

大規模太陽光発電所向け蓄電池制御技術の開発

Development of Control Technologies of Battery for Large-Scale Photovoltaic Power Plants

小 熊 祐 司 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 博士（工学）
前 田 宗 彦 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 主査
今久保 知 史 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部 課長 技術士（電気電子部門）
平 尾 俊 幸 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部

近年、日本では電力安定供給とエネルギー自給率向上のため、再生可能エネルギーの活用が提唱されており、特に大規模太陽光発電所（メガソーラー）の建設・系統連系が活発である。しかし、太陽光発電は日の陰りなど天候の影響を受けて発電電力が大きく変動するため、その大量導入に伴う系統の電圧や周波数への悪影響が懸念されている。本稿では、この課題を受け筆者らが開発に取り組んでいる、発電所から系統へ安定的に電力を供給するための蓄電池制御技術と、今後の展開について述べる。

Recently, the utilization of renewable energies has been proposed for the stable supply of electricity and improvement of the energy self-sufficiency ratio in Japan. Especially, large-scale photovoltaic power plants called “mega-solars” have been constructed one after another, and several of them have already begun supplying electricity to the commercial power grid. The amount of photovoltaic generation drastically fluctuates depending on weather conditions such that the sunlight is obscured by clouds, however. This has caused concern about the negative impacts on the voltage and frequency of the commercial power grid. In this paper, we describe control technologies of battery that we have developed for the stable supply of electricity from power stations to the commercial power grid, and future works for the application of this research.

1. 緒 言

近年、日本国内のエネルギー自給率向上と電力安定供給維持のため、再生可能エネルギーを積極的に活用することが提唱されており、再生可能エネルギー固定価格買取制度⁽¹⁾といった法制度による支援を追い風として、特に大規模太陽光発電所（メガソーラー）の建設・系統連系が活発である⁽²⁾。しかし、太陽光発電は、天候の影響を受けて短時間で発電電力が大きく変動する不安定な電源であり、その大量導入に伴い、系統の電圧や周波数に悪影響を及ぼすことが懸念されている⁽³⁾。これに対して、発電所内に蓄電池などの電力貯蔵設備を併設し、太陽光発電の発電電力変動に合わせて充放電を行うことで、系統供給電力の変動を緩和（平滑化）するという運転方式が数多く提案されている^{(4)~(7)}。太陽光発電所の建設において、蓄電池の設置はコスト的に無視できるものではなく、太陽光発電事業の採算性に大きく影響するため、ここで導入する蓄電池は、求められる平滑化に対して十分な性能をもちつつも、その導入コストを可能な限り抑えられることが望まれる。

当社では、以前から再生可能エネルギーの有効活用と普及に向けた技術開発に注力しており⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、そのなかで

筆者らは前述の課題に対して、

(1) メガソーラーの系統供給電力を平滑化するための蓄電池制御技術の開発

(2) 同制御技術を用いたメガソーラーの系統供給電力の平滑化に必要な蓄電池の容量と、最大充放電電力（以下、必要蓄電池性能）の評価手法の開発

を進め、系統供給電力の平滑化という本来の技術課題の解決のみならず、制御の観点から、この目的のため導入される蓄電池の仕様検討を行うことを目指している。

本稿では、上述の蓄電池制御技術と、必要蓄電池性能評価手法について説明するとともに、太陽光発電システムの実際の発電データに基づく必要蓄電池性能評価結果の一例を示す。

本稿の構成を以下に述べる。まず、**2章**において、蓄電池を備えたメガソーラーのシステムモデルと系統供給電力平滑化のための蓄電池制御モデルについて述べる。**3章**では、**2章**で述べた蓄電池制御モデルに基づく、系統供給電力平滑化に必要な蓄電池性能の評価手法を示す。**4章**では、必要蓄電池性能評価の一例として、太陽光発電システムの実際の発電データに基づく、想定した複数の平滑化制約条件のもとでの必要蓄電池性能評価結果を示す。最後に

5章では課題と今後の展望について述べる。

2. メガソーラーのシステムモデルと系統供給電力平滑化のための蓄電池制御モデル⁽¹⁰⁾

2.1 メガソーラーのシステム構成

一般の蓄電池をもたないメガソーラーでは、太陽光パネルを用いて発電した直流電力を、パワーコンディショナで交流電力に変換し、これをそのまま商用系統へ供給する。したがって、日の陰りなどによって太陽光パネルの発電電力に変動が生じた場合、系統供給電力もこれに連動して変動する。そこで本稿では、発電所内に蓄電池を併設し、その充放電制御によって系統供給電力平滑化を実現する方法を考える。

本稿で想定する、蓄電池が併設されたメガソーラーのシステムモデルを第1図に示す。本モデルにおいては、系統への供給電力を太陽光パネルの発電電力にゆだねるのではなく、その制御目標値を逐次定め、系統供給電力が制御目標値に追従するように、制御目標値に対する太陽光発電電力の過不足を蓄電池の充放電によって補償する。これによって、太陽光パネルの発電電力に急激な変動があった場合でも、蓄電池の充放電によって系統供給電力の変動を抑えることが可能になる。なお、このようなシステムを実現するためには、リチウムイオン電池など、高速な充放電が可能な蓄電池を利用する必要がある。

第1図において、本システムモデルにおいて主要な役割を演じるのは蓄電池システムおよび電力平滑化システムの二つのサブシステムである。

蓄電池システムは、後述する電力平滑化システムから系統供給電力制御目標値を受信し、メガソーラーの系統供給電力が所与の制御目標値に追従するように蓄電池の充放電

を行う。蓄電池システム内のコントローラは、電力計 B で計測した系統連系点 B の電力と制御目標値が一致するように、蓄電池のフィードバック制御を行う。

電力平滑化システムは、電力計 A で計測した至近の太陽光発電電力のトレンドと、蓄電池システムから受信した蓄電池の充電残量に基づき、前述の制御目標値を定める。電力平滑化システムは、一定間隔 ΔT ごとに、① 太陽光発電電力および蓄電池充電残量取得 ② 制御目標値の計算 ③ 蓄電池システムの制御目標値更新、を行う。なお、以下では、電力平滑化システムの動作するタイミングを時刻 $k=0, 1, 2, \dots$ で表す。

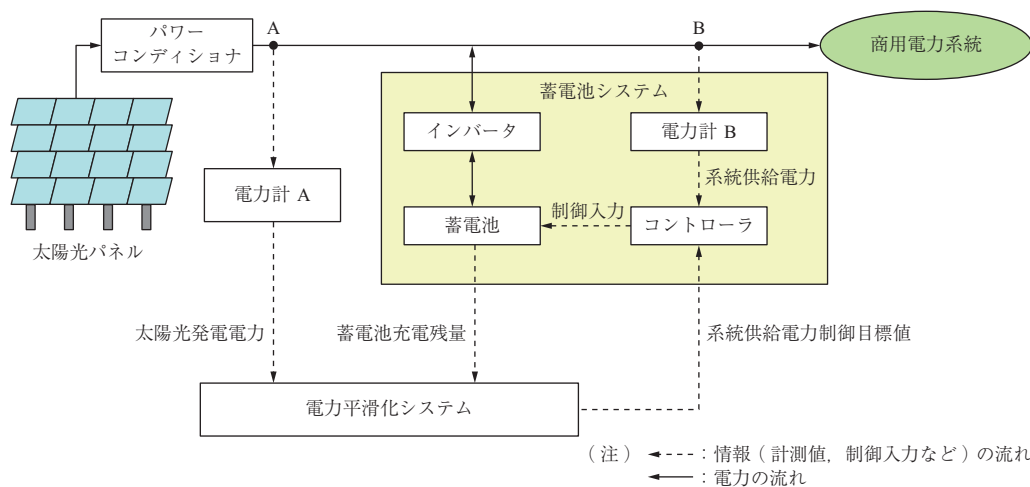
2.2 蓄電池制御モデル

第2図に、電力平滑化システム内で蓄電池の充放電制御に用いられる系統供給電力制御目標値の計算モデル（以下、蓄電池制御モデル）を示す。図中に示す平滑化処理としては、さまざまな手法が考えられるが、本稿では、その一例として、実装が比較的簡便であり、かつ広く用いられている移動平均法^{(4), (5), (7)}を用いたものを述べる。

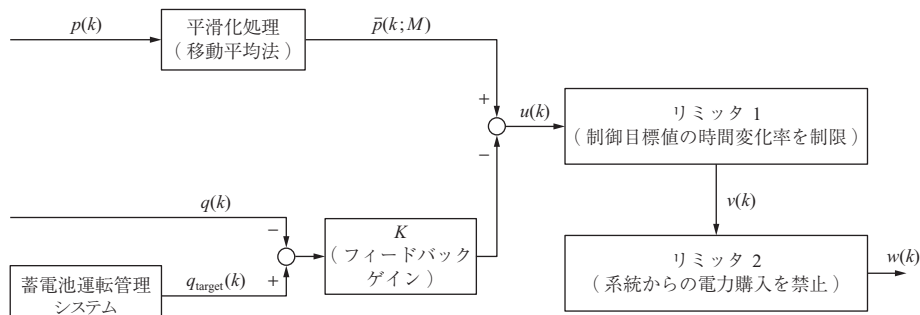
移動平均法を用いた平滑化では、系統供給電力の制御目標値として、現時刻から過去に遡って一定期間の太陽光発電電力の平均値を用いるというのが基本的な考えになる。本稿では、移動平均による制御目標値算出をベースとしつつ、実運用上重要となる次の2点

- (1) 想定されるメガソーラー運転上の制約条件を確実に遵守できること
- (2) 蓄電池の充放電に伴うエネルギーの損失を最小化すること

を考慮して蓄電池制御モデルを構築した。



第1図 蓄電池が併設されたメガソーラーのシステムモデル
Fig. 1 System configuration of a mega-solar with a battery



(注) $p(k)$: 平滑化前太陽光発電電力
 $\bar{p}(k;M)$: 平滑化後太陽光発電電力
 $q(k)$: 現在の蓄電池充電残量
 $q_{\text{target}}(k)$: 蓄電池充電残量目標値
 $u(k)$: 制約条件考慮前の制御目標値
 $v(k)$: リミッタ 1 通過後の制御目標値
 $w(k)$: リミッタ 2 通過後の制御目標値
 (最終的な系統供給電力制御目標値)

第 2 図 系統供給電力制御目標値の計算モデル

Fig. 2 Calculation model of the control target supplying power to the commercial power grid

(1) に関して、本稿では、① 系統供給電力変化率の制限 ② 蓄電池の充電は太陽光発電電力からのみとし、系統電力による充電禁止、の二つの制約を想定することにした。① は系統供給電力の急激な変動による系統の電圧、周波数への悪影響を緩和することを目的としたものである。また ② は、メガソーラーから系統へ供給する電力の売電価格は再生可能エネルギー固定価格買取制度による優遇を受けていることから、制度の適正な運用のため、系統から購入した電力と太陽光パネルで発電した電力が蓄電池内で混在しないよう配慮したものである。

(2) に関して、蓄電池は充放電の過程でインバータの直流/交流変換などによってエネルギーの損失が発生し、またその総量は運転期間に比例する。したがって、メガソーラーの長期的運転を考慮する場合、制御モデルにはエネルギーの損失を最小化するための工夫が必要になる。

具体的な系統供給電力の制御目標値計算の手順を以下に述べる。まず、現時刻 k の太陽光発電電力を $p(k)$ とし、現時刻から至近 M 点の発電電力の移動平均値 $\bar{p}(k;M)$ を、

$$\bar{p}(k;M) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} p(k-m) \dots\dots\dots (1)$$

によって求め、制約条件考慮前の制御目標値 $u(k)$ を、

$$u(k) = \bar{p}(k;M) - K(q_{\text{target}}(k) - q(k)) \dots\dots (2)$$

で計算する。(2) 式の右辺第 2 項は、充放電に伴うエネルギー損失を最小化するために設けられたフィードバック項であり、 $q_{\text{target}}(k)$ は蓄電池充電残量目標値、 $q(k)$ は蓄電池充電残量現在値、 K はフィードバックゲインである。 $q_{\text{target}}(k)$ は適当なアルゴリズムによって時变的に定めてもよいが、本稿 4 章におけるシミュレーションでは定数と

設定している。

次に、(2) 式で計算した $u(k)$ に対し、上述した二つの制約条件にそれぞれ対応するリミッタ

(1) \mathcal{L}_1 : 系統供給電力変化率制限リミッタ

$$v(k) = \mathcal{L}_1(u(k), u(k-1); \Delta T, \gamma, P_{\text{max}}) = \begin{cases} u(k-1) + \Delta T \gamma P_{\text{max}}, & u(k) > u(k-1) + \Delta T \gamma P_{\text{max}} \\ u(k-1) - \Delta T \gamma P_{\text{max}}, & u(k) < u(k-1) - \Delta T \gamma P_{\text{max}} \\ u(k) & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

(2) \mathcal{L}_2 : 系統からの電力購入禁止リミッタ

$$w(k) = \mathcal{L}_2(v(k)) = \max(0, v(k)) \dots\dots\dots (4)$$

を \mathcal{L}_1 , \mathcal{L}_2 の順番で作用させる。(3) 式において、 $v(k)$ は系統供給電力変化率リミッタ通過後の制御目標値、 γ は平滑化制約条件を定める系統供給電力変化率制限値、 P_{max} は太陽光発電パネルの定格発電電力である。また、(4) 式において、 $w(k)$ は最終的な系統供給電力制御目標値である。

本システムでは、(4) 式で求めた系統供給電力制御目標値を実現するよう、太陽光発電電力の変動に応じて蓄電池の充放電が行われる。時刻 k における蓄電池充電残量 $q(k)$ は、計算周期 ΔT が発電電力の変動周期に対して十分に短いとして、近似的に、

$$q(k) = \sum_{k=0}^{k-1} e'(k) \Delta T + q(0) \dots\dots\dots (5)$$

で計算できる。ただし、

$$e'(k) = \begin{cases} \beta e(k), & e(k) > 0 \\ \frac{1}{\beta} e(k), & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$e(k) = p(k) - w(k) \dots\dots\dots (7)$$

であり、ここで $e(k)$ は蓄電池充放電電力（正が充電、負が放電）、 $e'(k)$ は蓄電池側からみた、損失を考慮した充放電電力、 $0 < \beta < 1$ はインバータ効率を含めた充放電効率である。本システムにおける蓄電池充放電制御シミュレーションを行う際は、太陽光発電電力 $p(k)$ 、($k = 0, 1, 2, \dots$) に対して、(1)～(4)式を用いて系統供給電力を、(5)～(7)式を用いて蓄電池の充電残量と充放電電力を求める。

なお、以降の議論では、 $q(0) = 0$ とし、これが蓄電池 SOC（充電割合）の 50% に相当することにする。したがって、初期時刻 $k = 0$ のときよりも充電残量が低い値をとるとき、 $q(k)$ は負の値をとることに注意されたい。

3. メガソーラーの系統供給電力の平滑化に必要な蓄電池性能の評価手法

2章で述べた制御モデルによってメガソーラーの系統供給電力の平滑化を実現するためには、一定以上の蓄電池容量（蓄電池がどれだけのエネルギーを貯蔵できるかを示す。単位：kWh）と最大充放電電力（蓄電池が瞬間的にどれだけの電力の充放電が可能かを示す。単位：kW）が必要になる。緒言でも述べたとおり、太陽光発電所の建設において、蓄電池の設置コストは無視できるものではなく、そのコストには容量と最大充放電電力が大きく影響する。そこで本稿では、これら二つ（容量および最大充放電電力）を蓄電池性能と定義し、本章では、2章で述べた制御モデルに基づくシミュレーションからメガソーラーの供給電力平滑化に必要な蓄電池性能を評価する手法について述べる。

系統供給電力平滑化に必要な蓄電池容量を Q_{\max} 、最大充放電電力を E_{\max} とする。2章で述べた制御モデルは、リミッタの効果によって、蓄電池の容量と最大充放電電力が十分であれば平滑化制約条件は自動的に満足される。つまり、平滑化に必要な蓄電池の容量と最大充放電電力は、蓄電池の充電残量と充放電電力がとり得る上下限から求めることができる。そこで、保守的な必要性能評価手法としては、蓄電池容量と最大充放電電力を無限大と仮定した蓄電池充放電制御シミュレーションをまず行い、得られた蓄電池充電残量と充放電電力の推移から、必要な蓄電池容量 Q_{\max} と最大充放電電力 E_{\max} を、それぞれ

$$Q_{\max} = 2 \times \max \left(\max_k q(k), -\min_k q(k) \right) \dots\dots (8)$$

$$E_{\max} = \max \left(\max_k e(k), -\min_k e(k) \right) \dots\dots (9)$$

によって求める方法が考えられる。ここで、 $\max_k q(k)$ と $\min_k q(k)$ は、それぞれシミュレーション期間全体を通じての蓄電池充電残量の最大値および最小値であり、 $\max_k e(k)$ と $\min_k e(k)$ は、それぞれシミュレーション期間全体を通じての蓄電池充放電電力の最大値（最大充電電力）および最小値（最大放電電力）である。なお、(8)式右辺の 2 倍の部分は、2章で述べた、 $q(k) = 0$ が SOC50% に相当するという前提を考慮したものである。

(8) および (9) 式を用いた必要蓄電池性能評価は、比較的直観的であり、かつ保守的な評価となるため、必要性能や蓄電池設置コストの概算には適している。しかし、

(1) ほかのメガソーラーと合わせた「ならし効果⁽¹¹⁾」による系統安定化効果を考慮しておらず、過度に保守的な性能評価になる。

(2) 必要容量、最大充放電電力が最大になる特定日の発電パターンにのみ依存した評価結果になり、ふだんの運転で蓄電池性能がどの程度必要か評価できない。

といった課題があり、プラントの規模や系統事情を考慮した実際のメガソーラー設計の際には必ずしも有用ではないと考えられる。そこで本稿では、平滑化制約条件を絶対的なものとして捉えず、必要性能に寄与する特定少数日の太陽光発電パターンのみならず、1年間全体の発電傾向を踏まえたうえで、「蓄電池性能がどの程度あれば、どの程度の割合の日で平滑化制約条件を遵守できるか」を評価する方法を示す。具体的には、 D をシミュレーション全日数、 S をシミュレーション全日数のうち日中の全時刻で平滑化制約条件を遵守できた日の数（以降、遵守日数）として、

$$R(Q_{\max}, E_{\max}) = 100 \times \frac{S(Q_{\max}, E_{\max})}{D} \quad (\%) \dots\dots\dots (10)$$

で定義される平滑化制約条件遵守日率 R （以降、遵守日率）を、さまざまな蓄電池容量 Q_{\max} と最大充放電電力 E_{\max} に対して評価していくことで、蓄電池性能と遵守日率の関係を明らかにする。遵守日数 S と遵守日率 R は、蓄電池容量 Q_{\max} と最大充放電電力 E_{\max} に依存することから、(10)式ではそれぞれ $S(Q_{\max}, E_{\max})$ 、 $R(Q_{\max}, E_{\max})$ と表記している。

遵守日数 $S(Q_{\max}, E_{\max})$ は、蓄電池容量と最大充放電電力を無限大と仮定した蓄電池充放電制御シミュレーションにより得られた蓄電池充電残量と充放電電力の推移から、

$$S(Q_{\max}, E_{\max}) = \left\| \left\{ d \mid \begin{array}{l} 2 \times \max(q_{\max}^d, -q_{\min}^d) < Q_{\max} \\ \cap \max(e_{\max}^d, -e_{\min}^d) < E_{\max}, \\ d = 1, \dots, D \end{array} \right. \right\| \dots\dots\dots (11)$$

で求める。ここで、 q_{\max}^d , q_{\min}^d はそれぞれ d 日目 ($d = 1, \dots, D$) の蓄電池充電残量の最大値および最小値、 e_{\max}^d , e_{\min}^d はそれぞれ d 日目の充放電電力の最大値（最大充電電力）および最小値（最大放電電力）である。また記号 $\|\cdot\|$ は集合の要素数を意味する。第 3 図に、(11) 式の概念図を示す。第 3 図は 4 章で行うシミュレーション結果（条件については 4 章を参照）の一部であり、2 章の制御モデルのもと、太陽光発電システムの実際の発電データを用いた蓄電池充放電制御シミュレーション結果から、1 年のうち各日の蓄電池の充電残量の最大値および最小値（-(a)）、最大充電電力および最大放電電力（-(b)）の推移を示したものである。緑色の枠線は所与の蓄電池容量

（-(a)）、最大充放電電力（-(b)）を示しており、第 3 図の場合は、 $Q_{\max} = 0.4 \text{ pu}\cdot\text{h}$ （-(a)）、 $E_{\max} = 0.6 \text{ pu}$ （-(b)）としている。ここで pu (per unit) とは、太陽光パネルの定格出力を 1 としたときの電力の割合を示し、pu·h は 1 pu で 1 時間充放電したときの電力量に相当する。各図中、各日の最小（最大）充電残量、最大充放電（充電）電力がともに緑色の枠線の内側に収まっている日が制約遵守日である。

以上の考え方に基づく必要蓄電池性能評価の流れを以下に示す。

手順 1 蓄電池充放電制御シミュレーションの実行

2 章で述べたシステムモデルと制御モデルに基づく、長期間（たとえば 1 年間分）の太陽光発電データを用いた連続的な蓄電池充放電制御シミュレーションによって、シミュレーションの各時刻 k における蓄電池充電残量 $q(k)$ と蓄電池充放電電力 $e(k)$ を求める。ここで、「連続的」とは、連続する 2 日の間で蓄電池の充電残量を引き継がせることをいう。また、シミュレーション中の $q(k)$ と $e(k)$ には特に制約を考慮しないこととする。

手順 2 各日における充電残量・充放電電力の最小値および最大値の計算

シミュレーション期間中の d 日目 ($d = 1, \dots, D$) における蓄電池充電残量の最大値 q_{\max}^d 、最小値 q_{\min}^d と充放電電力の最大値 e_{\max}^d 、最小値 e_{\min}^d を求める。

手順 3 蓄電池性能に対する遵守日率の計算

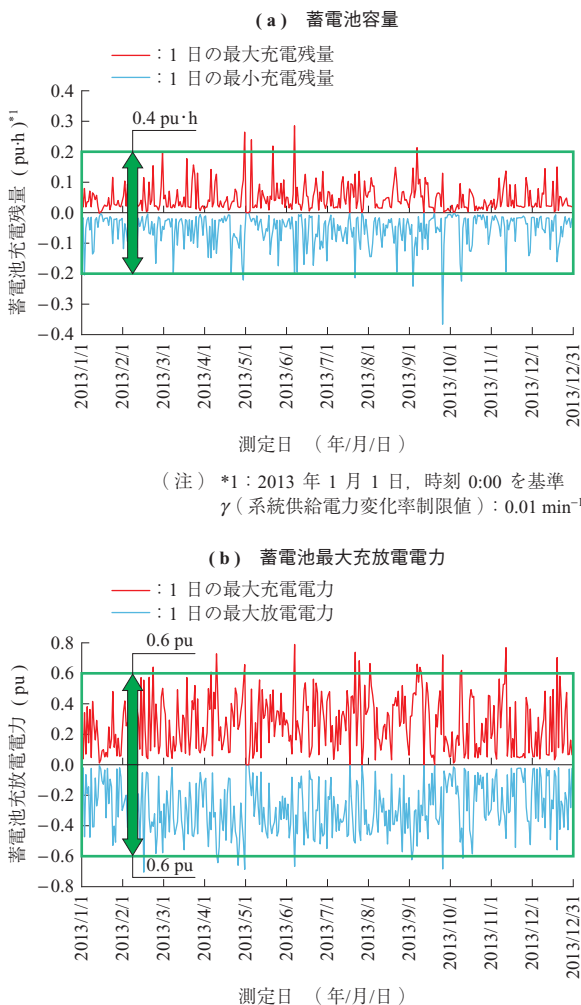
手順 2 で得た q_{\max}^d , q_{\min}^d , e_{\max}^d , e_{\min}^d ($d = 1, \dots, D$) を基に、さまざまな蓄電池容量 Q_{\max} と最大充放電電力 E_{\max} に対して、(10) 式と (11) 式を用いて、遵守日数 $S(Q_{\max}, E_{\max})$ と遵守日率 $R(Q_{\max}, E_{\max})$ を求める。

手順 4 蓄電池性能に対する遵守日率の関係の整理

手順 3 で得た、 Q_{\max} と E_{\max} に対する $R(Q_{\max}, E_{\max})$ の関係を整理する。

上述の評価方法を用いることで、たとえば、

- (1) ならし効果を期待し、多少の制約逸脱が許されると仮定したとき、どの程度の性能が求められるのか、
 - (2) 年間を通じて蓄電池がどの程度動作するのか、
- など、実際のメガソーラー設計の際の検討材料として広く有用な評価結果を得ることができる。また本手法を用いた場合でも、(8) および (9) 式に相当する、すべての日で平滑化制約条件を遵守するための必要性能評価も可能である。



第 3 図 遵守日数の計算概念図

Fig. 3 Explanatory chart for the calculation of the number of days satisfying the smoothing constraint

なお、メガソーラーの系統供給電力平滑化に求められる蓄電池の性能は、平滑化制約条件や太陽光発電パターンのほか、制御モデルやそのパラメータにも依存する。本稿では一例として簡易的な制御モデルを用いているが、蓄電池性能の合理化を目指す場合、制御モデルの高度化やそのパラメータ最適化も重要な課題となることを付記しておく。

4. 太陽光発電システムの実際の発電データに基づく必要性能評価の例

4.1 評価条件

本章では、3章で示した手法による、系統供給電力平滑化に必要な蓄電池性能の評価結果の一例を示す。第1表および第2表に、本評価で用いた太陽光発電データの諸元と蓄電池制御モデルのパラメータ設定⁽¹⁰⁾をそれぞれ示す。また第4図に、太陽光発電データを採取した、IHI横浜事業所内の太陽光発電システムの外観を示す。本評価では、検討結果の比較性を考慮して、発電電力の値を、定格出力が1 pu となるように規格化している。なお、シミュレーション期間（1年間：365日）のうち、全部で7日間のデータ欠測日があるが、シミュレーションではこれらの日の太陽光発電電力は1日を通してゼロであるとし、代わりに(10)式の遵守日率の計算式の分母 D を、 $D = 365 - 7 = 358$ とした。

今回用いた太陽光発電データは、メガソーラーと比較して規模の小さい太陽光発電システムによるものである。天候の変動に伴う発電電力の変動はシステムの規模に依存し、規模が小さいシステムであるほど、発電電力の定格出力に対する変動は大きくなる。したがって、以下で示す評価結果は、メガソーラーの系統供給電力平滑化を考えるうえで保守的なものであると考えられる。

4.2 蓄電池性能と遵守日率の関係（容量／最大充放電電力を個別に評価）

まず、蓄電池の容量と最大充放電電力の大小が、それぞれの程度平滑化性能の向上に寄与するかを把握するため、①容量と遵守日率の関係②最大充放電電力と遵守日率の関係、を個別に評価する。具体的には、①の場合は最大充放電電力を、②の場合は容量を無限大と仮定してそれぞれ遵守日率を求めた。

第5図および第6図に、蓄電池制御シミュレーションの結果から個別評価の考え方に基き得られた、蓄電池容量と遵守日率の関係、および蓄電池最大充放電電力と遵守日率の関係をそれぞれ示す。

蓄電池容量に関して、第5図から、大きな容量の蓄電

第1表 太陽光発電データ諸元
Table 1 Photovoltaic power generation data

所在地	神奈川県横浜市磯子区（IHI 横浜事業所内）
パネル方位角（度）	151.820
パネル傾斜角（度）	10.0
定格出力（kW）	10
データ期間（年/月/日）	2013/1/1 ~ 2013/12/31
データ欠測日（月/日）	5/3, 5/4, 5/5, 7/19, 7/28, 9/12, 9/20（7日間）
データ間隔（s）	60 （内挿によって1s間隔のデータを用意）

第2表 蓄電池制御モデルのパラメータ設定⁽¹⁰⁾
Table 2 Parameter settings of the battery control model⁽¹⁰⁾

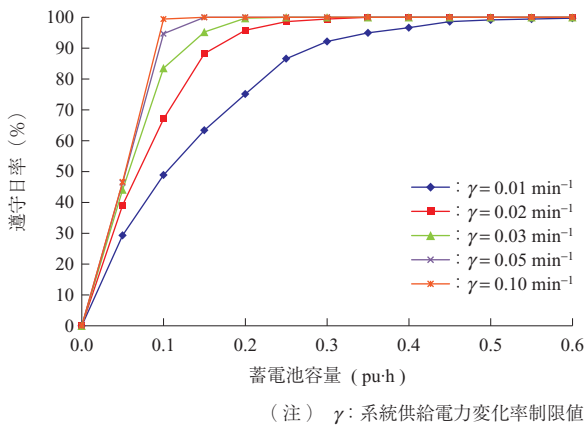
名称	パラメータ	単位	値
計算周期	ΔT	s	1.0
移動平均に用いるサンプル数	M	-	1 201 (20 min)
系統供給電力変化率制限値	γ	min^{-1}	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.10
フィードバックゲイン	K	h^{-1}	1.0
太陽光パネル定格発電電力	P_{\max}	pu	1.0
蓄電池充電残量目標値	$q_{\text{target}}(k)$	$\text{pu} \cdot \text{h}$	0.0 (constant)
蓄電池充放電効率	β	-	0.95



第4図 IHI 横浜事業所 太陽光発電システム
Fig. 4 IHI Corporation Yokohama office photovoltaic generation system

池を用意することで、遵守日率を高くすることができると分かる。また、系統供給電力変化率制限値 γ の値が大きい場合、すなわち制約が緩い場合、同様に遵守日率は高くなること分かる。本シミュレーションによれば、シミュレーション全期間において平滑化制約条件を遵守するためには、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ の場合では約 $0.5 \text{ pu} \cdot \text{h}$ 、 $\gamma = 0.10 \text{ min}^{-1}$ の場合、約 $0.1 \text{ pu} \cdot \text{h}$ の容量が必要である。

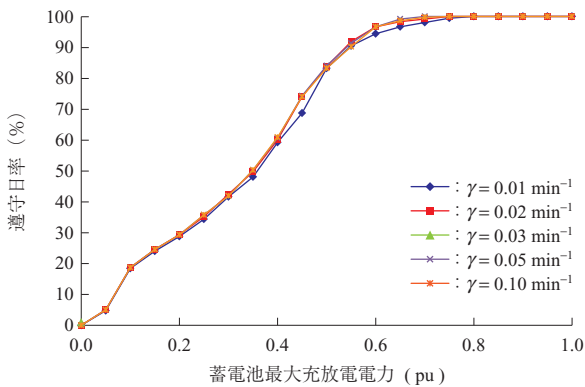
また、第5図から、蓄電池容量を大きくするに従い、容量増加分に対する遵守日率の増加は鈍くなること分かる。これは、大きな蓄電池容量を必要とする太陽光発電パターンの日が発生する頻度はまれであることを意味している。第7図に、本シミュレーションのうち、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ としたケースにおいて、蓄電池充電残量の変動が最大となった日の各種電力と充電残量の推移を示す。第7



(注) γ : 系統供給電力変化率制限値

第 5 図 蓄電池容量と遵守日率の関係

Fig. 5 Relationship between battery capacity and the rate of days satisfying the smoothing constraint

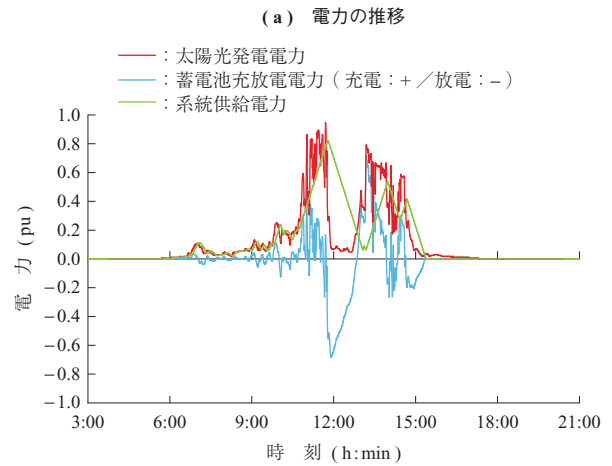


第 6 図 蓄電池最大充放電電力と遵守日率の関係

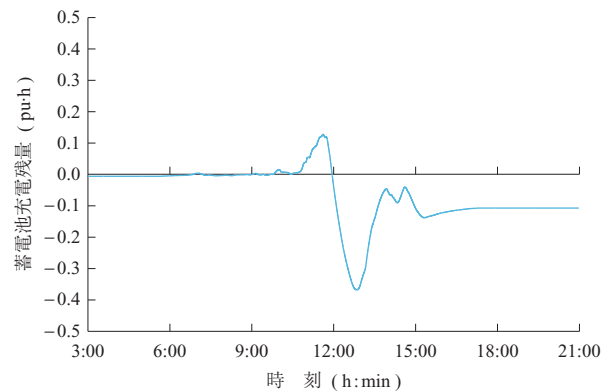
Fig. 6 Relationship between the battery maximum charge/discharge power and the rate of days satisfying the smoothing constraint

図 - (a) において、太陽光発電電力は、午前 10:00 ごろまでは低く推移しており、その後急激に上昇したのち、正午から大きく急落している。この間、平滑化制約条件を遵守するため、蓄電池の充放電がなされており、その結果として蓄電池充電残量 (第 7 図 - (b)) が大きく変動している。蓄電池充電残量の変動量は、太陽光発電電力と系統供給電力の差の積分で与えられるため、大規模な発電電力変動があった場合でも、一時的に日が陰るなど、それが短周期の変動であれば、充電残量の変動に対する寄与は小さくなる。しかし、第 7 図のケースのように、晴れから曇り (あるいは曇りから晴れ) といった天候の急変による発電電力の大変動が起こり、かつ変動後の発電電力レベルが長時間継続するようなケースでは、充電残量の変動は大きくなり、結果として平滑化のために大きな蓄電池容量が必要となる。

なお、前述のとおり、第 7 図のような大規模な発電電力変動が発生する日は 1 年を通してまれであり、なら



(b) 蓄電池充電残量の推移



(注) 条件

・シミュレーション対象日: 2013 年 9 月 26 日
・ γ (系統供給電力変化率制限値): 0.01 min^{-1}

第 7 図 蓄電池充放電電力と充電残量の推移

Fig. 7 Transition of the battery charge and discharge power and charged energy

し効果などを見積もったうえで、遵守日率をたとえば 95% としてよいのであれば、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ の場合、第 5 図から、必要な蓄電池容量は約 0.35 pu-h (100% 遵守の場合と比較して -0.15 pu-h) まで引き下げることが可能であることが分かる。その場合でも、1 年を通して約半分の日では 0.1 pu-h 程度の容量があれば十分である。

