

運用時間を考慮したデマンドレスポンスにおける 収益性に基づく JEPX スポット価格予測評価指標

Profit-oriented Criterion of JEPX Spot Price Forecast for Demand Responses Considering Operation Duration

蔡 思 楠 * · 前 匡 鴻 * · 松 橋 隆 治 *
Sinan Cai Masahiro Mac Ryuji Matsuhashi

Abstract

Demand response (DR) participants in competitive electricity markets rely on price forecasts to determine when to bid and operate their controllable loads. Because DR resources typically have short activation periods and limited capacity, their economic performance is driven more by correctly identifying profitable price intervals, such as price peaks and dips, than by minimizing conventional forecast errors. A profit-oriented evaluation criterion addressing this requirement has been proposed in prior studies. However, its effectiveness decreases when applied to DR resources with longer operation durations. This research enhances the existing profit-oriented criterion by explicitly incorporating the DR operation time into the evaluation process. The resulting metric better captures revenue-relevant forecasting performance for both short-duration and long-duration DR applications. Using historical day-ahead prices from multiple areas of the JEPX spot market, the improved criterion is applied to assess a variety of forecasting methods. The results demonstrate that the refined metric provides a more accurate and economically meaningful basis for selecting forecasting models tailored to DR profit maximization.

Keywords: Demand-side Responses, Electricity Market, Price Forecast, ARIMA models, Deep Learning

1. 序論

電力市場の自由化は、DR が電力システム運用に参加する機会をさらに拡大している。自由化された市場では、発電事業者と需要家が競争的な入札を通じて電力を取引し、オークション形式で調達される。その結果、市場参加者の入札戦略と運用計画を決定するうえで、市場価格予測は極めて重要な役割を担っている。

これまでに ARIMA や SARIMA などの時系列モデルから、LSTM や CNN を用いたニューラルネットワークなどより高度な機械学習手法まで、多様な価格予測手法が検討されてきた。しかし、これらの多くは MAE, MSE, 決定係数 (R^2) などの従来の指標による予測の数値的な精度に焦点を当てている。

発電事業者や小売電気事業者のような市場参加者にとっては、前日運用計画や取引戦略を立てるための高精度なポイント予測が重要となる。一方、EV やエアコンを含む典型的な DR は運転時間が短く、容量も従来の電源に比べて小さい。また、単一価格のシングルプライス市場において、DR は価格受容者として行動し、その容量の小ささから市場価格に影響を及ぼすことはできない。

予測結果を実際の運用収益で評価することは最も直観的で正確な方法だが、詳細な DR モデリングと市場シミュレ

ーションを必要とし、ケース依存的な結果となりやすい。このため、DR が収益につながる予測手法を判別するための、一般的かつ簡便な収益性に基づく評価指標が求められている。

2. 収益性に基づく評価指標

従来の MSE などの評価指標は、DR の特性を十分に反映できない場合がある。収益最大化の観点からは、市場価格の極大値と極小値の発生時刻を適切に把握することが DR にとって最も重要であり、これらの時刻が最大の収益機会を提供する。DR はこうした機会を活用できるように運用スケジュールを決定するため、価格の極大値と極小値のタイミング予測精度が重要な評価基準となる¹⁾。

この課題に対処するため、文献 2) では、価格の極値発生時刻に着目した Extremum Timing Accuracy (ETA) が提案されている：

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

ここで、 L_{max} と L_{min} は局所的な極大値・極小値のインデックスを表し、 Y と T はそれぞれ予測価格と実際価格を表す。ETA は決定係数と同様に 0 から 1 に正規化された指標であり、1 は最大の収益性を、0 は収益が得られない状況を示す。また、式(1)の分子のみを評価指標として用いることも可能であり、分母は ETA を 0 から 1 の範囲に規格化するために利用される。

* 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail : cai@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

以下に ETA の適用例を示す．対象とする DR は蓄電池システムとし，価格予測に基づいて低価格時に充電，高価格時に放電する運用を行う．蓄電池は 1 タイムステップで完全充電または放電が可能であり，劣化抑制の観点から 1 サイクルの充放電に限定する．また，シングルプライス市場において DR は価格受容者として入札するため，入札はすべて成立すると仮定する．収益は実際の市場精算価格に基づいて算出する．

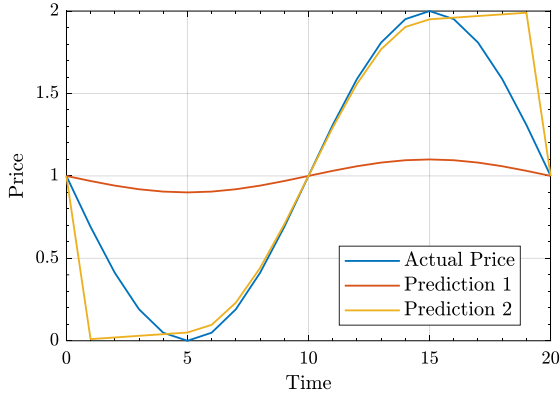


図 1 予測結果を比較する例

表 1 DR の運用計画と収益

	充電時間	放電時間	収益	R^2
実績	5	15	2	1
予測 1	5	15	2	0.19
予測 2	1	19	0.62	0.87

図 1 に 2 種類の予測結果を比較した例を示し，その詳細を表 1 に示す．予測 2 は決定係数が 0.87 と高く，一見すると予測 1 より優れている．しかし，予測 2 は価格の極大値および極小値の発生時刻を正確に捉えられておらず，収益は 0.62 にとどまる．一方，予測 1 は決定係数が低いが，極値タイミングを正確に予測しており，これにより DR は最大収益を達成している．

式(1)の ETA は，DR の充放電時間を考慮していない．しかし，充放電時間が長くなる場合には，極値点のタイミングの精度だけでなく，その周囲の一定範囲も考慮することが重要となる．そのため，ETA を計算する前に，予測価格 Y および実際の価格 T に対して中央移動平均をかける：

$$ETA = \frac{\sum_{i \in L_{\max}} \bar{Y}(i) - \sum_{i \in L_{\min}} \bar{Y}(i)}{\sum_{i \in L_{\max}} \bar{T}(i) - \sum_{i \in L_{\min}} \bar{T}(i)} \quad (2)$$

\bar{Y} および \bar{T} は移動平均フィルタにより平滑化された予測価格および実際価格であり，フィルタのウィンドウの長さは充放電時間の長さに対応する．

実際価格にある高周波の小さな変動を無視することで，DR が充放電する価格は単一の極小・大点を持つ凹・凸曲線で近似できる．移動平均フィルタを適用することにより，DR にとって関心のある範囲内の価格情報が取り込まれ，新

たな極値点として統合される．

図 1 の例における，充電時間を考慮した ETA の値を表 2 に示す．収益率は，対象予測を用いた場合の収益と，実際価格を用いた場合の理論上の最大収益の比である．充放電時間が 1 タイムステップの場合，移動平均フィルタのウィンドウサイズも 1 に設定され，移動平均を適用しない場合と同等となる．この場合，式(2)の ETA は充放電時間を考慮しない式(1)の ETA と一致する．充放電時間が長くなるにつれて，それを考慮した式(2)の ETA は収益率と一致し，式(1)の ETA に比べて評価精度が向上していることを示している．

表 2 運用時間を考慮した ETA

充放電時間	1	2	3	4	5
ETA(運用時間考慮なし)	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310
ETA(運用時間考慮あり)	0.310	0.459	0.588	0.710	0.811
収益率	0.310	0.460	0.588	0.716	0.809

3. シミュレーション

本論文のシミュレーションの対象となる DR は，JEPX スポット市場から充電電力を購入し，放電によって市場に売電することで収益を得る需要側の蓄電池システムである．この DR の毎日運用スケジュールは，式(3)で示す最適化問題として定式化される．

$$\text{maximize} \quad P_{\max} \Delta t \sum_{t=1}^{48} Y(t) \text{State}(t) \quad (3a)$$

$$\text{subject to} \quad SOC(t) = SOC_{\text{initial}} - P_{\max} \Delta t \sum_{t=1}^{48} \text{State}(t) \quad (3b)$$

$$0 \leq SOC(t) \leq 1 \quad (3c)$$

$$-\sum_t \text{State}(t) \leq k \quad \text{if } \text{State}(t) < 0 \quad (3d)$$

2025 年 4 月から 2025 年 9 月までの期間において，3 つの予測手法で九州，東京，東北の JEPX スポット価格を予測した．一部の予測結果は図 2 に示されている．

DR の収益と評価指標の関係は図 3 に示されている．DR の容量は 10MWh であり，最大出力は充放電時間に応じて変化する．異なる充放電時間のケースは，異なる形状のマーカーで示されている．図 3 から，決定係数は収益率に対して明確な相関性を示しておらず，予測の経済的価値を反映する能力が限定的であることがわかる．一方，充放電時間を考慮しない場合でも，収益率と ETA には一定程度の線形関係が観察される．しかし，充放電時間が 2 時間を超えると，この相関性は著しく低下する．ETA に充放電時間を考慮すると，全てのケースにおいて収益率とのほぼ完全な線形関係が確認できる．この証拠は，充放電時間を考慮した ETA が収益率に一致する信頼性の高い指標であり，予測結果の性の評価として有効であることを示している．

