

# ピーク電力削減量の最大化を実現するマイクログリッドの蓄電池制御手法

杉本 貴之 下田 英介 山根 俊博 沼田 茂生  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## A Battery Control Technique of a Micro-grid for Maximizing Peak Demand Reduction

by Takayuki Sugimoto, Eisuke Shimoda, Toshihiro Yamane and Shigeo Numata

### Abstract

We have developed control system for micro-grid in which a battery compensates variation from solar generation and electrical load. This paper describes a fast estimation method of parameters for battery control to maximize peak demand reduction of the micro-grid. We also apply this method to evaluate relationship between the amounts of peak demand reduction and battery capacity. Errors of peak demand reduction and battery capacity were respectively less than 10 kW and 10 kWh, reliability of this method was verified. These results lead to the conclusion that the method has applicability to operation and design phase of the micro-grid.

### 概要

当社が開発・実用化した太陽光発電と蓄電池で構成されるマイクログリッドは、負荷の急増や太陽光発電の出力減少による建物の負荷変動に対して蓄電池から放電を行うことで、確実にピーク電力を削減できる。本論文では、清水建設技術研究所本館で運用中のマイクログリッドを対象に、ピーク電力削減量が最大となる蓄電池制御パラメータを高速に推定する手法を述べる。また当該手法を用いて、需要家の要求するピーク電力削減量とその際の必要最小限な蓄電池容量の関係を求める。シミュレーションを用いてピーク電力削減量と蓄電池容量を評価した結果、誤差はそれぞれ 10kW、10kWh 未満となり十分な精度であることを確認できた。したがって、当該手法はマイクログリッドの運用および設計段階に適用可能と言える。

### §1.はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災以来、電力需要が伸びる重負荷期の夏期および冬期の電力逼迫により、需要家側では積極的なピーク電力削減が求められている。また、分散型電源に対する固定買取制度の開始<sup>1)</sup>や環境負荷低減の観点から太陽光発電の導入機運が高まっている。このような背景から、電力ピーク時間帯に太陽光発電を用いてピーク電力を削減することが期待されている。しかし、太陽光発電等の自然エネルギーは天候次第で大きく出力が変動するため、確実にピーク電力を削減できるとは限らない。この対策として当社は、太陽光発電と蓄電池で構成されるマイクログリッド<sup>2)</sup>を開発、実用化している。このマイクログリッドの蓄電池は、図-1に示すように、建物の負荷変動に蓄電池出力を追随させることで電力会社からの買電電力の変動を抑制する(以下、負荷変動補償と呼ぶ)制御を行っ

ている。これにより、負荷の急増時や太陽光発電の出力減少時には蓄電池から放電が行われるので確実にピーク電力が削減される。

建物の負荷変動はさまざまな周波数成分で構成されているため、限られた蓄電池容量で最大限のピーク電力削減量を得るためには、蓄電池で補償すべき負荷変動の周波数帯域(以下、補償帯域と呼ぶ)を適切に決定することが重要である。従来はシミュレーションや実運転を繰り返し行い、ピーク電力削減効果の大きい補償帯域を試行錯誤的に決定していたため、多大な労力と時間がかかっていた。そのため、季節ごとに異なる気候条件等で負荷電力パターンが変化した場合の補償帯域の再設定が困難であった。

本論文では、ピーク電力削減量、蓄電池容量、補償帯域の上下限周波数(以下、高域・低域遮断周波数と呼ぶ)という4つのパラメータを設定し、清水建設技術研究所本館で運用中のマイクログリッド実用設備を対象

に、限られた蓄電池容量に対してピーク電力削減量が最大となる高域・低域遮断周波数を高速かつ最適に決定する手法(以下、補償帯域決定手法と呼ぶ)を示す。当該手法で決定した補償帯域とシミュレーションを用いて試行錯誤的に決定した補償帯域との比較により、ピーク電力削減量の精度を評価する。

さらにマイクログリッドの構成要素である蓄電池容量の設計段階を想定し、同マイクログリッドを対象に、需要家の要求するピーク電力削減量とその際の必要最小限な蓄電池容量の関係を、補償帯域決定手法を用いて求める。当該手法で推定したピーク電力削減量と蓄電池容量の精度を確認するため、シミュレーション結果との誤差を用いて評価する。



図-1 蓄電池の負荷変動補償例

## §2. ピーク電力削減量を最大化する蓄電池補償帯域の決定

### 2.1 マイクログリッドの概要

本論文で検討対象に用いた清水建設技術研究所本館に導入済みのマイクログリッドの全体構成を図-2に示す。マイクログリッドの電源設備は太陽光発電(定格出力 14.3kW)と鉛蓄電池(定格出力 90kW、定格容量 163kWh)で構成されており、一般負荷、防災負荷、重要負荷(合計 400kW 程度)が接続されている。鉛蓄電池の定格蓄電池容量は 163kWh だが、蓄電池の長寿命化を考慮して電池残量(SOC)の使用範囲を 30%から 95%と設定しており、実効蓄電池容量は 106kWh である。本構成では負荷電力を一括して計測できる計測点が存在しないため、図-2中の計測点 A、Bにて電力会社からの買電電力および鉛蓄電池の電力変換装置出力を計測し、その合計値より負荷電力を推定している。

図-3に冬期の負荷電力(業務時間帯 8時~17時を対象)の一例を示す。負荷電力の最大値と最小値の差は約 200kW で、午前と午後にピーク電力が発生すること、

ならびに空調熱源の運転に伴い 50kW~100kW の間欠的な負荷の増減があることが特徴である。

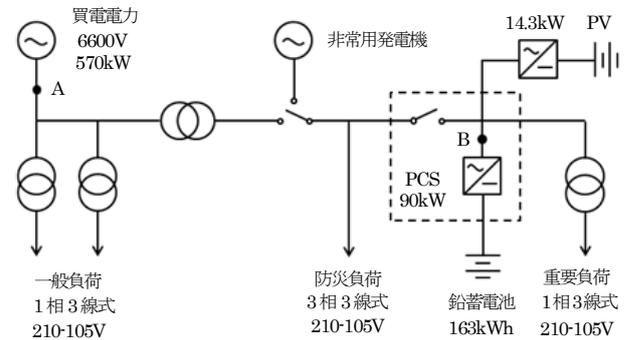


図-2 技術研究所本館のマイクログリッド

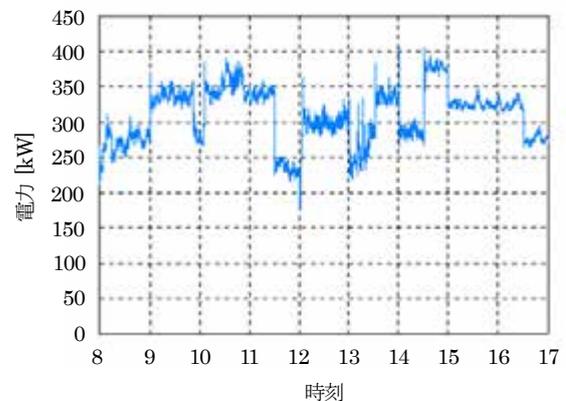


図-3 冬期の代表的な負荷電力プロファイル

### 2.2 高域・低域遮断周波数の決定

本論文では予測誤差の影響を排除するため、図-3に示した過去の実績データを用いて高域・低域遮断周波数を決定した。

高域遮断周波数については短周期の速い変動を補償してもピーク電力削減効果が小さいことから 100mHz に固定して、以下の手順で低域遮断周波数を決定した。負荷電力を周波数解析することで補償帯域を特定するため、式(1)の離散フーリエ変換の公式より各周波数の実数部  $R(f_k)$ 、虚数部  $I(f_k)$  を計算し、式(2)より各周波数の振幅  $|X(f_k)|$  [kW] を求めた。図-3の負荷電力を離散フーリエ変換した結果を図-4に示す。負荷電力のサンプリング間隔  $\Delta t$  は 1 秒、サンプル数  $N$  は 2 の基数になるよう、8時から17時6分7秒までを用いたので、 $N$ 、 $\Delta t$  から基本周波数  $f_1$  は式(3)より 0.031mHz、ナイキスト周波数  $f_s$  は式(4)より 500mHz となっており、図-4では 0.031mHz 刻みでナイキスト周波数 500mHz までの各周波数の振幅が観測されている。

