

蓄電池を用いた太陽光発電電力平準化システム

PV Output Power Smoothing System using the Battery

廣瀬 和雅^{※1}
Kazumasa Hirose
神部 晃^{※1}
Akira Kanbe
佐藤 徹^{※2}
Toru Satoh

1. はじめに

再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行され、太陽光発電の導入が急増している。太陽光発電の出力は天候の影響により激しく変動する。そのため、太陽光発電が大量導入されると、その出力変動により配電線系統の電圧や周波数が変動することが問題視されている。この出力変動に対する対策として、蓄電池システムを設置して、太陽光発電の出力変動を緩和(平準化)する電力平準化システムが各方面で検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。

今回、電力平準化システムのシステム構成や制御方法、蓄電池容量の算出方法について検討を行なった。また、それにより設計した電力平準化システムの動作シミュレーションを行なって設計結果を確認したので、それらについて報告する。

2. 電力平準化の原理

(1) 電力フィルタ

電力平準化システムの機能は、急激に変動する太陽光発電の出力を平準化して系統に供給することである。この機能を実現するためには、太陽光発電の出力を平滑化するローパスフィルタ(LPF)を構成して系統に接続すれば良い。

すなわち、電力平準化システムを構成することは、原理的に図1に示すような電力フィルタを構成することと同じになる。電力フィルタの減衰量を大きくすればするほど平準化ができるが、逆に蓄電池容量の増大化をまねく。このため、システムを最適化するには、その電力フィルタの伝

達関数 G_p をいかに設計するかに尽きる。

図1では、電力フィルタは基本的な1次遅れフィルタを例示してあるが、本稿では種々のフィルタを設計して最適化の検討を行なった。

(2) 電力フィルタの制御構成

電力フィルタの具体的な制御構成を図2に示す。

太陽光発電の出力電力 P_{in} を変動抑制フィルタ G_f により平滑化処理を行なったものが、系統に供給する電力の目標値 P_o^* となる。その目標値と太陽光発電の出力の差分を、蓄電池システムの出力電力指令値 P_{bs}^* とする。蓄電池システムは、その指令値にしたがって蓄電池の電力を充放電制御する。

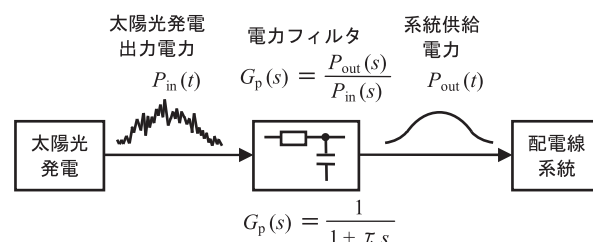
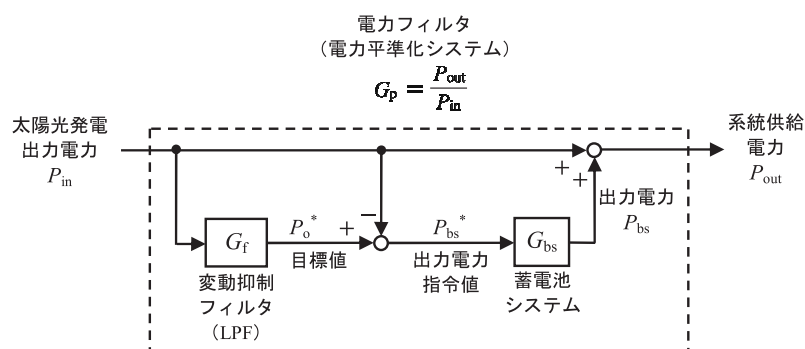


図1 電力平準化の原理



<制御概要>

- ・ $P_{out} = P_{in} + P_{bs}$
- ・ $P_{bs}^* = P_o^* - P_{in}$
- ・ $P_o^* = G_f P_{in}$
- ・ 蓄電池システムは、 $P_{bs} = P_{bs}^*$ となるように出力電力 P_{bs} を制御する。
- ・ 以上のことから、

$$P_{out} = P_{in} + P_{bs}^*$$

$$= P_{in} + G_f P_{in} - P_{in}$$

$$= G_f P_{in}$$

$$\therefore G_p = G_f$$

注) 式中のラプラス変換の変数 s は省略

図2 電力フィルタの制御構成

※1 電力事業部 環境エネルギー技術部 パワエレG
※2 電力事業部

以上のように制御することにより、平滑化された電力が系統に供給される。この場合、図2の演算式に示すように変動抑制フィルタ G_f が、図1の電力フィルタ G_p と一致することになる。