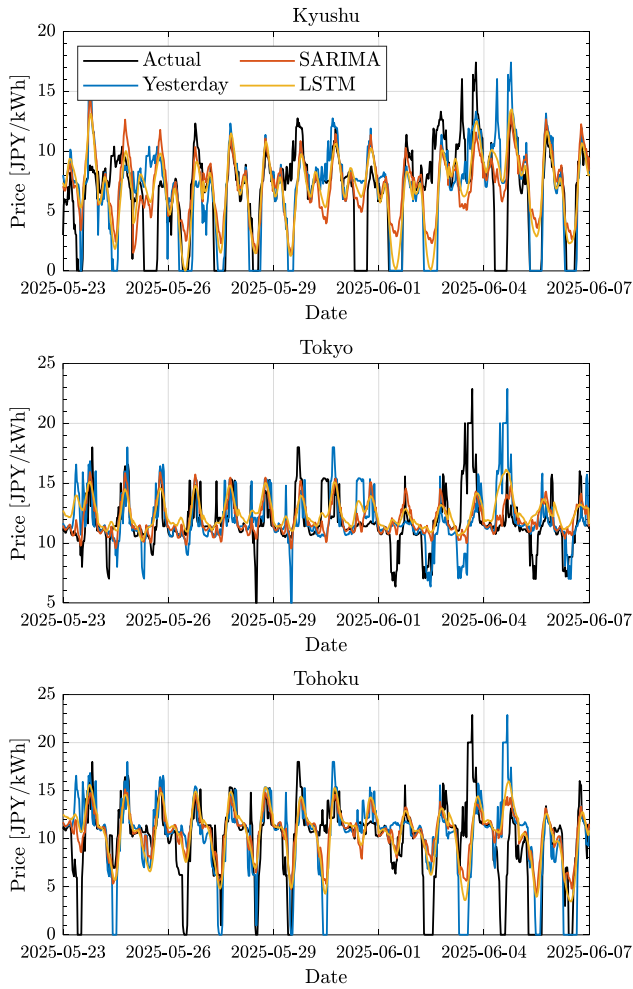


図2 JEPX スポット価格の予測結果

4. 結論

本論文では、DR の運用時間を収益性に基づく評価指標 ETA に組み込む新たな手法を提案した。従来の ETA は、DR の充電時間が長くなると精度が低下するという課題があった。この問題に対処するため、DR の運用時間に対応したウィンドウサイズを持つ中央移動平均フィルターを適用した。これにより、運用時間が長い場合でも ETA の精度が大幅に向上することが示された。

謝辞

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。

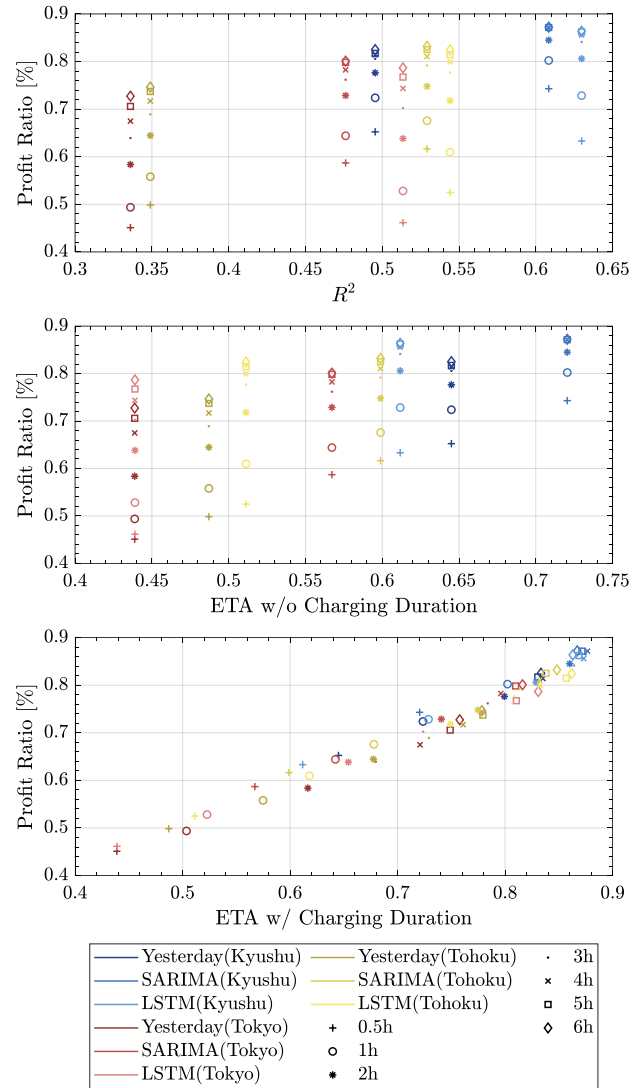


図3 DR の収益と評価指標の関係

参考文献

- 1) 蔡思楠, 前匡鴻, 松橋隆治; デマンドレスポンスのための電力市場価格予測手法の比較, 令和 6 年電気学会全国大会, (2024.3).
- 2) Sinan Cai, Masahiro Mae, Ryuji Matsushashi; 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), (2024.5).