。

蓄電池には、電力貯蔵可能な二次電池である鉛蓄電池、ニッカド電池、ニッケル水素電池等があるが、エネルギー密度、環境負荷、自己放電性能を考慮すると、自動車用に普及拡大の始まったリチウムイオン二次電池(Lithium Ion Battery: LIB)が現在最も有力である。LIBには出力密度^(注1) 1,000W/kgを超える高出力型とエネルギー密度^(注2)

200Wh/kg以上を持つ高エネルギー密度型があり、高出力型はより速く電力を貯蔵又は放電できる電池、高エネルギー密度型は単位重量あたり、より多くのエネルギーを貯蔵できる電池であり、スマートグリッドなど大規模な定置用電力貯蔵には、高エネルギー密度型が適している。一方、LIBは寿命特性に課題があり、充放電特性の経年劣化と使用条件による安全性低下等の問題がある。現状は電圧や電流の制御によって必要寿命を確保しているが、蓄電池システムの信頼性、安全性を更に追求するためには、電池特性を熟知して構築した制御技術が必要である。特に電池使用条件と環境条件は寿命特性への影響が大きい。

本稿では、蓄電池を長期間最適状態に保ち、システムの信頼性を優先した蓄電池制御技術について述べる。

(注1) 電池充放電時の電池出力(W)を電池重量で除した値
(注2) 電池出力(W)と出力可能時間(h)の積である蓄電エネルギー(Wh=3,600ジュール)を電池重量で除した値



蓄電池システムの構成例と充放電制御に用いるリチウムイオン電池反応の等価回路モデル

正極の固相からリチウム原子が脱離し、エネルギーレベルの高い負極固相内に挿入されることでリチウムイオン電池に電力が貯蔵される。貯蔵の過程で複数の電荷移動反応とイオン移動を経由するため、抵抗(イオン伝導抵抗 R_0 、電極反応抵抗 R_1 、固相拡散の抵抗 R_w)と、電極界面の電気二重層に蓄えられるキャパシタンス成分 C_1 を考慮することで電池反応は等価回路で表せる。このモデルを基に、正確なSOC、充放電可能最大電力、電池寿命の推定によって、安全性と信頼性の高い蓄電池システムの構築が可能となる。

1. ま え が き

三菱電機は、衛星携帯電話、人工衛星用電源等、リチウムイオン電池を使った蓄電池システムを開発している。リチウムイオン電池はエネルギー密度が高く、小型軽量化が可能であるが、高コストと寿命特性の観点から⁽¹⁾、これまで本格的な普及拡大には至っていない。コストに関しては、電気自動車などの普及に伴う生産量拡大によって、2010年の約¥110/Whから、5年後には¥80/Whに低下する予想もある⁽²⁾。一方、充電時の熱安定性、高温環境下の化学的安定性等、電池材料や構造に起因した寿命と安全性に関する課題があるため、関係する多くの規格が国内外に存在する⁽³⁾⁽⁴⁾。寿命と安全性は、電池制御技術で確保できる。しかし、蓄電池システムの効率的動作と両立させるには、電池制御の高度化が必要となる。電池制御とは、簡単に言うと“電流を流すか、止めるかを電圧と温度で判断し、実行する”ことであるが、高度な制御とは、電池容量、温度、内部抵抗、充電レベル等の電池状態を正確に把握した制御を意味する。本稿では、リチウムイオン電池の寿命と安全性を考慮した制御方法について述べる。

2. 蓄電池システム

自然エネルギーと電力貯蔵を組み合わせた蓄電池システムの一例を図1に示す。蓄電池モジュールの電圧、電流、温度等、電池状態のデータを電池制御装置に送り、これを基に、充電状態、余寿命、充放電可能電力・電力量等、制御上重要なパラメータを算出し、充放電動作の判断に使用する。太陽電池や風力発電機で発電された電力は電圧変換器を通った後、コントロールされた電流値で電池に蓄えられ、同時に、最も効率的なタイミングで系統に送電、又は負荷で消費される。パワーフローの制御はパワーコンディショナ(PCS)が行い、電池制御装置からの情報を基に電力をコントロールする。

2.1 制御アルゴリズム

蓄電池システムの最も簡単な制御は、上下限電圧範囲を

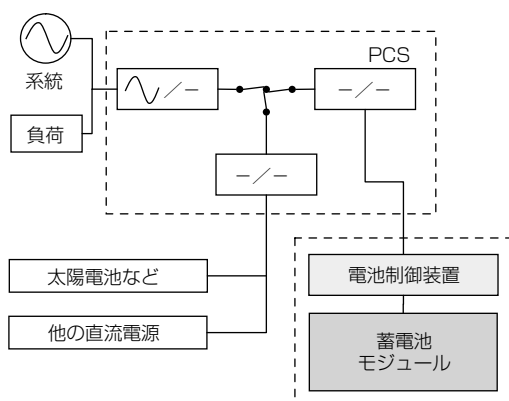


図1. 蓄電池システムの構成例

逸脱したときに電力を遮断する制御であり、電池保護優先の制御である。この場合、システムの動作状態に関係なく充電や放電が急停止するため、負荷、系統、発電装置の故障など、ユーザーの利益・利便性を損なう場合がある。図2は、電池保護と蓄電池システムの効率的利用を両立させる基本的な蓄電池制御アルゴリズムである。システムの動作開始直後に各単電池電圧、温度を測定し、各種電池パラメータを推定する。電池のパラメータはいくつかあり、電力貯蔵レベルを表すSOC(State Of Charge)もその1つである。SOCは放電可能、又は充電可能電量を電池容量に対する割合で表現した値であり、SOC=100%を超えると電池は過充電状態となる。その他、現時点の使用可能最大電力、又は充電可能最大電力を現すSOP(State Of maximum Power)、電池の健全度を表すSOH(State Of Health)等が主要な制御パラメータである。制御では、各電池パラメータの推定値から、電池がダメージを受け、システム停止が予想される場合は、動作指令の変更を要求する。問題がなければ要求にしたがって充放電が実行される。電池状態が急変して予見不可能状態となって、電池パラメータが制御範囲を外れると、システムの保護動作が機能してシステムは緊急停止する。

2.2 等価回路モデルによる電池制御

電池パラメータとして最も重要なSOC推定は、電流積分法と開回路電圧(Voc)演算法を組み合わせる方法が一般に用いられる。充放電時の電流積分値から通電電量を算出し、初期値からの加減によって現在のSOCを算出できるが、検知される電流値には誤差が含まれる。また、電池が劣化するとSOC=100%に相当する容量の絶対値が減少するので、電流積分法だけでは、正確なSOC推定ができない。そこで、Voc演算法で補うことで正確なSOC推定が

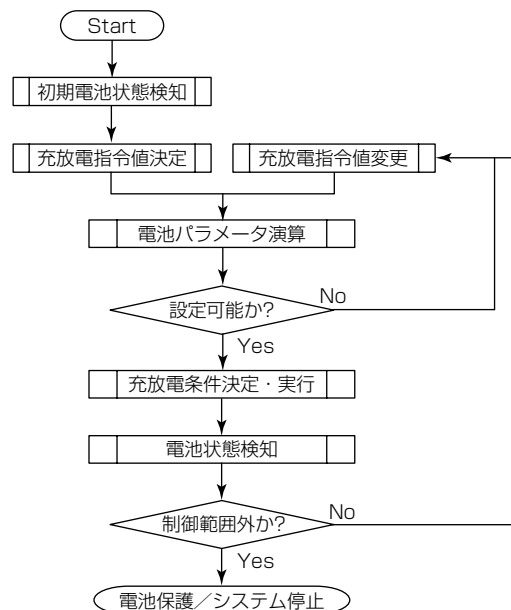


図2. 電池システム制御アルゴリズム

可能になる。Vocは図3のようにSOCと一対一に対応するので、Vocを測定すれば厳密なSOCが得られる。ただし、SOCとVocの関係は電池材料に強く依存し、ハードカーボン系の負極を用いたリチウムイオン電池はVocのSOC変化が大きく、グラファイト系負極は変化が小さい。しかし、充放電停止直後のVocは、電池のコンデンサー成分に蓄えられた電荷の放電によって、電池電圧が変化するため、Vocの真値を得るには数分、数時間を要する場合もある。この問題を解決するため、無負荷時を含む任意の電流における電池電圧を計算できる数理モデルを構築した。まず、電池反応を、図4に示した集中定数系の等価回路でモデル化した。電池反応による電気的特性を抵抗 R_0 、 R_1 、ワールブルグインピーダンス R_w 、キャパシタンス C_1 とすると、電池電圧は式(1)、式(2)で表せる。電流遮断後に I_1 がゼロになる時間を計算・推定し、その時の電圧から得られるVocと、図3の関係からSOCの真値が推定できる。

$$V = Voc - (R_1 + R_w) \times I_1 - R_0 \times I \dots\dots\dots(1)$$

$$I_1 = I - I_2 \dots\dots\dots(2)$$

また、式(1)、式(2)からは通電時の電池電圧も推定できる。任意の放電電流における電池電圧を予測し、下限電圧を下

回る条件が事前に把握でき、電池保護による電流遮断を事前に回避できる。また、充電時の電圧を計算することで、定電流制御から上限電圧値における定電圧制御へ移行するタイミングが予測できる。等価回路の時定数は、電池の種類によっても異なるが、数分から数時間である。特に低温で抵抗、ワールブルグインピーダンスが増大して時定数は大きくなる。このように等価回路による電池制御では、使用環境の変化に応じた電流電圧応答を予測できる特長を持つ。

