

デマンドレスポンスのための SARIMA モデルを用いた 収益性に基づく JEPX スポット価格予測

蔡 思楠*, 前 匡鴻, 松橋 隆治 (東京大学)

Profit-Oriented JEPX Spot Price Forecast Using SARIMA Model for Demand Responses

Sinan Cai*, Masahiro Mae, Ryuji Matsuhashi (The University of Tokyo)

1. まえがき

近年、卸電力市場における価格変動の拡大に伴い、デマンドレスポンス (DR) の活用が注目されている。DR が市場に参加する場合、市場価格の予測精度は収益性に直結する重要な要素である。一方で、従来の予測モデルは誤差最小化を目的とした学習が主流であり、市場価格の極値タイミングといった収益機会を十分に捉えられないという課題がある。本研究では、極値タイミングの予測精度を評価する指標を学習過程に組み込んだ新たな価格予測手法を提案し、DR 運用への有効性を検証する。

2. 収益性に基づく JEPX スポット価格予測

<2・1>収益性に基づく価格予測評価指標 従来の平均二乗誤差 (MSE) や決定係数 (R^2) のような評価指標は、全ての予測点にわたる誤差の総量を重視するが、市場参加時間が短い、小規模容量の価格受容者としての運用といった DR の特性を十分に反映できない場合がある。

収益性に基づく観点では、市場価格の極大値と極小値のタイミングこそが最大の収益機会となり、DR にとってこれらの瞬間を正確に把握することが最重要である。そのため、極大値と極小値のタイミングを精度良く予測する能力は重要な予測性能指標となる。この要求に応えるため、文献 [1] では、価格の極大値および極小値のタイミングをどれだけ正確に予測できたかを評価する指標として、極値タイミング精度 (Extremum Timing Accuracy, ETA) が提案されている。一方で、DR の運用時間が長くなるにつれ、厳密な極値そのものの予測精度だけでなく、その周囲の一定範囲も考慮することが重要になる。この問題に対処するため、文献 [2] では修正 ETA が提案されている：

$$ETA = \frac{\sum_{i \in L_{\max}^{\bar{Y}}} \bar{T}(i) - \sum_{i \in L_{\min}^{\bar{Y}}} \bar{T}(i)}{\sum_{i \in L_{\max}^{\bar{T}}} \bar{T}(i) - \sum_{i \in L_{\min}^{\bar{T}}} \bar{T}(i)} \quad (1)$$

ここで、 \bar{Y} と \bar{T} は移動平均フィルターで平滑化された予測値と実績価格であり、フィルターのウィンドウサイズは DR の持続運用時間に対応する。 L_{\max} と L_{\min} は極大値と極小値のインデックスを表す。ETA は 0 から 1 の範囲をとる正規化指標であり、1 は最大の収益性、0 は収益性が無い状態を示す。また、(1) の分子のみでも性能指標として

利用でき、分母は ETA を 1 に正規化するためだけに用いられる。

<2・2>収益性に基づく SARIMA 予測モデル 従来の予測モデルは、予測誤差を最小化する損失関数を用いて学習される。しかし、収益性を重視する観点に立つと、単純に誤差を抑制するだけでなく、ETA を高める方向にモデルを学習させる方が望ましい。最も直接的なアプローチとして、(1) の分子項を損失関数に組み込む方法が考えられる。

統計的時系列モデルである SARIMA モデルは構造が比較的単純であり、深層ニューラルネットワークのような複雑なモデルと比較して ETA の組み込みが容易であるという利点を持つ。また、SARIMA は気象条件や系統情報などの外生変数を必要とせず、DR 参加者にとって取得・維持にコストのかかるデータを要求しない点も実用的なメリットである。これらの理由から、SARIMA モデルは ETA を組み込む DR 用途において適切かつ有効な選択肢となる。ETA を考慮した SARIMA の目的関数は次式で与えられる：

$$\text{Log}L + \alpha \left(\sum_{t \in L_{\max}^x} \tilde{x}_t - \sum_{t \in L_{\min}^x} \tilde{x}_t \right) \quad (2)$$

ここで、 $\text{Log}L$ は SARIMA モデルにおいて用いられる正規分布の対数尤度関数であり、従来の損失関数に相当する：

$$\text{Log}L = -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^n \left(\ln 2\pi\sigma_t^2 + \frac{\epsilon_t^2}{\sigma_t^2} \right) \quad (3)$$

\tilde{x}_t は SARIMA モデルが与える予測値であり、

$$\tilde{x}_t = x_t + \epsilon_t \quad (4)$$

と表される。また、 α は ETA の考慮度合いを制御する調整パラメータである。

3. シミュレーション

<3・1>DR モデル 本シミュレーションで対象とする DR は、JEPX スポット市場から充電電力を購入し、放電によって市場へ電力を売却することで収益を得る需要側蓄電池システムである。当該 DR の 1 日運用スケジュール

は, (5) に示す最適化問題として定式化される。

$$\text{maximize}_{State(t)} P_{\max} \sum_t Y(t) State(t) \quad (5a)$$

$$\text{subject to } SOC(t) = SOC_{\text{initial}} - P_{\max} \Delta t \sum_t State(t), \quad (5b)$$

$$0 \leq SOC(t) \leq 1 \quad (5c)$$

DR は, 予測値 $Y(t)$ を用いて目的関数 (5a) により 1 日の収益を最大化することを目的とする。ここで, P_{\max} は DR の最大出力を表し, $State(t) \in [-1, 1]$ は最適化対象となる充放電スケジュールである。状態量である SOC は制約 (5b) により算出され, さらに制約 (5c) により上下限が規定される。 Δt は市場時間間隔である。

<3・2>予測結果 図1は, 従来の SARIMA, LSTM, および提案する ETA に基づく SARIMA (ETA-SARIMA) の3手法による, 九州エリアにおける JEPX スポット価格予測結果の一部を示している。図2には, 異なる持続運用時間における予測結果の ETA を示す。図2より, 提案手法である ETA-SARIMA は, 全ての持続運用時間において, 他の手法と比較して高い ETA を達成していることが確認できる。この結果は, ETA を学習過程に組み込むことにより, 極値タイミングの予測精度が向上することを示唆している。

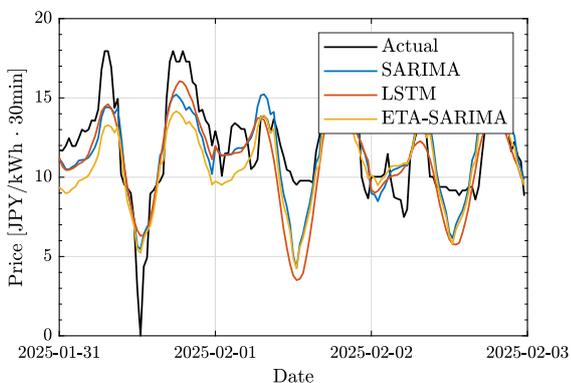


図1 九州スポット価格予測結果。

Fig.1. Forecast results on JEPX spot price of Kyushu

<3・3>シミュレーション結果 本シミュレーションにおいて, DR のエネルギー容量は 10 MWh であり, 最大出力は 10 MW とした。対象エリアは関西, 九州, 東北, および東京とし, シミュレーション期間は 2024 年 4 月 1 日から 2023 年 3 月 31 日までとした。図3より, 提案手法を用いることで, いずれのエリアにおいても収益性の改善が確認できる。

4. まとめ

本研究では, DR の収益性向上を目的として, JEPX スポット市場価格の極値タイミング予測精度に着目した ETA

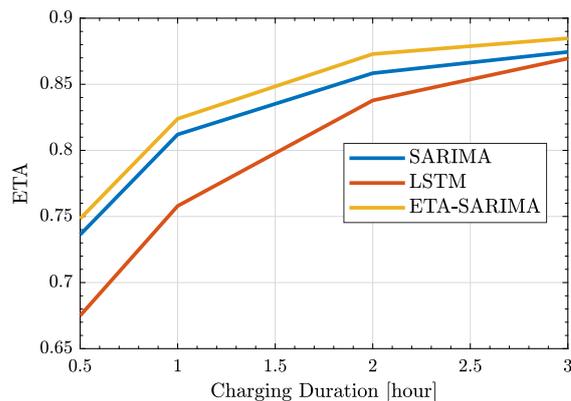


図2 予測結果の ETA.

Fig.2. The ETA of the forecast results

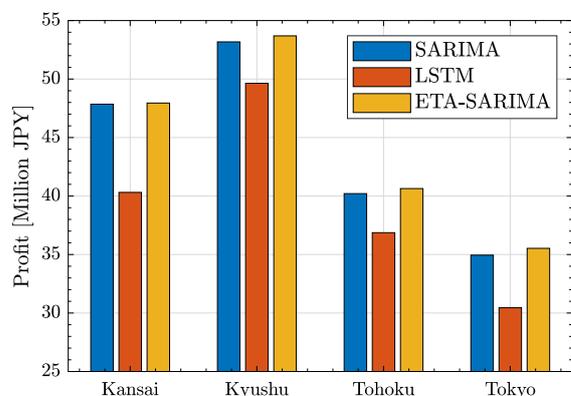


図3 各エリアにおける収益

Fig.3. The profit in different areas.

を学習過程に組み込んだ ETA-SARIMA 手法を提案した。九州, 関西, 東北, 東京の各エリア市場を対象としたシミュレーション結果より, 提案手法は従来の SARIMA および LSTM と比較して, 収益の改善を示した。これらの結果は, 誤差最小化に基づく従来の予測手法に対し, 収益機会と直接関係する極値タイミングを重視する学習戦略が, DR にとって有効であることを示している。

本研究は社会連携研究部門「電力システムイノベーションの実現」(富士電機・東京大学エネルギー総合学連携機構)において実施した。

文献

- (1) S. Cai, M. Mae, and R. Matsuhashi. "A Novel Criterion of Electricity Price Forecast for Demand-Side Responses Participating in the Electricity Market." 2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2024.
- (2) S. Cai, M. Mae, R. Matsuhashi, T. Masuda, N. Ishibashi, and S. Ikekawa, "Profit-Oriented Criterion of Electricity Price Forecast Considering Charging Duration of Demand-Side Responses." 2025 21st International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2025.