$$\begin{aligned}
 X(f_k) &= \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \exp(-j2\pi f_k t) \\
 &= \frac{1}{N} (R(f_k) - jI(f_k))
 \end{aligned} \quad (1)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, N$

$$|X(f_k)| = \frac{2}{N} \sqrt{R(f_k)^2 + I(f_k)^2} \quad (2)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, N/2$

$$f_1 = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (3)$$

$$f_s = \frac{1}{2\Delta t} \quad (4)$$

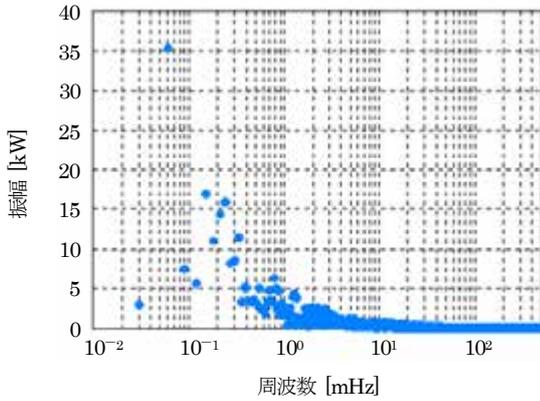


図-4 負荷電力の周波数解析結果

離散フーリエ変換で求めた振幅  $|X(f_k)|$  と周波数  $f_k$  を用いて式(5)より正弦波の半周期分を時間積分したものを式(6)のように高域遮断周波数 100mHz(式(6)中の  $k$  は 3276 に相当)まで積算することで低域遮断周波数と負荷変動補償に必要な蓄電池容量の関係性を求めた。結果を表-1に示す。実効蓄電池容量 106kWh で最も補償帯域を広くとれる低域遮断周波数は 0.061mHz から 0.092mHz の間にあるので、この 2 点の線形補間より低域遮断周波数を 0.066mHz に決定した。

$$\frac{1}{3600} \int_0^{1/2f_k} |X(f_k)| \sin 2\pi f_k t dt = \frac{|X(f_k)|}{3600\pi f_k} \quad (5)$$

$$W = \sum_{k=i}^{3276} \frac{|X(f_k)|}{3600\pi f_k} \quad (6)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 25$

表-1 低域遮断周波数と蓄電池容量の関係

低域遮断周波数 [mHz]	蓄電池容量 W [kWh]
0.031	123.1
0.061	114.6
0.092	63.6
0.122	56.4
0.183	42.6
0.214	37.2
0.275	25.6
0.366	17.5
0.763	9.9

