

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14150

研究課題名（和文）電気自動車の確率的需要予測による最適充電アルゴリズムの研究

研究課題名（英文）Optimal EV charging algorithm with probabilistic EV demand forecasting

研究代表者

小平 大輔（Kodaira, Daisuke）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：20880777

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：成果は大きくわけて2つある。1つは、電気自動車（EV）群の充電需要予測の理論構築である。確率的予測区間を生成するための機械学習手法を開発し、その有効性を示した。また、最適充電行動のための予測精度が重要であることを確認した。2つ目は、多数のEVの最適充放電アルゴリズムにおける計算量低減の理論構築である。複数のEVを仮想的に一つの大容量EVとして扱う手法を開発し、実用的な計算時間での充放電スケジュール計算を実現した。さらに、売電利益を最大化する充放電の最適化アルゴリズムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電の普及が電力需給バランスの維持を困難にしている。低コストでこの問題を解決する方法として電気自動車（EV）を用いた制御が注目されているが、多数のEVの制御には不確定性の高い充電需要の予測と計算量の増加という課題がある。本研究では、これらの課題に対応するため、EVの充電需要を確率的に予測し、その誤差を考慮する新たな理論を構築した。また、充電制御の計算量を低減する方法を開発した。これらの理論は、電力システムの調整力を確保するためのEV充電制御技術の社会実装に貢献する。

研究成果の概要（英文）：There are two main results. The first is the construction of a theoretical framework for predicting the charging demand of a group of electric vehicles (EVs). We developed a machine learning method to generate probabilistic prediction intervals and demonstrated its effectiveness. Additionally, we confirmed that the accuracy of the forecast is critical for optimal charging behavior. The second result is the development of a theory to reduce computational time in optimal charge-discharge algorithms for a large number of EVs. We developed a method that treats multiple EVs as a single large-capacity EV in a virtual sense, enabling the calculation of charge-discharge schedules in a practical computational time. Furthermore, we constructed an optimization algorithm for charge-discharge to maximize profits from selling electricity.

研究分野：スマートグリッド

キーワード：電力需要予測 EV充放電最適化 電気自動車 最適化 配電系統

1. 研究開始当初の背景

社会全体での SDGs の実現に向けて、太陽光発電 (PV) などの再生可能エネルギーの導入が進んでいるが、電力系統の需給バランスを不安定にするという事例が顕在化している。多数の電気自動車 (EV) の空いているバッテリーを集約し活用する手法が世界的な潮流となり、活発な研究が行われている。しかしながら、現在のところ、世界中で EV の充電 (または充放電) スキームを運用し、収益を上げている事業者がない。これは、実用的な EV の充電制御には、1) 計算量が膨大になる 2) EV 需要の不確実性という実装に向けた理論的な課題があるためである。計算量増大に関しては、一定の研究が行われている。EV 群の充電制御を提案している最新の代表的な論文 (W. Tang, IEEE trans. Smart Grid, 2017) では、モデル予測制御における time horizon の長さに伴う計算量増大の問題にアプローチし、計算量が time horizon の長さに関わらず、 $O(1)$ で得られることを理論的に示した。しかし EV の充電需要予測に誤差がある場合については検証が行われていない。また、EV の台数が増えることによる計算量増大については、世界的にも未だに研究が行われていない。EV の充放電による電力系統の安定化は、低コストで環境負荷が低く、将来の電力系統安定化において、必須の技術になると考えられる。本研究提案では、充電制御における研究課題を解決し、放電制御を組み合わせた充放電制御理論の構築への端緒を開くことを目指した。

2. 研究の目的

PV 発電により発生する電力需給のアンバランス安定化のため、移動目的で使われていない EV 群の利用可能な容量を使った充電制御理論を構築する。EV の充電需要予測を確率的に行い、予測誤差を考慮した上で多数の EV の充電スケジュールを実用化可能な計算量に低減する理論を構築する。

3. 研究の方法

(1) 項目 1 : Electric Vehicle (EV) 群の充電需要と PV 発電量予測の理論構築

充電需要を確率的に予測するために、確率的な幅を持った予測区間 (Prediction Interval) をどのように生成するかを検討を行った。当初の予定とは異なり、確率分布関数を予測するのではなく、Lower upper bound estimation と呼ばれる機械学習をもとにした手法を用いて、直接的に予測区間を推定することで、より汎用なデータに対して妥当性の高い予測区間を生成できることをシミュレーションにより示す。また、予測区間の生成において、どのようなデータ項目が予測結果に有意に影響を与えるのかを Random Forest を用いて選定する手法を開発する、地理的に分散した、複数地点のデータを機械学習の入力データとして与えることにより、単独の拠点のデータを用いて予測を行うよりも精度が向上することを示す。

(2) 項目 2 : 多数の EV の最適充放電アルゴリズムにおける計算量低減の理論構築

シミュレーションベースにおいて、複数の EV の充電行動を仮想的に一つの容量の大きな EV として扱う Clustering 手法を開発した。複数の EV の充電拠点にそれぞれ異なる到着時刻・出発時刻・充電残量をもった EV が任意の充電行動を取る際に、ユーザーの要求 (出発時刻までにどれだけ充電が必要か) を満たす充放電スケジュールを現実的な計算時間で実施できるモデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 項目 1 : Electric Vehicle (EV) 群の充電需要と PV 発電量予測の理論構築

充電需要を確率的に予測するために、確率的な幅を持った予測区間 (Prediction Interval) をどのように生成するかを検討を行った。当初の予定とは異なり、確率分布関数を予測するのではなく、Lower upper bound estimation と呼ばれる機械学習をもとにした手法を用いて、直接的に予測区間を推定することで、より汎用なデータに対して妥当性の高い予測区間を生成できることをシミュレーションにより示した。

予測子の評価：

予測区間の生成において、どのようなデータ項目が予測結果に有意に影響を与えるのかを Random Forest を用いて選定する手法を開発した。日射量、気温、雲量等の全 14 の予測子における重要度 (gain) を Random Forest により求め、gain の高い予測子から順番に特徴量に組み入れた 14 の特徴量パターンを想定し、NN の入力とすることで、各予測子が Prediction Interval に与える影響を考察した。85 回のシミュレーションの結果、gain の低い予測子が含まれる特徴量の予測において、Prediction Interval Coverage Probability (PICP) は減少傾向にあり、Mean Prediction Interval Width (MPIW) はゆるやかに広がり、予測のばらつきも大きくなることから、gain の低い予測子は PI の予測精度を低下させるものであることがわかった。また、最適な特徴量であった「日射量、時間正弦成分、時間余弦成分、年次余弦成分」を用いた予測は、全予測子を用いた特徴量の予測に比べて、PICP は 0.057 程高く、MPIW 0.12kW 程狭くなった。

地理的な分散の影響の評価（機械学習による予測）:

EV や PV は実際には単独ではなく、地理的に分散した多数の機器について統合して運用することが想定される。そこで、地理的に分散した、複数地点のデータを機械学習の入力データとして与えることにより、単独の拠点のデータを用いて予測を行うよりも精度が向上することを示した。図 1(a)は、単一の PV 予測モデルによる 30 日間のうち、最もカバー率（予測区間に測定値が含まれる割合）が悪い日を示したものである。図 1(b)は、複数 PV 予測モデルを使用した場合である。複数の PV 予測モデルを使用した場合、カバー率は 72% から 100% に改善した。また、Root Mean Square Error は 0.517kW から 0.117kW に減少した。ただし、複数の PV 予測モデルを用いた場合、Prediction Interval のカバー率が悪化するケースもある。

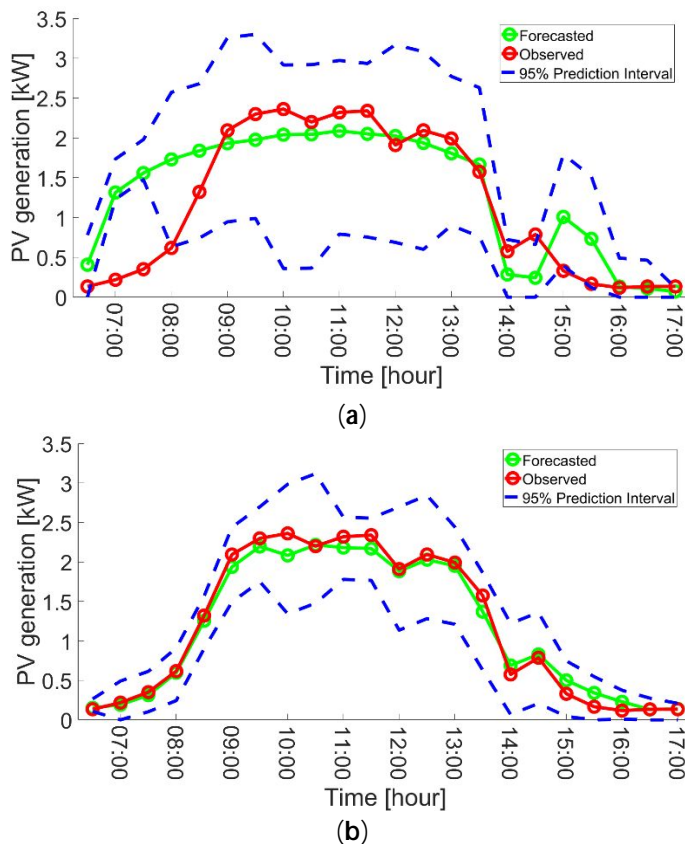


図 1. 2014 年 7 月 11 日の PV の予測改善の結果。当該日は予測を行った全 30 日間のうち、単一 PV 予測モデルによる Prediction Interval カバー率が最も悪い日である。(a) 単一 PV 予測モデル (カバー率 72%)。 (b) 複数 PV 予測モデル (カバー率=100%)。

広範囲な PV 群の予測（画像処理の技術の応用）:

これまでも、複数の太陽光発電システムを対象に、動き推定を用いた短時間（30 分前）予測手法が提案されている。この手法は、分散型太陽光発電システムの 2 つの地理的な画像の間の動きを推定することで、短時間先の太陽光発電量を予測する。この手法では、得られる動きベクトル場の滑らかさに関係し、予測精度に影響するパラメータが重要である。本研究では、パラメータに着目し、このパラメータを変更することによる予測精度への影響を評価する。電力出力が急激に変化する期間において、101 台の PV システムを対象に予測を実施した。その結果、最適なパラメータを用いた提案手法の絶対平均誤差は 10.3% であるのに対し、パーシステム予測手法のそれは 23.7% であることが判明した。したがって、提案手法は、PV 出力が短い時間間隔の中で大きく変化する期間の予測に有効である。

また、実際の蓄電池を用いた実証試験を一部行い、蓄電池の最適動作のためには予測精度の影響が極めて大きい点を明らかにした。

(2) 項目 2： 多数の EV の最適充放電アルