

電力取引市場価格に応じた再エネ+蓄電池の収益最大化に関する検討

Study on Market Price Based Dynamic Renewable + Battery Control to Maximize Market Revenue

關 思 超 *

Sichao Kan

Renewable generators are expected to sell their electricity through the electric power exchange market in the future. To hedge the market price fluctuation and to counter the so called “Cannibalism” issue, batteries could be utilized. This study discusses how to dynamically control battery operation based on market price signal to maintain high market revenue for the renewable + battery system. Battery operation control is disaggregated into 2 steps: control of charging/discharging, and decision of electricity discharging amount. A method of using previous day’s market price signal to do the control process is examined and the simulation results suggest that this method could help increase market revenue when the batteries installation goes to an extent that affects market price. The study also tried reinforcement learning for battery control and found that though the reinforcement learning could help bring higher market revenue, the results highly rely on the pre-set learning conditions and more study on this method will be needed in the future.

Keywords : Electricity Exchange Market, Renewable Energy, Battery Operation

1. 背景・目的

我が国においては、再生可能エネルギー(以下:再エネ)の固定価格買取(FIT)制度の見直しを受けて、大規模太陽光発電や風力発電に対する Feed-in Premium(FIP)制度への移行に向けた制度設計に関する議論が政府審議会で議論されている。FIP 制度によって、再エネが他の電源と同様に電力取引市場で売電され、再エネの売電価格は電力取引市場価格と連動するようになる。

再エネの電力取引市場への統合によって、再エネ事業者の収入は市場価格の変動に影響を受けることから、市場への売電による収入を可能な限り最大化するための取り組みとして蓄電池の設置が見込まれている。また、限界費用の低い太陽光発電や風力発電が大量に電力取引市場に参入すると、同じ時間帯での発電の集中によって、市場価格が下落し、再エネの市場売電収入が減少する(Cannibalism: “カニバリズム”)という課題が生じる(文献¹⁾)。先行研究(文献³⁾)では、カニバリズム問題の緩和に向けた蓄電池の役割が分析されている。

本研究では、電力取引市場の売電収入を増加させるために、市場価格の変動に応じた蓄電池の運用パターンを調整する手法を検討する。分析対象は、先行研究(文献³⁾)と同様に、太陽光発電の導入が最も進んでいる九州地域とした。

2. 課題提起

先行研究(文献³⁾)による分析では、蓄電池の設置によって、太陽光発電は、市場価格の高い夕方時間帯に売電可能となるため、カニバリズムによる影響が緩和されると分析されている。当該先行研究では、太陽光発電+蓄電池の出力パターンを、夕方時間帯(17時~21時)に固定したため(図1)、蓄電池の設置が増え続けると、夕方時間帯に売電する太陽光発電の量が拡大し、同時帯の市場価格が低下することがシミュレーション結果で明らかにされた(図2)。

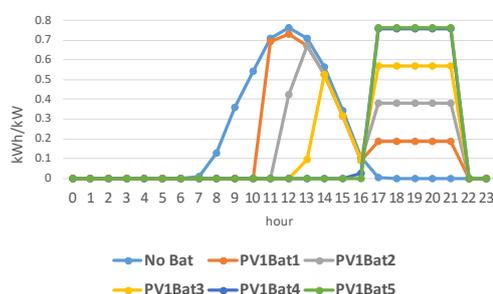


図1 太陽光発電+蓄電池の出力パターンの設定

* (一財)日本エネルギー経済研究所 主任研究員

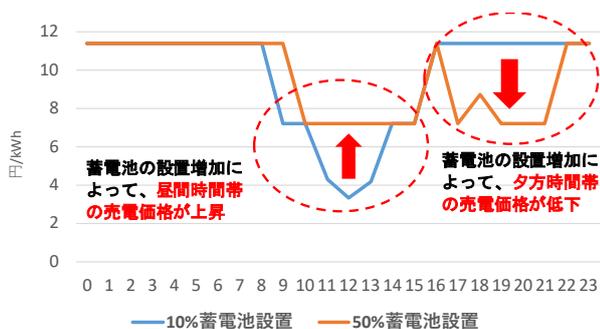


図2 蓄電池設置事業者の増加による市場価格の低下
(出所)先行研究のシミュレーション結果に基づいて作成(文献³⁾)