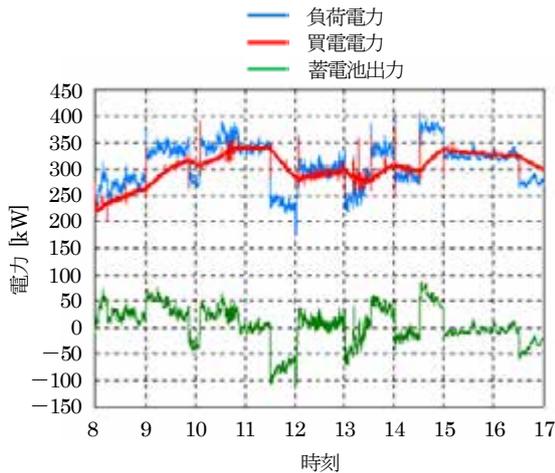
高域遮断周波数 100mHz 固定

### §3. 決定した補償帯域でのピーク電力削減量の妥当性

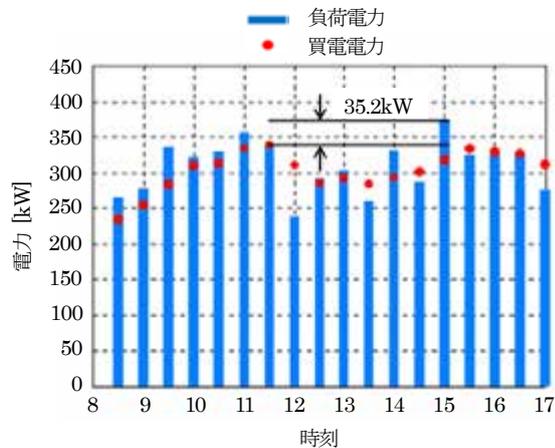
前章で決定した高域・低域遮断周波数がピーク電力削減量を最大化する補償帯域であることを確認するために、MATLAB / Simulink を用いてシミュレーションを行った。実機に実装した制御系と同一のモデルを MATLAB / Simulink 上に構築して負荷電力に対する蓄電池出力を模擬しており、本論文ではシミュレーション結果を真値とみなした。またシミュレーションには図-3の負荷電力データを用いた。

図-5に低域遮断周波数を 0.066mHz としたときのシミュレーション結果を示す。図-5(a)は瞬時電力を、図-5(b)は 30分平均値を表している。ピーク電力は瞬時電力ではなく 30分間の平均値より算出されるため、図-5(b)よりピーク電力削減量は 35.2kW と推定された。また、必要となる蓄電池容量は図-5(a)の蓄電池出力の時間積分値の最大値なので 79.1kWh となり、実効蓄電池容量 106kWh を下回っている。

同様のシミュレーションを用いて、低域遮断周波数を 0.001mHz 刻みで試行錯誤的に変化させたときのピーク電力削減量と蓄電池容量の推移を図-6に示す。実効蓄電池容量は 106kWh なので、低域遮断周波数が 0.048mHz のときピーク電力削減量は最大で 41.1kW と計算された。0.066mHz のときのピーク電力削減量と比べると 5.9kW しか誤差が生じておらず、補償帯域決定手法によって十分な精度の低域遮断周波数を得られることが確認できた。



(a) 瞬時電力での負荷変動補償結果



(b) 30分平均値での負荷変動補償結果

図-5 シミュレーションによるピーク電力削減量の算出 (低域遮断周波数 0.066mHz)

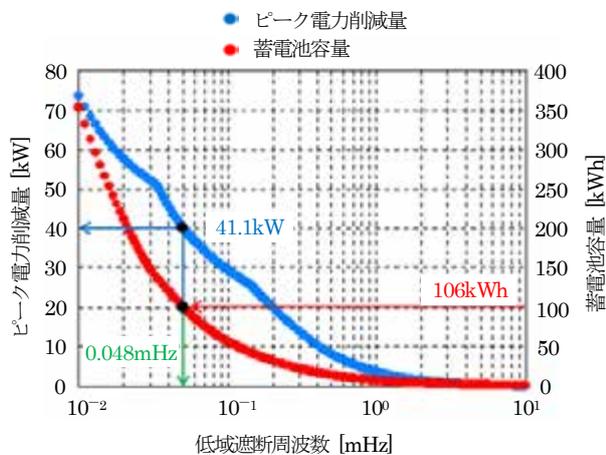


図-6 低域遮断周波数を試行錯誤的に変化させたときのピーク電力削減量と蓄電池容量

#### §4. マイクログリッドの設計段階への応用

マイクログリッドの構成要素である蓄電池容量の設計段階を想定し、技術研究所本館のマイクログリッドを対象に、ピーク電力削減量とその際の必要最小限な蓄電池容量の関係、補償帯域決定手法を用いて求めた。設計条件として負荷電力のデータは図-3を使用し、また高域遮断周波数は100mHz固定とした。