3. 寿命評価技術

スマートグリッドなど据置き用のリチウムイオン電池は、最低でも10年の寿命が必要とされている。しかし、温度環境、充放電電流/電圧、充放電サイクル数等、使用条件によって寿命が短くなるため、メンテナンスや電池制御で寿命予測が必要になる。リチウムイオン電池の寿命評価技術によって、電池システムの寿命設計と余寿命診断が可能になる。

3.1 劣化メカニズム

リチウムイオン電池の劣化は、繰り返し充放電によるサイクル劣化と、充電状態で長期間、高温下に暴露されたときの保存劣化によって、蓄電容量(Wh又はAh)、充放電可能電力(W)、安全性が低下する。蓄電容量の低下は、負極又は正極活物質表面に生じる不可逆な化学反応によって、リチウムイオンが挿入脱離するホスト構造の消失に起因する現象である。その他、充放電可能電力が低下するという劣化モードがあり、内部インピーダンスの上昇と先に述べたホスト構造消失による局所的電流密度の上昇が主要因である。内部インピーダンス成分は、電極反応抵抗、電子伝導抵抗(接触抵抗を含む)、電解液中のイオン伝導抵抗と、電極部材と電解液との固液反応によって電極表面に沈着・生成するSEI(Solid Electrolyte Interface)の抵抗からなる。SEI層は、電解液中の溶媒と、電極部材中のリチウムが反応して電極粒子表面に生成する数ナノメートル程度の薄い固体層であり、固液界面におけるSEI成長反応を自ら抑制する役割がある。また、SEI層はリチウムイオン伝導層と考えられており、リチウムイオン電池の充放電サイクル特性の安定に寄与している。しかし、高温暴露や長時間の高電圧保持等によるSEI層の過度な成長は、大きな内部抵抗の原因となり、また、溶液中のリチウムイオン濃度の低下など、寿命劣化の主要因である。

3.2 寿命設計技術

容量が初期から一定量低下するまでを寿命と呼ぶ。寿命は、電池材料、電池構造の他に、充放電制御、環境温度等の外部要因の影響を受ける。図5は、保存劣化の環境温度依存性、図6はサイクル劣化の電流値依存性を示している。長期保存時における保存劣化は、式(3)に示すように、温度

