蓄電池と太陽光発電を保有する家庭における蓄電池劣化と停電防止を考慮した経済性評価

松原　雅*，前　匡鴻，松橋　隆治（東京大学）

Cost Effectiveness Evaluation of Residential Battery and Photovoltaic System Considering Battery Degradation and Outage Mitigation

Masashi Matsubara, Masahiro Mae, Ryuji Matsuhashi (The University of Tokyo)

１．序論

日本のエネルギーシステムは，安全性・安定供給・経済性・環境適合(S+3E)を同時に達成することを目指している。供給側での取り組みに加え，需要側でのエネルギー自給・貯蔵も目標達成に貢献できる。需要家の中でも家庭部門では，再生可能エネルギー電源による低 CO_2 排出を実現する住宅が広まりつつある。本稿では特に経済性に焦点をあてて，シミュレーションを通じて家庭における蓄電池と太陽光発電を導入したシステムを評価する。蓄電池の寿命を考慮した運用による投資回収年数の評価と，停電防止を考慮した場合の投資回収年数の変化を分析する[1]。

２．手法

＜2・1＞システム　　本稿では近畿の一家庭の需要データを用いてモデルを作る。家庭は定置型蓄電池と太陽光パネルを保有している。家庭が系統から受電するとき，その従量料金は卸電力市場(JEPX)の関西エリアプライスに連動するとする。蓄電池は 5 kW/13.5 kWh，太陽光パネルは 3 kW であるとする。蓄電池の蓄電量は 10-90%の範囲で運用できて，充放電効率は充電・放電それぞれで 90%であるとする。

＜2・2＞最適化による運用　　蓄電池と太陽光発電を導入した家庭において，最も経済性が高くなるように，最適化問題を通じて運用を決定する。ここで，蓄電池の充放電に伴う劣化を最適化の中で考慮することで，システムの寿命と投資回収年数を比較した評価を行う。蓄電池劣化は充放電サイクルに伴う容量減少が起こると想定して，図 1 に示すようなモデル[2]を仮定する。図 1 の曲線上の値は，蓄電量 100%から当該蓄電量まで放電して，再び 100%まで充電する 1 サイクルでの容量減少量を表す。蓄電量 100%以外から始まる充放電サイクルでの劣化は，サイクルの起点と終点での蓄電量における容量減少量の差分として定める。

最適化では，年間の電力従量コストと蓄電池劣化コストの和を最小化する。このとき，蓄電池劣化量は図 1 の曲線を区分線形化して扱い[3]，後述する初期コストと寿命となる容量減少量によりコストに変換する。制約条件には需給バランス・蓄電池蓄電量変化・蓄電池充放電最大出力などが含まれる。問題は混合整数線形計画として定式化される。最適化は 1 回あたり 2 日分の窓で行われ，前半 1 日分の運転を決定する。これを 365 回繰り返して年間の運転を決定する。

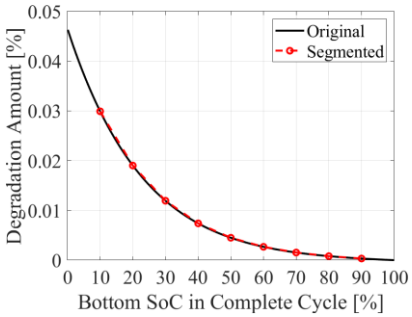

図 1 完全サイクル 1 回での劣化量[2]と線形近似
Fig.1. Degradation cost per complete cycle and its segmented linearization

＜2・3＞経済性評価　　本稿では，システムの経済性を投資回収年数と蓄電池寿命によって評価する。投資回収年数 PB は，式(1)に示すように，導入コスト C_{inv} を年間のコスト減少分 P_{year} で単純に割ったものとする。ここで C_{inv} は蓄電池 121 万円，太陽光発電 86.4 万円としてそれらの和である。P_{year} は蓄電池も太陽光発電も持たない場合から比較したコスト減少分である。また蓄電池寿命 L_{BT} は，式(2)に示すように，蓄電池の容量が初期状態から，ある割合 SoH^{min} を下回るまでにかかる年数として定める。ここで SoH^{min} は 0.7，d^{cal} は運用によらず生じる劣化であり 1.2%/年[4]とし，d^{cyc} は充放電により生じる劣化であり最適化結果から決まる。

$$PB = C_{\mathrm{inv}} / P_{\mathrm{year}} \quad (1)$$

$$L_{\mathrm{BT}} = (1 - SoH^{\mathrm{min}}) / (d^{\mathrm{cal}} + d^{\mathrm{cyc}}) \quad (2)$$

３．結果

＜3・1＞停電防止を考慮しない場合　　まず蓄電池劣化を考慮することによる，蓄電量の推移を分析する。図 2 には蓄電池劣化を考慮した最適化による，蓄電池の蓄電量の推移を示す。年間を通して，蓄電量は 60%をほとんど下回らず，浅い充放電が繰り返されている。図 1 に示すように，深い放電を行うと劣化量が大きくなり，したがって劣化コストが大きくなるため，深い充放電が制限されていると考