図-4の周波数解析結果を表-1の各低域遮断周波数を下限値として式(7)より逆離散フーリエ変換することで、蓄電池出力の時間変化を求めた。

$$x(t) = \sum_{k=i}^{3276} X(f_k) \exp(j2\pi f_k t)$$

$$= \frac{2}{N} \sum_{k=i}^{3276} \left( R(f_k) \cos 2\pi f_k t + I(f_k) \sin 2\pi f_k t \right) \quad (7)$$

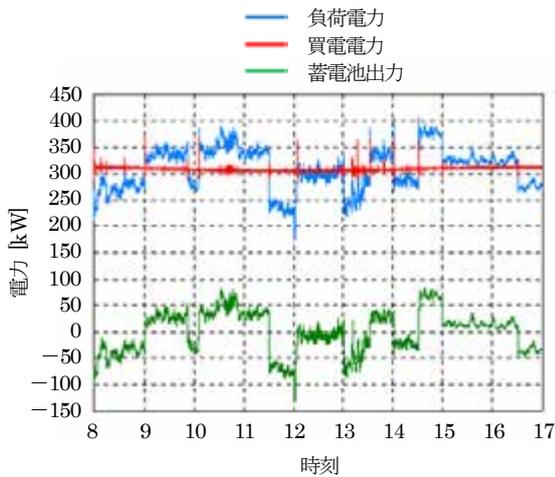
$t = 0, 1, 2, \dots, N-1$   
 $i = 1, 2, 3, \dots, 25$

蓄電池出力と負荷電力との差分から買電電力を計算し、前章と同様の手順で各蓄電池容量に対応するピーク電力削減量を推定した。結果を表-2に示す。例えば、要求されるピーク電力削減量が30.4kWと設定された場合の必要最小限な蓄電池容量は、表-2より低域遮断周波数を0.092mHzとしたときの63.6kWhと求めることができる。

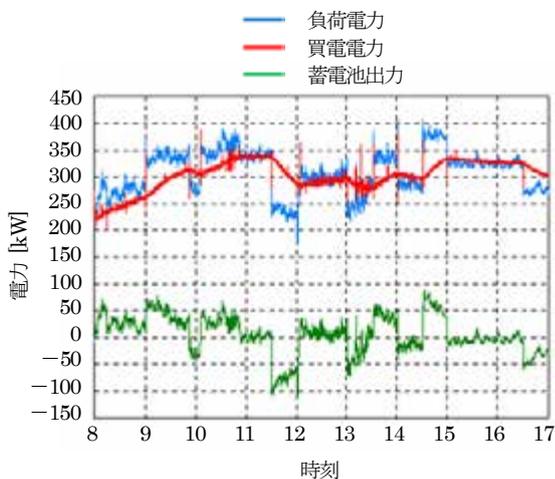
補償帯域推定手法で推定したピーク電力削減量と蓄電池容量の精度を確認するため、表-3では当該手法を使用した結果とシミュレーション結果の誤差を評価した。低域遮断周波数を0.031mHz、0.061mHzとした場合に誤差は大きくなり、0.061mHzのピーク電力削減量と蓄電池容量の誤差はそれぞれ26.7kW、29.8kWhで最大となった。以下で誤差の要因について考察する。

誤差が大きかった低域遮断周波数0.061mHzの負荷変動補償結果を図-7に示す。図-7(a)は補償帯域決定手法を使用した結果で、蓄電池出力が負荷変動に追従して買電電力はほぼ一定になるのに対し、図-7(b)はシミュレーション結果で、買電電力の変動が目立っている。補償帯域決定手法を使用した場合とシミュレーションにおいて蓄電池はそれぞれ図-8中の斜線部分(境界を含む)の負荷変動を補償する。そのため、塗色部分の蓄電池補償量の差異により低域遮断周波数の振幅が大きいほど蓄電池出力の違いは顕著になり、誤差も大きくなる。