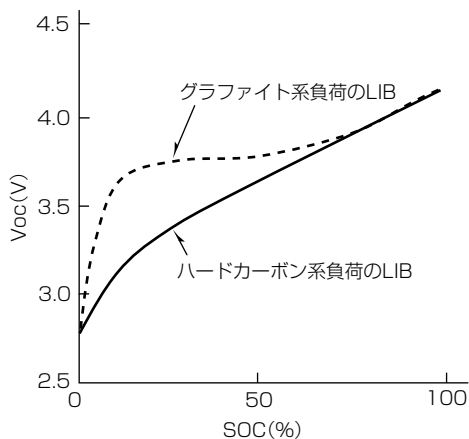


図3. 充電レベル(SOC)と開回路電圧(Voc)の関係

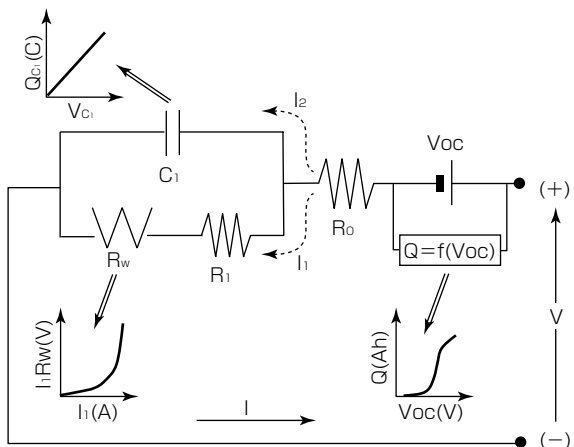


図4. 充電方向の電流をプラスとした時の集中定数系のLIB等価回路モデル

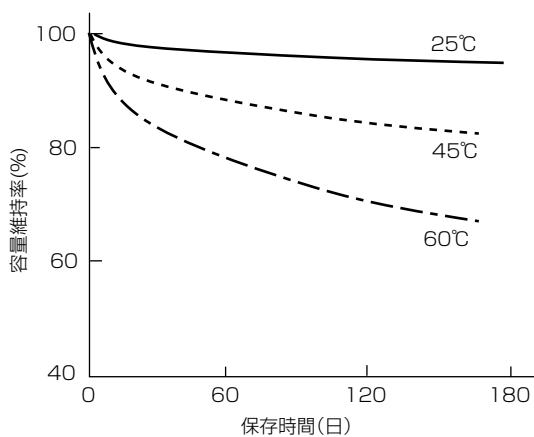
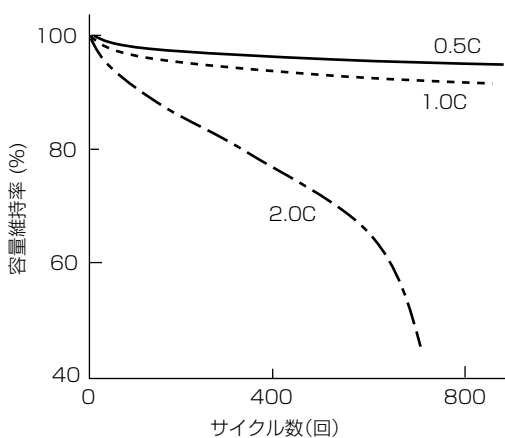


図 5. 保存劣化の温度特性SOC=100%



C: 充放電時の電流 (1.0Cは1時間で100%充放電する電流に相当)

図 6. サイクル劣化の充放電電流依存性

TとSOCの関数となる。一方、サイクル劣化は、サイクル数nと電流Iが因子に加わり、劣化量は時間又はサイクル数で積分したFs又はFcで表され、劣化後の蓄電容量Cpは次式で求められる。なお、Cp_iniは初期容量を意味する。

$$C_p = C_{p_ini} \times \{1 - F_s(T, SOC) - F_c(T, SOC, n, I)\} \dots\dots(3)$$

リチウムイオン電池の劣化は、使用材料、構造によって異なるがこれは、寿命予測式(3)に含まれる関数形の違いに相当する。したがって、精度の高い寿命予測式は、電池種ごとのパラメータ評価が必要となる。

3.3 余寿命測定技術

劣化が進行し、現在の状態からあらかじめ設定した許容劣化レベルに達するまでの時間、又は充放電サイクル数を余寿命と定義する。この評価には現在容量、出力特性を正確に把握する測定技術が重要となる。電池容量のリアルタイム検出は困難である。通常はシステムを停止させ、100%充電の状態から、電池の放電下限電圧まで一定条件

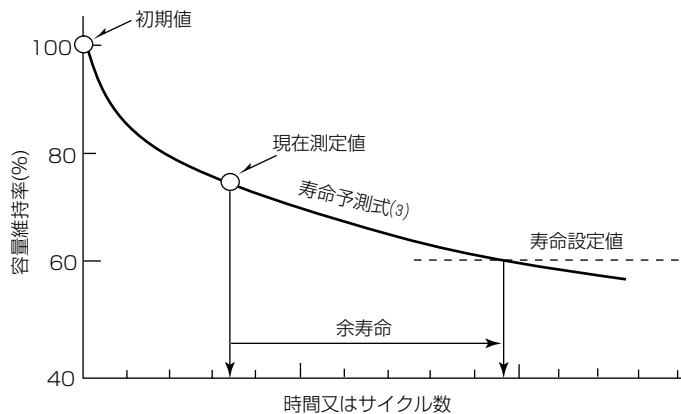


図 7. 蓄電容量の劣化曲線と余寿命予測

で放電させた容量を測定する。初期容量から低下した容量が、寿命予測式(3)に一致すると仮定し、図7のように寿命設定値までの時間又はサイクル数を余寿命として推定する。

また、電池の寿命は容量低下だけではなく、内部抵抗の増大による放電電圧の低下(回生時は上昇)を示す場合もある。放電電圧の低下は、環境温度が低い条件でも生じるので、寿命評価には、電池状態の正確な測定が重要である。

4. む す び

リチウムイオン電池の制御は、一言で言えば、電池の保護と負荷・回生機器の要求を両立させることである。電池の保護だけであれば、電圧、電流、温度の範囲を逸脱したときに動作する保護回路だけあればよい。一方、回生を頻繁に繰り返すシステムでは、電池寿命を管理する高度な制御が必要となる。特に、リチウムイオン電池は多種多様であるため電池種ごとに適した制御がある。各電池パラメータの予測と計測に基づいたリチウムイオン電池制御は、リチウムイオン電池の能力を最大限活用し、システムの要求に的確にこたえることができる。

参 考 文 献

- (1) Tobishima, S., et al.: A consideration of lithium cell safety, Journal of Power Sources, **81**~**82**, 882~886 (1999)
- (2) エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2011: 富士経済 (2011)
- (3) 産業用リチウム二次電池の安全性試験(単電池及び電池システム), 電池工業会規格 (2011)
- (4) SECONDARY LITHIUM-ION CELLS FOR THE PROPULSION OF ELECTRIC ROAD VEHICLES (IEC-62660), IEC (2010)