

充放電特性を考慮したマイクログリッドにおけるリチウムイオンバッテリーの最適容量決定・運用法の検討

○向井 達哉（慶應義塾大学） 滑川 徹（慶應義塾大学/JST CREST）

Optimal Battery Capacity Determination for Micro-Grid System Considering Li-ion Battery Characteristics

*T. Mukai (Keio University) T. Namerikawa (Keio University/JST CREST)

Abstract– In this paper, the problem of determining the size of battery storage used in grid-connected photovoltaic(PV) systems is discussed. In this problem, our goal is to find optimal capacity and charge/discharge planning for Li-ion batteries to minimize the power purchase cost. We propose a novel charge/discharge planning method based on optimization technique considering Li-ion battery characteristics to expand battery life. Finally, the effectiveness of the proposed method is shown via simulations.

Key Words: Battery Storage Systems, Li-ion Battery Characteristics, Micro-Grid System, Linear Programming

1 はじめに

低炭素型社会に向けて、再生可能エネルギーへの展開が急がれることを背景に、スマートグリッド・マイクログリッドの技術開発が本格化しつつある。特に大規模太陽光発電システム（PVシステム）を系統接続する試験が各地で行われている。しかしながら、特にマイクログリッドにおける太陽光発電は、気象条件に大きく左右される電力供給であるため、大容量バッテリーをマイクログリッドに設置し、PVシステムからの電力を一時貯蔵されることが検討される。この貯蔵電力に関して、計画的に充放電を行うことでピーク時電力を削減し平準化をはかることや電力料金変動制に対応した充放電計画を策定することが可能となる。よって、PV出力電力の貯蔵及びピーク時電力削減による平準化に加えて電力料金コストの削減も可能となる¹⁾。マイクログリッドにおいてこれらの目的を志向するためにバッテリーを運用するにあたり、過分にバッテリー容量を設定してしまうとバッテリー運用時のバッテリー容量劣化が大きくなってしまふ恐れがある。このため、マイクログリッドでのピーク時電力削減等の各運用要求に見合ったバッテリー容量及び充放電計画を策定する必要があり、これらをバッテリー容量決定問題として研究がされている²⁾。

マイクログリッドでの大容量バッテリーとしてエネルギー密度の大きさ等からリチウムイオンバッテリーの導入が進んでいる。本稿ではバッテリーシステムとしてリチウムイオンバッテリーを導入した場合のバッテリー容量決定・運用法を検討する。運用計画において、バッテリー劣化に関する定数を線形的に扱っていた従来手法³⁾に対し、リチウムイオンバッテリーの特性を考慮した充放電計画を検討する。充電特性としてバッテリー充電率に応じた充電計画⁴⁾を立てる。また、放電特性としてはDOD（充電深度）を考慮した放電計画⁵⁾⁶⁾を立てることで放電による過度のバッテリー劣化を抑えるような運用計画を立てる。これらを考慮したバッテリー充放電

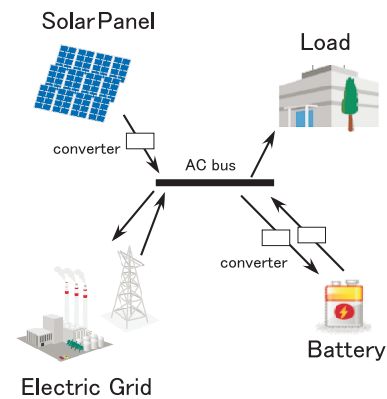


Fig. 1: Micro-Grid system

計画及び容量決定を策定することによりバッテリー寿命を延ばすことを目的とする。

2 問題設定

2.1 マイクログリッド概要

本稿でのマイクログリッドにおけるバッテリー運用法・容量決定問題に関して、その概要を Fig.1 に示す。

次項から Fig.1 に示したマイクログリッドシステムに関して、各種問題設定について述べる。

2.1.1 PVシステム・発電系統・負荷電力量

太陽光発電ソーラパネルから発電される PV 出力電力を以下の (1) 式のように示す。

$$P_{PV}(t) = GHI(t) \times S \times \eta_{panel} \quad (1)$$

上式において、 $GHI(t)$ は時刻 t における直達日射量の値 [W/m^2] であり、 S はパネル面積 [m^2] を示し、 η_{panel} はモジュール変換効率 [%] を示す。また、PVシステムにおいて出力電力は温度の影響を受けるが、今回は日射量予測が事前になされており、温度による差は考えないものとする。

発電系統からの電力価格を、早朝深夜料金、朝夕料金、昼間料金のように数段階に分けて電力価格 C_g [\$/Wh]

を設定する。また、負荷電力量 P_{load} [Wh] に関して、負荷電力予測が事前になされているものとする。なお、本稿では簡単のために、バッテリー及び PV システムへのコンバータ変換効率を $\eta_B = 100$, $\eta_{PV} = 100$ とおく。

2.1.2 バッテリー

時刻 t におけるバッテリー充電量を $E_B(t)$ [Wh], 充放電率を $P_B(t)$ [W] とすると、以下の (2) 式を得る。

$$\frac{dE_B(t)}{dt} = P_B(t) \quad (2)$$

ここでバッテリー容量劣化を以下の (3) 式によって示す。²⁾

$$\frac{d\Delta C(t)}{dt} = -ZP_B(t), \text{ if } P_B(t) < 0 \quad (3)$$

$$C(t) = C_{ref} - \Delta C(t) \quad (4)$$

$\Delta C(t)$ [Wh] はバッテリー容量が劣化したことにより失われた容量、放電時の $P_B(t)$ に正定数 Z を掛けることにより容量劣化を表す。なお、 $P_B(t)$ に関して上限と下限を以下のように設定する。

$$P_{B_{min}} \leq P_B \leq P_{B_{max}} \quad (5)$$

$$P_{B_{max}} = -P_{B_{min}} = \frac{C(t)}{T_c} = \frac{C_{ref} - \Delta C(t)}{T_c} \quad (6)$$

なお、バッテリー諸特性は温度の影響を受けるが、本稿では摂氏 25 度一定として検証を行う。

3 バッテリー運用・最適容量決定

本章では、Fig.1 に示した電力システムシステムに関して、評価関数を定義し、バッテリー充放電の運用計画及びバッテリー容量決定手法に関して議論する。

3.1 バッテリー運用計画

バッテリー運用計画を検討するに当たり電力コスト最小化を行う。電力母線での電力 $P_g(t)$ に関して (7) 式の関係が成り立つ。

$$P_g(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t) + P_{BC}(t) \quad (7)$$

このとき、バッテリー充放電率 $u(t) = P_{BC}(t)$ として、評価関数 (8) 式を考える。

$$J(u(t)) := \min \int_{t_0}^{t_0+T} C_g(\tau)P_g(\tau)d\tau + K\Delta C(t_0 + T) \quad (8)$$

subject to

$$P_g(t) = P_{load}(t) - P_{PV}(t) + u(t)$$

$$\frac{d\Delta C(t)}{dt} = -Zu(t), \text{ if } u(t) < 0$$

$$E_B(t) \geq 0, E_B(t_0) = 0, \Delta C(t_0) = 0$$

$$E_B(t) + \Delta C(t) \leq C_{ref}$$

$$P_{load}(t) - \eta_{PV}P_{PV}(t) + u(t) \leq D$$

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$$

T [h] はコスト最小化を行う時間を表し、 K [\$/Wh] はバッテリー劣化への損失に対する定数である。また、 D [W] は電力母線を通れる最大電力値を表し、 D の値によりピーク時電力削減を行う。バッテリー容量 C_{ref} を固定し $u(t)$ を各制約を満たした最適な入力にすることにより、各 C_{ref} における電力コスト最小の $u(t)$ (バッテリー充放電の運用計画) が求まる。尚、評価関数 $J(u(t))$ を解いて $u(t)$ を求めるに当たり、線形計画法を用いた。

3.2 バッテリー容量決定

前節の評価関数において、バッテリー容量を C_{ref} を初期値 C_{ref}^0 から変動させることにより電力コスト $J(C_{ref}, u(t))$ が最小となるような C_{ref}^{opt} を導く。

$$C_{ref}^0, C_{ref}^1, \dots, C_{ref}^i, \dots, C_{ref}^L, (i = 0, \dots, L) \quad (9)$$

上式のように C_{ref} の値を変えていくことにより、 C_{ref}^{opt} を導く。こうして求めた C_{ref}^{opt} の値が求めたいバッテリー容量である。

以上の”バッテリー運用計画”及び”バッテリー容量決定”の手順にて各状況でのバッテリーの最適容量決定を行う。

4 充放電特性を考慮したバッテリー運用法

本章では前章の内容を受けて、充放電特性を考慮した運用計画・容量決定の検討を行う。

4.1 バッテリー充電特性の考慮

バッテリー充電特性への考慮したバッテリー充電計画について考える。リチウムイオンバッテリー実機実験により得たリチウムイオンバッテリー 1 セル 38.1[Wh] 当たりのバッテリー端子電圧と充電率 (SOC) に関する特性のグラフを Fig.2 に示す。

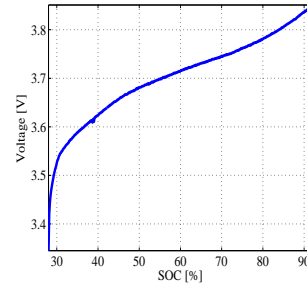


Fig. 2: Voltage-SOC

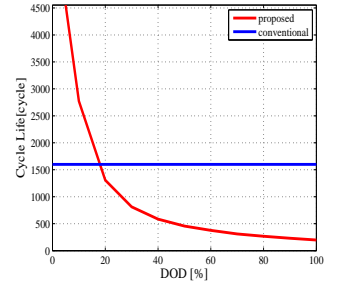


Fig. 3: Cycle life-DOD

充電特性として Fig.2 のような非線形性をもった特性があるが、従来研究では、(6) 式のように $P_B(t)$ を設定していた。このため、(10) 式及び (11) 式のように充電率の値 $SOC(t)\% = \frac{E_B(t)}{C_{ref}(t)}$ によって、対応する $P_{B_{max}}$ の値を Fig.2 から適切な値を選ぶようにする。

$$P_{B_{max}}(t) = V(SOC(t)) \times I \quad (10)$$

$$SOC(t) = \frac{E_B(t)}{C_{ref}(t)} \quad (11)$$

(10) 式及び (11) 式から、対応する $V(SOC(t))$ [V] の電圧値、定電流充電値 I [A] から $P_{B_{max}}$ [W] の値を設定し、

バッテリー容量決定を行う。これにより、従来手法で見られたバッテリー特性を超えた過大な充電計画ではなく、物性に見合った充電計画を行うことができる。

4.2 バッテリー放電特性の考慮

バッテリー放電特性として”Depth Of Discharge(DOD)”を考慮する。DOD は定格容量に対する放電電気量の比率である。バッテリー劣化を測る際の指標として、最も重要なものの一つである。³⁾⁴⁾

DOD は以下の (12) 式で表すことができる。

$$DOD(t) = \frac{-P_B(t) \times T}{C_{nominal}} \times 100 \quad (12)$$

$DOD(t)$ はある時刻での DOD[%], $P_B(t)$ はバッテリー放電量 [W], T は $P_B(t)$ の値でバッテリー放電を行った時間 [h], $C_{nominal}$ はバッテリー定格容量 [Ah] である。

従来手法では、バッテリー容量劣化量 $\Delta C(t)$ [Ah] を (3) 式によって示してきた。実機実験により Fig.3 のサイクル特性-DOD 特性グラフを導出した。Fig.3 は従来手法での劣化定数 Z を固定した場合と、DOD を実機制約に沿って設定した場合との比較を示している。バッテリー放電特性、DOD を考慮したバッテリー劣化に関する式を (13) 式及び (14) 式に示す。

$$\frac{d\Delta C(t)}{dt} = -Z(t)P_B(t), \text{ if } P_B(t) < 0 \quad (13)$$

$$Z(t) = \frac{Z \times C_{cycle}}{f(DOD(t))} \quad (14)$$

C_{cycle} は従来手法での定数 Z に対応するサイクル数。 $f(DOD(t))$ は $DOD(t)$ の値に対応するサイクル数を返す関数とする。(13)(14) 式を用いてバッテリー容量決定を行う。これら提案手法からバッテリー運用計画及び最適容量決定を行いバッテリーの長寿命化をはかる。

5 シミュレーション

5.1 シミュレーション条件

コスト最小化を行う時間を「午前6時から午後10時(短時間)」・「午前6時から72時間(長時間)」の2通りを検証した。ステップ間隔は30分ごととし、 $P_B(t)$ の値を最適化させることと C_{ref} の値を最適化することによりコスト最小化を行う。特に P_B の値に関しては、提案手法を取り入れるものと従来手法とを比較検証を行う。

電力価格 $C_g(t)$ 及び負荷電力量 $P_{load}(t)$ の時間変動を以下 Fig.4 及び Fig.5 に示す。なお、PV システム出力電力は Fig.6 及び Fig.11 に発電量を示した。

シミュレーションを行うに当たり、比較検討を行いやすいように Table 1 にバッテリーへ考慮する特性を分けた。

Table 1: Comparison of battery life

Term of operation	Battery characteristics
Short-term plan	Charge only
Long-term plan	Charge & discharge

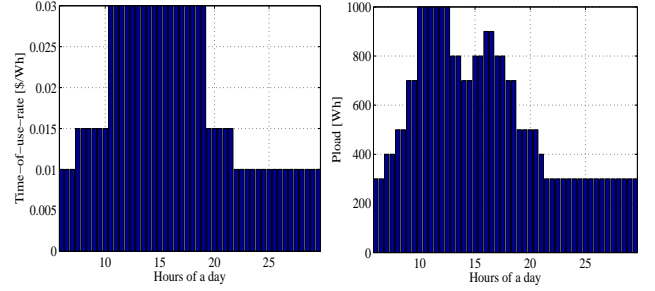


Fig. 4: Power price C_g Fig. 5: Load power P_{load}

5.1.1 バッテリー条件

- 28~88 %の SOC 範囲
- 1 セル当たり 38.1[Wh],14 セルで最大 533.4[Wh] のバッテリー容量
- 10[A] 定電流充電を行うものとする
- 最大消費電力値を $D = 800$ [W] (短期間運用) ・ $D = 900$ [W] (長期間運用) とする。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 短期間運用計画

シミュレーション結果を Fig.6~Fig.10 に示す。

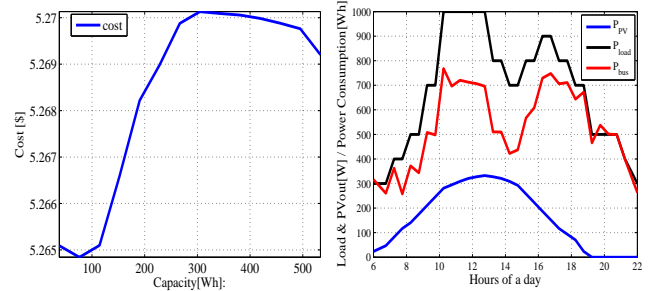


Fig. 6: Power purchase cost (proposed) Fig. 7: Load/PV power Bus power (proposed)

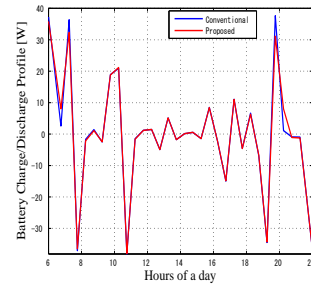


Fig. 8: Comparison of SOC

Fig.6 から、 $C_{ref} = 76.2$ [Wh] としたときに最も電力料金コストが低くなっていることがわかり、最適容量は $C_{ref}^{opt} = 76.2$ [Wh] であることがわかる。また、Fig.7 より、ピーク時電力を 800[W] 以下に抑えていることも確認できる。特に Fig.8 から、低料金時間帯に充電を行い、PV からの電力や電力料金に応じて充放電をおこなっていることがわかる。バッテリー充電特性から、

過大な充電計画ではなく、充電率に見合った充電計画がなされていることが両手法の比較からわかる。

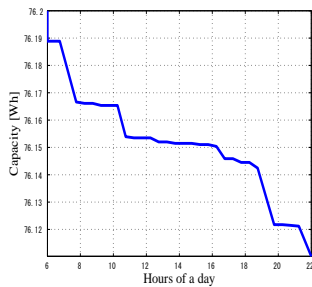


Fig. 9: Capacity (conventional)

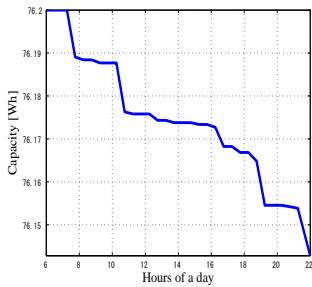


Fig. 10: Capacity (proposed)

5.3 長期間運用計画

シミュレーション結果を Fig.11~Fig.16 に示す。

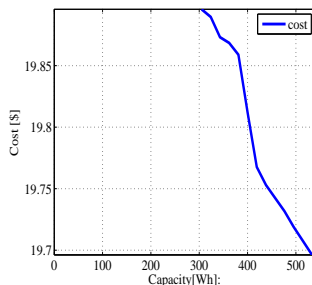


Fig. 11: Power purchase cost (proposed)

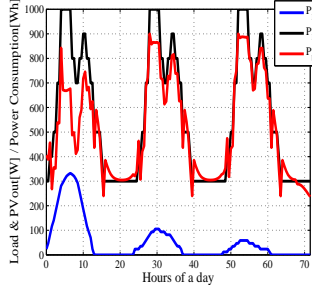


Fig. 12: Load/PV power & Bus power (proposed)

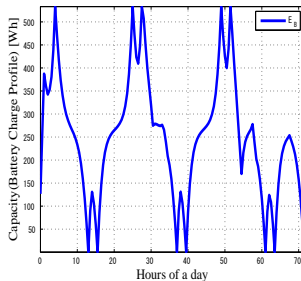


Fig. 13: Battery charge profile (proposed)

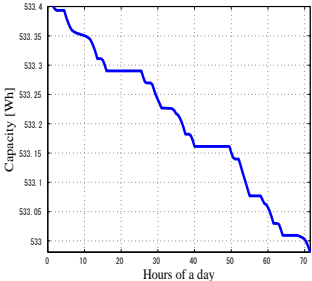


Fig. 14: Capacity (proposed)

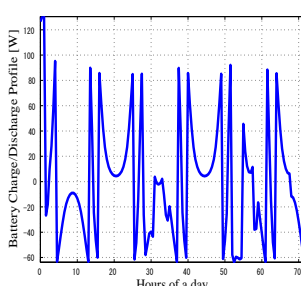


Fig. 15: SOC (proposed)

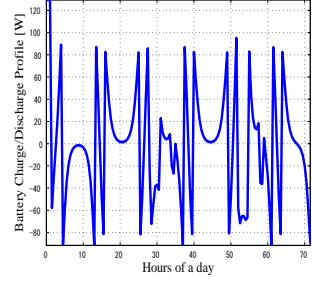


Fig. 16: SOC (conventional)

Fig.12~Fig.16 は、Fig.11 より、電力料金コストが最小となる $C_{ref}^{opt} = 533.4[\text{Wh}]$ としたときのデータで

ある。Fig.15, Fig.16 から、バッテリー充放電特性を考慮し、過度のバッテリー劣化を抑えるため、放電率を抑えていることがわかる。各条件を固定し従来手法と提案手法とのバッテリー運用を繰り返した場合、劣化寿命比較を Table 2 に示す。

Table 2: Comparison of battery life (20 % loss)

Characteristics	Only charge	Charge & discharge
Conventional	169.3 days	395.1 days
Proposed	267.4 days	761.8 days

Table 2 から、バッテリー特性を考慮することによりバッテリー寿命の延長ができていくことがわかる。

以上より、バッテリー充電特性のみを考慮した場合、バッテリー充放電特性を考慮した場合、双方においてもよりバッテリー寿命を延ばすような運転計画を立てることができたことがわかる。

6 おわりに

本稿では、従来のバッテリー容量決定問題では扱っていなかったリチウムイオンバッテリーの充放電特性を考慮したバッテリー運転計画を立てた。

リチウムイオンバッテリー特有の非線形性を持つ充電特性の考慮及び放電特性として DOD を考慮することにより、マイクログリッドにおける各運用条件を満たしながら、リチウムイオンバッテリーの長寿命化を図る運転計画を立てることができることを、シミュレーションを通して妥当性を示すことができた。

参考文献

- [1] 滑川 徹, "スマートグリッドのための分散予測制御," 計測と制御; Vol.51, No.1, pp.62-68, (2012)
- [2] Y.Ru, J.Kleissl, S.Martinez, "Storage Size Determination for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, Issue1, pp. 68-81 (2013)
- [3] Y.Riffonneau, S.Bacha, F.Barruel, S.Ploix, "Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 309-320 (2011)
- [4] 臼田昭司, "リチウムイオン電池回路設計入門," pp.29-37, 日刊工業新聞社 (2012)
- [5] Sekyung.Han, Soohee.K.Sezaki, "Economic Assessment on V2G Frequency Regulation Regarding the Battery Degradation," *Innovative Smart Grid Technologies, 2012 IEEE PES* pp.1-6 (2012)
- [6] T. Guena and P. Leblanc, "How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries," in *Proc. Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp.1-8 (2006)