3. 電力平準化システムの構成

電力平準化システムの構成は、図2の制御構成にしたがって太陽光発電に対し交流側で並列に接続する形とした。それによるシステム構成を図3に示す。

この構成の特長は、太陽光発電が複数ある場合でも一つの電力平準化システムで電力の平準化が可能である点と、既設の太陽光発電設備に容易に追加設置できる点である。

構成部品は、蓄電池と、太陽光発電や蓄電池の出力電力を計測するトランスデューサ等のセンサ、それからの値を基に電力平準化制御を行なって蓄電池の出力電流指令値を生成する平準化コントローラ、生成された指令値を基に蓄電池の出力電流を制御し充放電を行なうパワーコンディショナ(以下、蓄電池パワコン)である。

その中で、制御の中心である平準化コントローラの制御ブロック図を図4に示す。平準化コントローラは、変動抑制フィルタの機能と、蓄電池システムにおける蓄電池パワコンの出力電力 P_{bs} をフィードバック制御する機能を有している。

4. 蓄電池容量 B_{cap} の算出法

4.1 蓄電池容量算出法の概要

電力平準化システムにおいて、システムの性能およびコストの面で最も大きい割合を占めるのが蓄電池である。特に、平準化システムの設計において最重要ポイントとなるのは、蓄電池容量の決定である。

今回、系統に供給する電力の変動速度 dP_{out}/dt の上限値と太陽光発電の出力変動速度 dP_{in}/dt から、電力平準化システムに必要な蓄電池容量 B_{cap} を算出する方法を新たに考案した。

出力変動の激しさを表す指標として、変動速度の絶対値の最大値 $|dP/dt|_{max}$ を用いることとする。電力フィルタ通過後に $|dP/dt|_{max}$ がどの程度小さくなるかで電力フィルタの性能(電力平準化の度合)を評価することにする。この評価により電力フィルタを決めると、太陽光発電の容量に応じて蓄電池容量 B_{cap} が決まってくる。