需要家が要求するピーク電力削減量に対応する低域遮断周波数で負荷変動の振幅が大きい場合にはピーク電力削減量と蓄電池容量の誤差が大きくなるため注意は必要だが、それ以外の条件であれば補償帯域決定手法を設計段階に適用することで必要最小限な蓄電池容量の選定ができる。



(a) 補償帯域決定手法を用いた場合



(b) シミュレーションを用いた場合

図-7 低域遮断周波数 0.061mHz のときの負荷変動補償結果

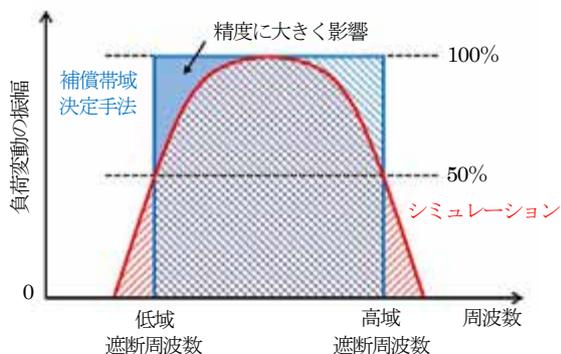


図-8 蓄電池補償量の周波数特性

表-2 各蓄電池容量に対応するピーク電力削減量

低域遮断周波数 [mHz]	ピーク電力削減量 [kW]	蓄電池容量 [kWh]
0.031	66.1	123.1
0.061	63.2	114.6
0.092	30.4	63.6
0.122	26.9	56.4
0.183	20.7	42.6
0.214	12.2	37.2
0.275	11.3	25.6
0.366	6.3	17.5
0.763	5.3	9.9

高域遮断周波数 100mHz 固定

表-3 補償帯域推定手法を使用した結果とシミュレーション結果(真値)の誤差

低域遮断周波数 [mHz]	ピーク電力削減量誤差 [kW]	蓄電池容量誤差 [kWh]
0.031	14.1	-22.0
0.061	26.7	29.8
0.092	0	3.5
0.122	-0.3	8.3
0.183	-0.6	8.1
0.214	-6.6	7.0
0.275	-3.8	1.5
0.366	-5.1	-1.0
0.763	0.3	0.7

高域遮断周波数 100mHz 固定

## §5.まとめ

本論文では、技術研究所本館で運用中の太陽光発電と蓄電池で構成されるマイクログリッド実用設備を対象に、限られた蓄電池容量に対してピーク電力削減量が最大となる高域・低域遮断周波数を高速かつ最適に決定する手法について述べた。当該手法で決定した高域・低域遮断周波数がピーク電力削減量を最大化する補償帯域であることを、シミュレーションを用いて確認した。結果として、実効蓄電池容量 106kWh で得られる最大のピーク電力削減量に対し、決定した補償帯域におけるピーク電力削減量は 5.9kW しか誤差が生じておらず、十分な精度の補償帯域を得られることが示された。

さらに、マイクログリッドの構成要素である蓄電池容量の設計段階を想定して、同マイクログリッドを対象に、需要家の要求するピーク電力削減量とその際の必要最小限な蓄電池容量の関係を、補償帯域決定手法を用いて求めた。当該手法で推定したピーク電力削減量と蓄電池容量の精度を確認するため、シミュレーション結果と

の誤差を用いて評価した。低域遮断周波数で負荷変動の振幅が大きい場合にピーク電力削減量と蓄電池容量の誤差は大きくなるが、それ以外の条件であれば補償帯域決定手法を設計段階に適用することで必要最小限な蓄電池容量の選定ができることが示された。

#### <参考文献>

- 1) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会：“「太陽光発電の新たな買取制度」について”，2009.
- 2) 山根俊博，下田英介，沼田茂生：“太陽光発電と蓄電池で構成するマイクログリッドによる建物の負荷平準化効果の定量的評価”，平成 22 年電気学会全国大会.