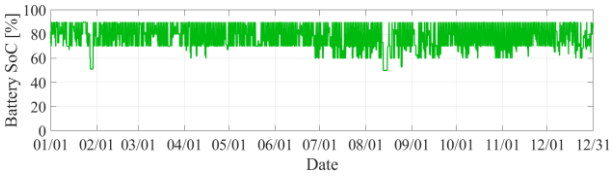

図 2 年間の最適化における蓄電池蓄電量の推移
Fig.2. Battery SoC in the annual optimization with degradation

図 3 年間の最適化における蓄電池の寿命と投資回収年数
Fig.3. Comparison between the payback period and the battery lifetime

えられる。

続いてシステムの経済性を評価する。図 3 には蓄電池の寿命と投資回収年数を比較した結果を示す。ここで Deg. Model が本稿で扱う，劣化コストを目的関数に含めた最適化の結果である。他は劣化コストを目的関数に含めず，代わりに蓄電池の蓄電量の最小値にマージンを設けた[5]場合の最適化の結果である。マージンゼロの条件では自由に充放電でき，投資回収年数が 13.9 年である一方，蓄電池寿命は 3.3 年と短くなる。劣化コストを目的関数に含めた場合，最も蓄電池寿命が長く(18.2 年)，投資回収年数が蓄電池寿命を 0.2 年だけ下回る。

＜3・2＞停電防止を考慮する場合　蓄電池と太陽光発電は，系統からの受電量を減らして電力コストを減らすのと同時に，停電時に電力を自給することができる。停電対策の効果は，停電での不快感を停電コストとして金銭に換算して考えることで，停電コストを減少させることで投資回収年数を短くする効果とみなせる。ここでは，停電発生頻度をもとに停電対策の効果を評価して，投資回収年数に反映した場合の変化を考える。

停電発生頻度は，関西電力管内での災害による停電の頻度と供給側信頼度から推定する。2001 年から 2023 年までに，台風により 10 万軒以上の停電が 10 回発生していた[6]。ここから，災害による停電が 3 年に 1 回生じると仮定する。さらに需要家一軒当たりの年間停電回数から，災害が発生した年の影響を除いて，災害とは無関係に 10 年に 1 回停電が生じると仮定する。以上から停電発生頻度は 0.43 回/年と想定する。

停電対策は蓄電池により行われると考える。蓄電池の容量・蓄電量の範囲・効率から，蓄電池は一回の停電に対して高々9.72 kWh だけ放電できる。そのため，発生頻度を考慮すると，平均して高々4.21 kWh/年だけ停電中でも電力を賄える。図 4 には，停電防止効果を投資回収年数の計算に含めた場合の，停電コスト単価ごとの投資回収年数の変化を示す。例えば停電コスト単価が 500 円/kWh である場合，停電防止効果は 2100 円/年となり，投資回収年数は 0.3 年だけ短くなる。停電防止効果は年間の電力コスト減少量の 1.8%にあたる。そのため，停電対策は蓄電池と太陽光発電の導入を喚起できる一方で，平常時に電力コストを減少させることが導入を最も左右すると結論できる。

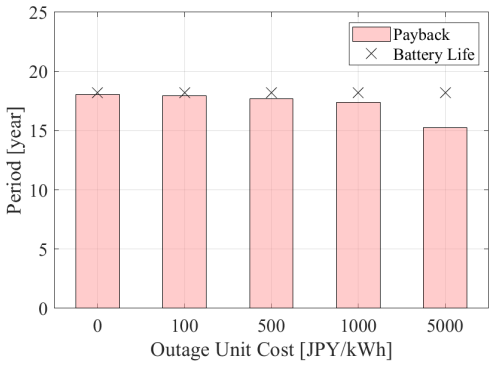

図 4 停電防止を考慮した場合の蓄電池の寿命と投資回収年数
Fig.4. Payback period and battery lifetime considering outage mitigation

4．結論

本稿では家庭に蓄電池と太陽光発電を導入した場合の経済性と，停電対策による導入への影響を検討している。蓄電池劣化コストを目的関数に含めた最適化により，投資回収年数が蓄電池寿命より短くなる可能性を示している。さらに，実際の災害や供給側信頼度から停電発生頻度を推定して，停電防止効果を停電コストの減少として投資回収に含める場合も検討している。ここでは，停電防止効果が電力コストの減少に対して 1.8%相当の効果を持つことを示している。今後は燃料電池を用いた熱電供給を行う場合の評価や，複数軒を含む街区でのシステム評価などを行う。

文　献

(1) M Matsubara, M Mae, and R Matsuhashi: 16th Int. Conf. on Appl. Energy, 1～5 (2024)
(2) L Lam and P Bauer: IEEE Trans. on Power Electr., 28. 5910～5918 (2013)
(3) J-O Lee and Y-S Kim: Int. J. of Elec. Power and Energy Sys., 137. 107795 (2022)
(4) A Thingvad and M Marinelli: Proc. of EVS 31 & EVTeC 2018, 1～7 (2019)
(5) M Matsubara, M Mae, and R Matsuhashi: 20th The Int. Conf. on European Energy Market (EEM24), 1～6 (2024)
(6) 内閣府：災害情報，https://www.bousai.go.jp/updates/index.html