最初に、蓄電池容量算出の概略手順を示し、次節以降でその詳細を説明する。なお、これ以降、電力や出力の変動速度のことを単に電力変動とか出力変動と言うことにする。

蓄電池容量算出の概略手順は次のようになる。

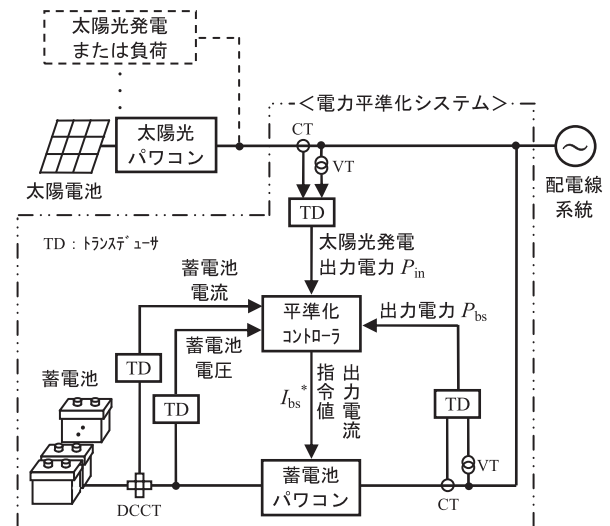


図3 電力平準化システムの構成

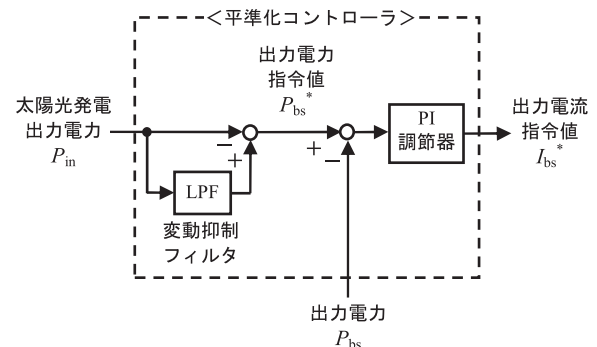


図4 平準化コントローラの制御ブロック図

- ① 最初に、電力フィルタ通過後に $|dP/dt|_{max}$ がどの程度減衰するかを把握する。
入出力における $|dP/dt|_{max}$ の比を電力変動減衰量 G とする。そして、その電力変動減衰量 G と電力フィルタの遮断周波数 f_c との関係把握する。
数種類のフィルタについて上記の関係を把握し、最終的にその中から最適なフィルタを選択する。
- ② 次に、系統に供給する電力の変動速度の上限値 $|dP_{out}/dt|_r$ と太陽光発電の出力変動 $|dP_{in}/dt|_{max}$ の比から必要な電力変動減衰量 G_r を決める。
- ③ そして各フィルタについて、上で求めた減衰量を得るために必要となる遮断周波数 f_c を求める。
- ④ 最後に、各フィルタを用いて平準化を行なった場合に、1日の中で蓄電池に蓄えられる電力量 Q が最大となるポイント(最大蓄電量 Q_{max})を求める。そして、年間を通じてこの値の最大値を求める。この最大値

が最小となるフィルタがシステムに最適なフィルタであり、その値が必要となる蓄電池容量の最小値 B_0 (理想値)である。この B_0 に対して、蓄電池やパワコンの充放電効率や、蓄電池を使用する際の放電深度 (蓄電池容量に対する放電量の比)を考慮したものが、実際に必要な蓄電池容量 B_{cap} になる。

上記手順を実施するにあたり、あらかじめ諸量の関係性を把握しておく。まず①の手順として、数種類のフィルタに対して遮断周波数 f_c と電力変動減衰量 G の関係性を把握する。次に④の手順として、各フィルタに対して遮断周波数 f_c と最大蓄電量 Q_{max} の関係をあらかじめ把握しておく。

今回の検討では、当社内に設置してある太陽光発電設備 (100 kWと10 kW)を対象とし、その出力データ (1秒サンプリングデータ)を基にしてこれらの関係を把握した。

4.2 電力フィルタと電力変動減衰量 G の関係

最初に、電力フィルタの遮断周波数 f_c と電力変動減衰量 G の関係を調べる。

具体的には、対象とする太陽光発電の実際の出力データをもとにした P_{in} を電力フィルタに入力してその出力 P_{out} を計算する。その結果から、フィルタの入力の最大変動速度 $|dP_{in}/dt|_{max}$ と出力の最大変動速度 $|dP_{out}/dt|_{max}$ の比 G (電力変動減衰量)を求める。そして、数種類のフィルタについて、遮断周波数を変化させて電力変動減衰量がどのように変化するかを調べる。

今回、電力フィルタは1次と2次、3次のバタワース型ローパスフィルタ (LPF)とした。その理由は、太陽光発電の出力はステップ状に急変する場合があるので、ステップ応答特性が良い点や設計が容易な点を考慮したためである。

まず、対象とする太陽光発電の出力データの中から、変動が激しい日のデータを数日分選び、そのデータによる P_{in} を電力フィルタに入力してその出力 P_{out} を計算した。そして、その結果から電力変動減衰量 G を求めグラフ化した。

太陽光発電の出力変化の様相はさまざまであり、特に変動が激しい日の出力変化パターンは千差万別である。その最悪ケースにも対応可能とするため、電力変動減衰量が最も小さくなる場合のグラフを用いる必要がある。調査した中で、電力変動減衰量が最小となる場合のグラフを図5に示す。

電力フィルタの遮断周波数 f_c を変化させて電力変動減衰量 G を求めた結果、両者の間には近似的に式(1)に示すような関係があることがわかった。

$$G = 10 \log_{10} (|dP_{out}/dt|_{max} / |dP_{in}/dt|_{max}) \\ = a_1 \log_{10} (f_c) + b_1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