この課題を解決して市場売電収入を向上するためには、市場価格の変化に応じて、蓄電池の運用パターンを動的に調整することが求められる。

3. 手法と前提条件

本研究は、先行研究(文献³⁾)のマルチエージェントに基づいた電力市場シミュレーションモデルを活用する。対象地域は、太陽光発電の導入が進む九州電力管内とする。九州電力管内における全ての電力が電力取引市場に参加すると仮定し、買い手は1エージェント、売り手は電源毎に複数のエージェントを設定する。そして先行研究(文献³⁾)と同様に1時間単位で、蓄電池の制御と市場シミュレーションを行う。

先行研究(文献³⁾)では、太陽光発電の市場参入量が2017年度末における既導入量の7,850MWと認定設備容量である16,673MWの二つのケースを想定したが、本研究では16,673MWのみとした。

先行研究(文献³⁾)と同様に、九州電力公開の毎時電力需要の実績値(2017年)(文献⁴⁾)に基づいて買い手エージェントの入札を生成するとした。売り手エージェントの市場入札量は、各電源の設備容量としている。なお、自然変動型再エネ電源については、設備容量と過去の出力実績に基づいて推計した出力曲線で市場参入可能な発電量を計算している。太陽光+蓄電池の出力は、蓄電池の制御によって決定する(制御手法の詳細は3.1で説明する)。蓄電池の仕様に関する想定を表1に示す。蓄電池以外の各電源の想定は、先行研究(文献³⁾)と同様とした(表2)。

表1 蓄電池仕様の想定

項目	想定
蓄電池容量	太陽光発電1kWあたり3kWh蓄電池の設置を想定
定格出力	蓄電池容量(kWh)/1時間
充電効率	95%
放電効率	95%
自己放電率	0.2%/時間

表2 各電源の限界費用と現状の設備容量

	水力	原子力	石炭	ガス	石油	バイオマス	地熱	太陽光	風力	太陽光+蓄電池
限界費用(¥/kWh)	2.3	5.4	7.2	11.4	26.7	25.2	12.5	3.34	4.15	3.34
設備容量(MW)	1,901	1,780	3,983	4,981	3,560	52	192	7,850	500	シナリオ

(出所)先行研究の表を再掲(文献³⁾)

3.1 蓄電池の制御

市場での売電収入は、売電のタイミングと量で決定されることから、太陽光発電+蓄電池の市場売電収入を増加させるためには、市場価格の低い時間帯に充電し、蓄電した電力を可能な限り市場価格の高い時間帯に放電することが望ましい。従って、本研究では、①充放電タイミングの判断(時間帯ごとの充放電指令)と②充放電量の決定の二つの段階で蓄電池の制御を行うこととした。蓄電池の充放電タイミングと放電量の決定を市場価格の指標に連動させる方法は多数あるが、本研究では、まず、前日の市場価格に基づいた価格指標で蓄電池を制御する手法を想定し、シミュレーションを行った。

(1) 蓄電池の充放電タイミング

前提では、充電と放電は同時に行わないため、太陽光発電出力時間帯10時~18時には放電せず。それ以外の時間帯は、市場価格指標に基づいて充放電を判断するとした。市場価格の24時間の分布は日によって同じではないものの、高価格時間帯と低価格時間帯には一定の傾向がある。本研究は、前日市場価格変動を参照して蓄電池の充放電を判断している。具体的には、前日同時時間帯の市場価格が前日の日平均価格より高い場合は放電し、それ以外の場合は充電するものと想定している。

(2) 蓄電池の充放電量

(1)に示す充電指令がある場合、蓄電池が満蓄になるまで充電を行う。また、満蓄状態で太陽光発電の発電が発生する場合は、直接売電する。

また、(1)に示す放電指令がある場合、市場価格を指標にして放電量を求める。この放電量は、太陽光発電+蓄電池の売電収入増大を目指し、高価格時間帯での売電量を可能な限り多くするために、市場価格を参照して決められる放電量(本研究で経済的放電量と呼ぶ)であり、実際の放電量は蓄電池の物理的放電可能量(蓄電量)に制限される。本研究では、前日の市場価格に基づき、放電時間帯の前日市場価格と前日の日平均市場価格の差で求めた比率(当該時間帯の価格差/放電時間帯価格差の合計)を蓄電池の定格出力に乗じて、当該時間帯の経済的放電量を計算した(図3)。実際の放電量は、経済的放電量と同時間帯の蓄電池の蓄電