次に、蓄電池の最大充放電電力に関して第 6 図から、容量と同様に最大充放電電力の大きな蓄電池を用意することで、遵守日率を高めることができると分かる。ただし、最大充放電電力と遵守日率の関係は、容量と遵守日率の関係とはやや傾向が異なり、遵守日率が約 100% となるまで、最大充放電電力にほぼ比例するかたちで遵守日率が高くなることが分かる。これは、蓄電池の充電残量変動量が大きくなる第 7 図に示すような発電パターンがまれなものであるのに対して、日の陰りなどによる一時的な発電電力の急変は、1 年を通じて日常的に生じているためであると考えられる。

また、第6図から、系統供給電力変化率制限値 γ の値は、遵守日率にほとんど影響しないことが分かる。本稿の蓄電池制御モデルにおいて、太陽光発電電力変動の際の蓄電池の充放電電力は、系統供給電力の制御目標値と太陽光発電電力の差で与えられるが、今回試行したパラメータの範囲 $0.01 \text{ min}^{-1} \leq \gamma \leq 0.10 \text{ min}^{-1}$ では、系統供給電力の制御目標値の変化は太陽光発電電力の変動と比較すると僅かなものとなる。したがって、 γ が小さい場合、蓄電池の必要最大充放電電力は γ にほとんど依存せず、起こり得る太陽光発電電力の変動幅にほぼ等しいものとなる。本シミュレーションによれば、シミュレーション全期間において平滑化制約条件を遵守するためには γ の値によらず、約 0.8 pu の最大充放電電力が必要である。

4.3 必要な蓄電池の容量と最大充放電電力の同時評価

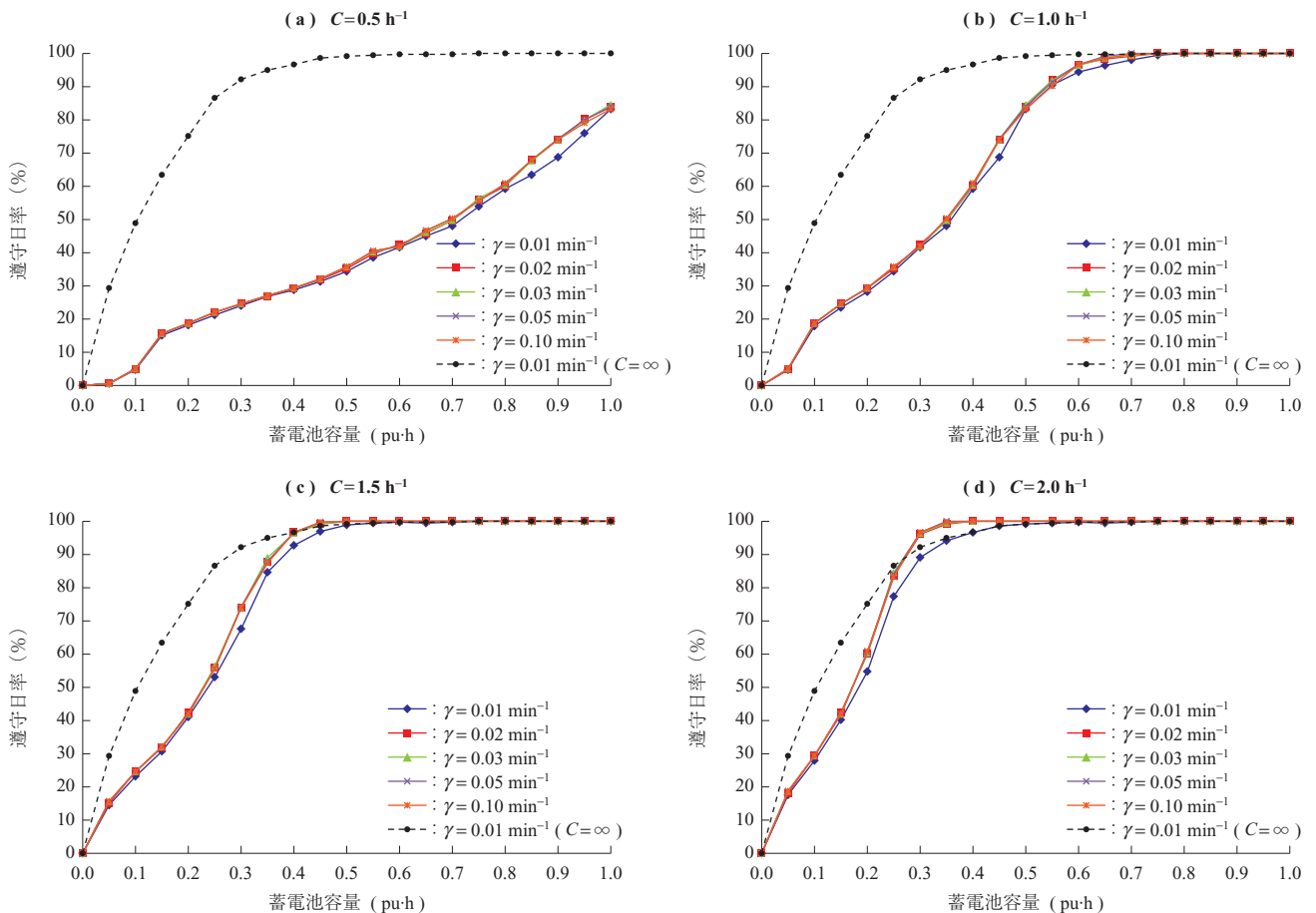
4.2節では、容量と最大充放電電力について、個別に必要な性能を評価したが、本節では、より現実的な蓄電池の必要性能を評価するため、(10)式を用いて遵守日率を求める際に容量と最大充放電電力を同時に考慮したうえで蓄電池性能と遵守日率との関係性を評価する。ここでは、蓄電池の

容量と最大充放電電力のそれぞれの値の組合せに対して遵守日率を評価することとなる。本稿では、蓄電池の容量と最大充放電電力の比として最大充放電電力容量比 C を、

$$C = \frac{E_{\max}}{Q_{\max}} \dots\dots\dots (12)$$

で定義し (C は C レートとも呼ばれる。), これを用いて容量と最大充放電電力の関係を整理する。 C の単位は時間の逆数の次元で任意にとることが可能であり、本稿では h^{-1} とし、1時間当たり蓄電池容量のどれだけの割合を充放電できるかを示すものとする。

第8図に、複数の最大充放電電力容量比 C の値に対して、蓄電池容量と遵守日率の関係を評価した結果を示す。各図中には、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ ($C = \infty$) の系列を併せてプロットしてある。これは、4.2節で評価した容量のみを考慮した個別評価の結果に等しいものである。第8図から、容量と最大充放電電力を同時に考慮した場合、容量のみを考慮した場合と比較して、同じ蓄電池容量に対する遵守日率は低くなっており、特に C の値が小さいケースにおいてその傾向が顕著であることが分かる。また全体的に、系



第8図 最大充放電電力を同時に考慮した場合の蓄電池容量と遵守日率の関係

Fig. 8 Relationship between the battery capacity and the rate of days satisfying the smoothing constraint simultaneously considering the battery maximum charge and discharge power

統供給電力変化率制限値 γ による遵守日率の違いはほぼないことが分かる。これは、遵守日率の決定に関して最大充放電電力が支配的であり、4.2 節で考察した最大充放電電力と遵守日率の関係に強く影響を受けているためと考えられる。

本シミュレーションによれば、シミュレーション全期間において平滑化制約条件を遵守するためには、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ の場合、 $C = 2.0 \text{ h}^{-1}$ のとき約 $0.5 \text{ pu}\cdot\text{h}$ 、 $C = 1.5 \text{ h}^{-1}$ のとき約 $0.6 \text{ pu}\cdot\text{h}$ 、 $C = 1.0 \text{ h}^{-1}$ のとき約 $0.8 \text{ pu}\cdot\text{h}$ の容量が必要である。

これらの評価結果は、実際のメガソーラーの蓄電池性能設計の概算に利用することもできる。その場合、上述の評価結果に対象のメガソーラーの定格出力を乗ずればよい。たとえば、 $C = 2.0 \text{ h}^{-1}$ のとき約 $0.5 \text{ pu}\cdot\text{h}$ という上述の結果を 4 MW のメガソーラーに適用する場合、必要容量は $2 \text{ MW}\cdot\text{h}$ となる。ただし、4.1 節で言及したとおり、本稿の評価結果は実際の想定されるメガソーラーと比較して規模の小さい太陽光発電システムに基づくものであり、その評価結果は保守的なものとなる。また、メガソーラーの発電パターンは設置地域の気象条件にも依存し、たとえば、冬場の寒冷地では、太陽光パネルへの積雪の影響によって、発電量が低下するなどの事実が知られている。ただし、これらの要素がどの程度必要性能に寄与するかについて、現時点では知見がなく、今後、実証試験などを通じて確認していく必要がある。

5. 結 言

本稿では、メガソーラーの系統供給電力を平滑化するための蓄電池制御技術と、同制御技術の実現に必要な蓄電池性能の評価手法について述べ、性能評価結果の一例として、想定した複数の平滑化制約条件に対する必要蓄電池性能を、太陽光発電システムの実際の発電パターンに基づくシミュレーションによって求め、その結果を示した。

今後の課題としては、本稿で示した系統供給電力平滑化システムに関して、実機を用いた実証を行うことが挙げられる。このほか、平滑化に必要な蓄電池の仕様合理化のための蓄電池制御モデルの改良を考えている。

今後も、筆者らは蓄電池制御技術の高度化を通じて、太陽光発電をはじめとする、再生可能エネルギーのさらなる普及に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁：再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック 2015（平成 27）年度版 2015 年 3 月
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁：平成 26 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2015）2015 年 7 月
- (3) 桑山 顕：稚内メガソーラープロジェクト（1）— 系統安定化技術の開発について — 北海道電力研究年報 Vol. 41 2010 年 10 月
- (4) 奥田靖男, 木村 操：太陽光発電システムの出力変動抑制技術 東芝レビュー Vol. 65 No. 9 2010 年 9 月 pp. 10 - 14
- (5) 橋本 勉, 栗田章央, 南 正明, 吉岡正博, 小林克明, 橋本雅之：リチウムイオン二次電池を用いた再生可能エネルギーの系統連系円滑化システムの開発 三菱重工技報 Vol. 48 No. 3 2011 年 pp. 52 - 59
- (6) 宮崎裕一, 由本勝久, 井上俊雄, 七原俊也：蓄電池を用いた太陽光発電の出力変動抑制制御手法の開発 — 変化速度制限を用いた出力変動抑制制御手法の提案 — 電力中央研究所報告 2011 年 5 月 R10034 pp. 1 - 27
- (7) 直井伸也, 野呂康宏, 奥田靖男：出力変動抑制機能付き太陽光発電システムの実証試験 東芝レビュー Vol. 67 No. 1 2012 年 1 月 pp. 14 - 17
- (8) 磯本 馨：IHI の再生可能エネルギーへの取り組み IHI 技報 第 52 巻 第 4 号 2012 年 11 月 pp. 16 - 22
- (9) 技術開発本部総合開発センター：賢い電気の使い方 スマートエネルギーネットワーク技術 IHI 技報 第 53 巻 第 2 号 2013 年 6 月 pp. 22 - 25
- (10) 小熊祐司, 前田宗彦, 平尾俊幸, 今久保知史, 原亮一, 北 裕幸：大規模太陽光発電所における系統供給電力変動抑制のための必要蓄電池性能評価 平成 27 年電気学会 C 部門大会講演論文集 2015 年 8 月
- (11) 大関 崇, 高島 工, 大谷謙仁, 菱川善博, 興水源太郎, 内田恵久, 荻本和彦：太陽光発電の広域的ならし効果に関する分析・評価 電気学会論文誌 B Vol. 130 No. 5 2010 年 5 月 pp. 491 - 500