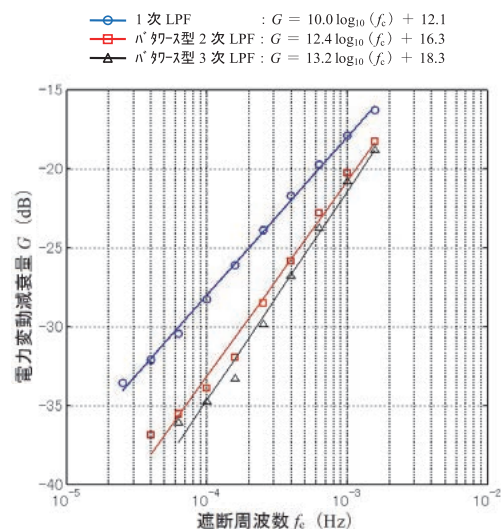


図5 遮断周波数と電力変動減衰量の関係

4.3 電力フィルタと最大蓄電量 Q_{max} の関係

電力フィルタの遮断周波数 f_c と電力変動減衰量 G の関係を把握したことで、必要な減衰量 G を得るための各フィルタの f_c を求めることができるようになった。

次に、各電力フィルタを用いて平準化を行なった場合に、最大蓄電量 Q_{max} がどの程度になるかを計算する。そして、電力フィルタの遮断周波数を変化させて最大蓄電量 Q_{max} がどのように変化するかを調べる。

電力フィルタの制御構成から (図2参照)、出力電力 P_{bs} と同じ電力が蓄電池に充放電される。蓄電池に蓄えられる電力量 $Q(t)$ は瞬時電力 $P(t)$ の積分値であるから、蓄電量は出力電力 P_{bs} を積分することにより求めることができる。この蓄電量 $Q(t)$ の1日の中の最大値が最大蓄電量 Q_{max} であり、年間を通じた Q_{max} の最大値が、必要となる蓄電池容量の最小値 B_0 となる。

年間を通じて最大蓄電量 Q_{max} が最も大きくなるのは、1日の総発電量が多い日である。このため、このような日を選んで遮断周波数 f_c と最大蓄電量 Q_{max} の関係を調べる。

ただし、最大蓄電量の値そのままでは1日の総発電量 W に依存するので、総発電量 W で規格化した蓄電量比率 C_b で検討する (式(2)参照)。

$$蓄電量比率 C_b = 最大蓄電量 Q_{max} / 1日の総発電量 W \quad \dots\dots\dots(2)$$

1日の総発電量 W で規格化することにより、遮断周波数 f_c と蓄電量比率 C_b の関係は、いろいろな発電容量の太陽光発電に適用可能となる。

今回、対象とする太陽光発電の出力データの中から、1日の総発電量が多い日を数日選び、蓄電率を計算した。

各電力フィルタについて、遮断周波数 f_c を変化させて蓄電率 C_b との関係を調べた結果を図6に示す。

その関係は、式(3)のように対数直線で近似できることがわかった。しかも、近似直線の傾き a_2 と切片 b_2 は、太陽光発電の容量や日によらないことがわかった。これは1日の総発電量が多い日の発電パターンが類似しているためだと考えられる。

$$\log_{10}(C_b) = a_2 \log_{10}(f_c) + b_2 \quad \cdots \cdots (3)$$

近似直線の傾き a_2 がほぼ-1であることから、 f_c と C_b は反比例の関係にあることがわかる。

4.4 電力変動減衰量 G と蓄電率 C_b の関係

各電力フィルタについて、遮断周波数 f_c と電力変動減衰量 G との関係、および蓄電率 C_b との関係が把握できた。これら二つの関係から、さらに手間かけて電力変動減衰量 G と蓄電率 C_b との関係を導き出すことができる。

式(1)と式(3)から電力変動減衰量 G と蓄電率 C_b の関係式を導出した。その式を下記に示す。また、そのグラフを図7に示す。

$$\begin{aligned} \log_{10}(C_b) &= (a_2 / a_1)(G - b_1) + b_2 \\ &= (a_2 / a_1)G - a_2 b_1 / a_1 + b_2 \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

このグラフにより、必要な電力変動減衰量 G に対して、蓄電率 C_b が最小となるフィルタの種類と C_b の値が容易に得られる。

図7から、電力変動減衰量 G が-38~-18dBの範囲では、蓄電率 C_b が最小となるフィルタはバター型2次LPFであることがわかる。

4.5 蓄電池容量の計算手順

蓄電池容量の計算手順を以下に示す。

(1) 必要減衰量 G_r の決定

対象とする太陽光発電の最大出力変動 $|dP_{in}/dt|_{max}$ と、系統に供給する電力の変動速度の上限値 $|dP_{out}/dt|_r$ から、必要な電力変動減衰量 G_r を求める。