量のうち小さい方となる。

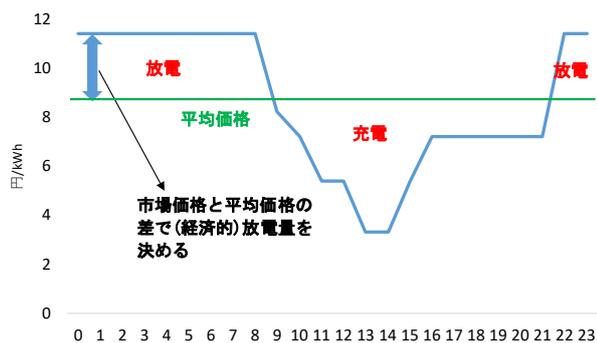


図3 蓄電池充放電制御のイメージ

4. 結果

4.1 市場売電収入

先行研究(文献³⁾)では、太陽光発電が電力取引市場に大量に参入した場合(7,850MWから16,673MWになった場合)、カニバリズムによって年間市場売電収入が11,845円/kWから6,714円/kWに減少すること、それに対して、蓄電池を設置し、売電時間帯を夕方にシフトすると、市場売電収入が4,232円/kW程度増加することが示された(図4)。ただし、前述したように、蓄電池を設置する太陽光発電の量が増えると、夕方時間帯の市場価格が低下し、太陽光+蓄電池の市場売電収入が低下する。夕方時間帯に入札する太陽光発電の容量が全体の10%から50%に増えると、太陽光+蓄電池の市場売電収入は年間2,400円/kWほど減る結果となっている(図4)。

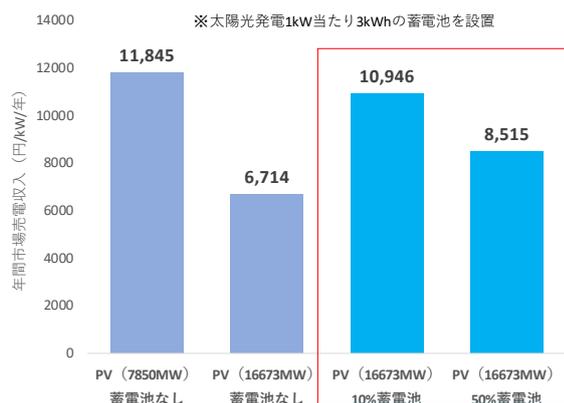


図4 蓄電池の設置による市場売電収入の変化
(出所)先行研究による試算結果(文献³⁾)

本研究で想定した蓄電池制御手法の効果を検証するために、図4に示した蓄電池の導入量が太陽光発電容量の10%と50%の二つのケースに対して、蓄電池の充放電を制御した市場シミュレーションの結果を図5(太陽光発電設備導入量の10%が蓄電池設置)と図6(太陽光発電設備導入量の

50%が蓄電池設置)に示す。

本研究で検討した蓄電池の運用方法は、蓄電池の設置が多い場合(太陽光発電導入設備容量の50%)は、太陽光発電+蓄電池の市場売電での増収に貢献できることが分かった(図6)。ただし、蓄電池の設置が少ない場合には(太陽光発電導入設備容量の10%)増収効果が見られなかった(図5)。

通常、夕方の時間帯が一日のうちで市場売電価格が高く、この時間帯での売電により市場売電収入を最大化することができる。他方、蓄電池の設置増によって、夕方時間帯における太陽光+蓄電池の売電が増え、この時間帯の市場価格が低下し、太陽光+蓄電池の市場売電収入が減少する。この場合、前日の市場価格を参照し、蓄電池の売電時間帯を他の市場価格の高い時間帯に分散させることが、市場売電収入の向上に繋がる。

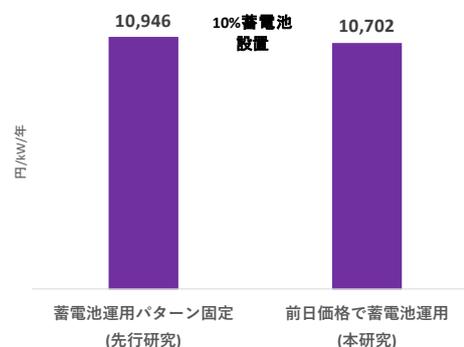


図5 蓄電池運用手法によって市場売電収入の変化(太陽光発電導入量の10%が蓄電池設置)

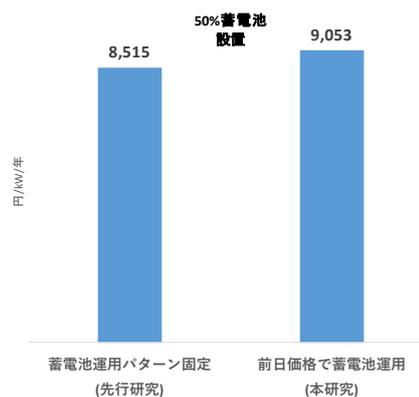


図6 蓄電池運用手法によって市場売電収入の変化(太陽光発電導入量の50%が蓄電池設置)

4.2 学習による蓄電池運用パターンの制御に関する検討

本研究では、強化学習手法による分析も試みた。強化学習の考え方とは、エージェント(研究の場合、蓄電池)が複数の行動オプションの中で、学習によって、利益最大化と予想されるオプションを選択することである。本研究は、充放電タイミングの判断を前述の手法と同様、放電量の決

定は強化学習の手法を利用してシミュレーションを行った。放電量(充電量の決定は前述と同じ手法)については、複数の放電量オプションをあらかじめ設定し、蓄電池がある学習戦略で、その中から市場売電収入を最大化できると予測できる放電量オプションを選択するプロセスで決定している。

強化学習に基づくシミュレーション結果によると、放電量オプションの設定が学習の結果に大きな影響を与えることがわかった。例えば、最大放電可能量を変数にした複数のケースから、最大放電可能量が定格出力の26%(case1)と100%(case2)の二つのケースを選択し、年間売電収入をシミュレーションした結果が図7である。同じ学習手法でも、二つのケースにおける年間売電収入の差が2,010円/kWhほどある。Case2は、時間毎の最大放電可能量が高くなっているため、市場価格のより低い時間帯に多く放電してしまうことにより、市場収入がcase1より低くなっている。また、case1の前提の下では、4.1に示した前日価格のみの手法よりも多くの市場売電収入が得られていることが分かる。

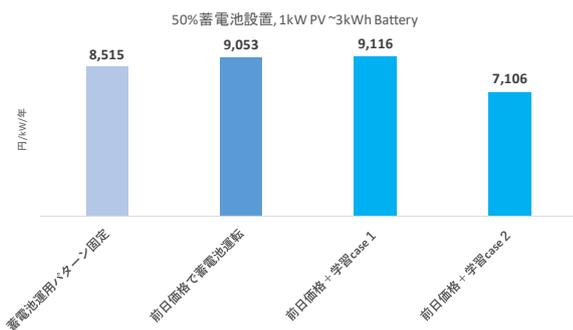


図7 学習手法を利用した場合の年間市場売電収入の比較

5. まとめ・示唆

本研究では、市場売電価格に応じた動的な蓄電池制御手法をマルチエージェントモデル分析により検討した。シミュレーション結果によると、蓄電池を設置する再エネ電源の量(kW)が拡大し、市場価格の変化に応じた動的な蓄電池の運用が再エネ+蓄電池の市場売電収入の増加に寄与することが分かった。本研究では前日市場価格を指標にした蓄電池の制御手法に基づく分析と、強化学習手法による分析を行った。強化学習手法の活用によって、さらに市場売電収入の拡大が可能であるものの、学習を制限する前提の設定によって、結果が大きく変化することが分かった。強化学習手法について、今後更なる詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 朝野賢司, 岡田健司, 永井雄宇, 丸山真弘; 欧州における再生可能エネルギー普及政策と電力市場統合に関する動向と課題, 電力中央研究所, (2016).
- 2) Hirth Lion, The Market Value of Variable Renewables, Energy Policy 38 218-236, (2013).
<https://www.neon-energie.de/Hirth-2013-Market-Value-Renewables-Solar-Wind-Power-Variability-Price.pdf>. (アクセス日 2020.11.05)
- 3) 鬮思超, 柴田善朗; マルチエージェント電力市場市シミュレーションモデルに基づく FIP 制度の検討, 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, セッション22, (2020).
- 4) 九州電力系統情報の公開,
https://www.kyuden.co.jp/td_service_wheeling_rule-document_disclosure. (アクセス日 2020.11.09)