計算式は式(5)となる。

$$G_r = 10 \log_{10}(|dP_{out}/dt|_r / |dP_{in}/dt|_{max}) \quad \cdots \cdots (5)$$

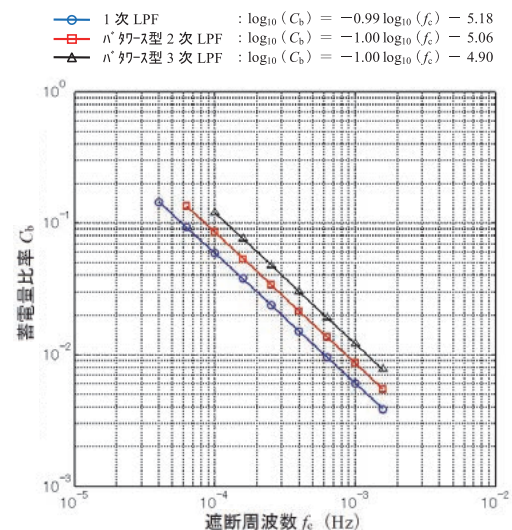


図6 遮断周波数と蓄電率の関係

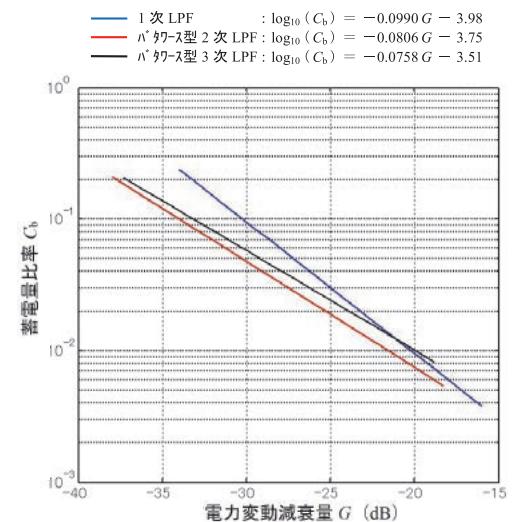


図7 電力変動減衰量と蓄電率の関係

(2) 遮断周波数 f_c の決定

図5に示すような遮断周波数と電力変動減衰量の関係から、必要減衰量 G_r を得るために必要となる各フィルタの遮断周波数 f_c を求める。

(3) 蓄電率 C_b とフィルタの決定

図6に示すような遮断周波数と蓄電率の関係から、各フィルタについて、前項で決定した遮断周波数 f_c に対する蓄電率 C_b を求める。

蓄電池容量が最小となるのは、 C_b が最小となる場合である。したがって、1次～3次のLPFの中で C_b が最小となるフィルタを選択する。

ただし、図7に示すような電力変動減衰量と蓄電率の関係が導出できている場合は、それを用いて、必要な電

力変動減衰量 G_r に対して蓄電率 C_b が最小となるフィルタを選択する。

(4) 1日の最大総発電量 $W_{\max}$ の算出

太陽光発電の出力データから1日の総発電量の最大値 $W_{\max}$ を求める。

(5) 蓄電池容量 B_{cap} の決定

得られた C_b と $W_{\max}$ を乗算することにより蓄電池容量 B_o が求められる。しかしこの値は、蓄電池やパワコンの充放電効率や、蓄電池を使用する際の放電深度を100%とした場合の理想値であり、実際的な値ではない。このため、これらの効率や放電深度を考慮する必要がある。

① 蓄電池に充電される電力量

蓄電池パワコンの電力変換効率を η_{bpc} とすると、蓄電池に充電される電力量は、理想値 B_o ($= C_b W_{\max}$) に対して η_{bpc} 倍の $\eta_{\text{bpc}} B_o$ となる。

② 放電可能な電力量

蓄電池の充電効率 (= 放電電力量 / 充電電力量) を η_b とすると、放電可能な電力量は、充電電力量 $\eta_{\text{bpc}} B_o$ に対して、蓄電池で η_b 倍となり、さらに蓄電池パワコンから放電するので η_{bpc} 倍となる。結局、最終的に放電可能な電力量は、 $\eta_b \eta_{\text{bpc}}$ 倍の $\eta_b \eta_{\text{bpc}}^2 B_o$ となる。

③ 必要な電力補填量

蓄電池に充電した1日の太陽光発電の電力は、その日の内にはすべて系統へ放電される。見かけ上、太陽光発電により最大 B_o の電力を充電することになるので、同量の電力を放電することになる。ところが、前項により放電可能な電力量は $\eta_b \eta_{\text{bpc}}^2 B_o$ となるので、その損失分 $(1 - \eta_b \eta_{\text{bpc}}^2) B_o$ をあらかじめ夜間に補充しておく必要がある。

補充した電力についても100%放電できるわけではない。前項同様、補充分に対する放電可能な電力量は $\eta_b \eta_{\text{bpc}}$ 倍となる。したがって、あらかじめ充電しておく電力量は、

$$(1 - \eta_b \eta_{\text{bpc}}^2) B_o / (\eta_b \eta_{\text{bpc}}) = ((\eta_b \eta_{\text{bpc}})^{-1} - \eta_{\text{bpc}}) B_o$$

となる。

④ 必要な蓄電池容量

蓄電池を使用する際の最大放電深度 K_{dod} を考慮すると、必要となる蓄電池の容量 B_{cap} は式(6)で求められる。

$$\begin{aligned} B_{\text{cap}} &= (\eta_{\text{bpc}} B_o + ((\eta_b \eta_{\text{bpc}})^{-1} - \eta_{\text{bpc}}) B_o) / K_{\text{dod}} \\ &= B_o / (\eta_b \eta_{\text{bpc}} K_{\text{dod}}) \\ &= C_b W_{\max} / (\eta_b \eta_{\text{bpc}} K_{\text{dod}}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

4.6 蓄電池容量の計算例

実際に蓄電池の容量を求めた計算例を以下に示す。

① 対象とした太陽光発電設備

当社内に設置してある100kW太陽光発電設備を対象とした。

② 必要減衰量 G_r

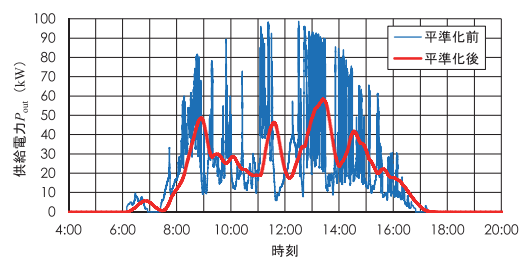
上記太陽光発電の1年間の出力データを確認したところ、最大出力変動は $|dP_{\text{in}}/dt|_{\max} = 43 \text{ kW/s}$ であった。

これを石炭火力発電機が追従可能な出力変動3%/分以下に抑えるものとする⁽³⁾。つまり、系統に供給する電力の変動速度の上限値を 0.05 kW/s とした場合、必要な電力変動減衰量は、式(5)から $G_r = -29.3 \text{ dB}$ となる。

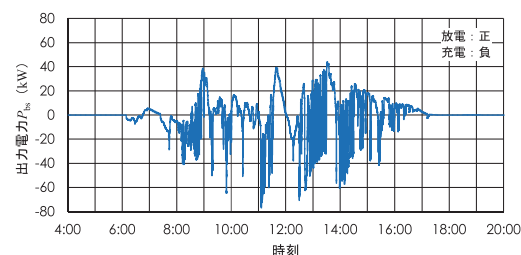
この場合、図7の関係から電力フィルタは、バタワース型2次LPFを選択する。

③ 遮断周波数 f_c

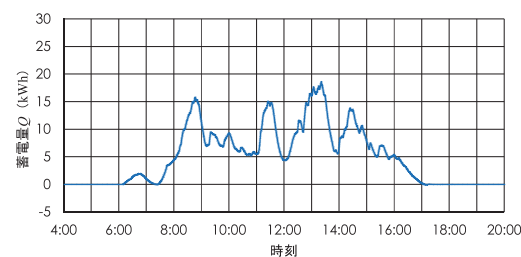
電力変動減衰量が -29.3 dB となる電力フィルタの遮断周波数 f_c を図5から求めると、 0.21 mHz となる。



(a) 配電線系統へ供給する電力 (P_{out})



(b) 蓄電池パワコン出力電力 (P_{bs})



(c) 蓄電量 (Q)

図8 電力平準化のシミュレーション結果(出力変動最大)

④ 蓄電率 C_b

図7から蓄電率 C_b を求めると、4.1%となる。

⑤ 1日の最大総発電量 $W_{\max}$

太陽光発電の出力データから、1日の総発電量の最大値を求めたところ、 $W_{\max} = 650 \text{ kWh}$ となった。

⑥ 蓄電池容量 B_{cap}

理想的な蓄電池容量 B_0 は $27 \text{ kWh} (= 4.1\% \times 650 \text{ kWh})$ となる。実際に必要となる蓄電池容量 B_{cap} については、使用する蓄電池をリチウムイオン電池とし、最大放電深度 K_{dod} を80%、充電効率 η_b を95%、蓄電池パワコンの効率 η_{bpc} を94%とすると、式(6)から $B_{\text{cap}} = 37 \text{ kWh}$ となる。

5. シミュレーションによる確認

前節の計算例で求めた値を基に電力平準化シミュレーションを行ない、電力平準化システムの効果を確認した。

出力変動が最大の日のシミュレーション結果を図8に、一日の総発電量が最大の日の結果を図9に示す。

図8(a)に示した平準化前後の配電線系統へ供給される電力を見ると、 $|dP_{\text{in}}/dt|_{\max} = 43 \text{ kW/s}$ が $|dP_{\text{out}}/dt|_{\max} = 0.03 \text{ kW/s}$ となっており、電力平準化システムにより太陽光発電の出力変動が大幅に抑制されていることがわかる。

図9(c)を見ると、最大蓄電量 $Q_{\max}$ が 27 kWh となっている。この場合の理想的な蓄電池容量は、 $B_0 = 27 \text{ kWh}$ であり、 $Q_{\max}$ の値と一致している。

6. あとがき

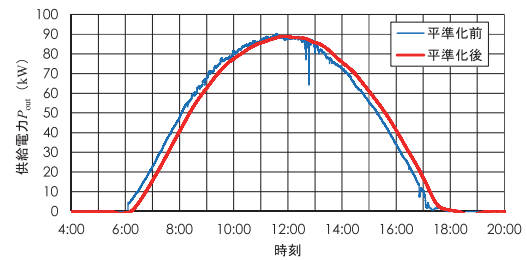
今回、蓄電池を用いた電力平準化システムについて、そのシステム構成と制御方法を提示するとともに、システムに必要な蓄電池の容量算出方法を示した。

本稿に示した手法は、太陽光発電のみならず、風力発電の電力平準化にも適用可能と考える。

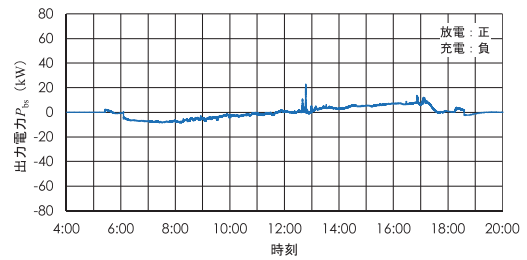
今後は、風力発電も含めて、配電線系統に対する出力変動対策として、本手法を適用した製品の開発を行なっていく所存である。

参考文献

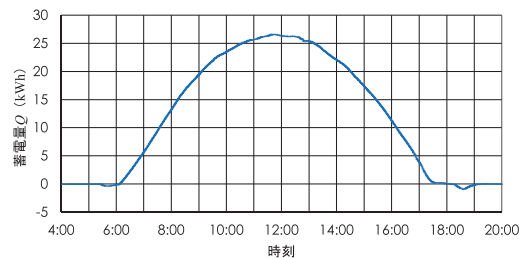
- (1) 八太、上村：「需要家機器との連携制御を用いた需要地系統構成・運用方法－変電所への蓄電池設置時の効果－」電力中央研究所報告 R08019(2009)
- (2) 中村：「太陽光発電設備大量導入時の電圧変動を抑制する蓄電システム」中部電力 技術開発ニュース No.148(2013)
- (3) 高山、石亀、ほか：「蓄電池併設型PVシステムの蓄電池容量に関する一検討」2012年電気設備学会全国大会 221-222



(a) 配電線系統へ供給する電力(P_{out})



(b) 蓄電池パワコン出力電力(P_{bs})



(c) 蓄電量(Q)

図9 電力平準化のシミュレーション結果(総発電量最大)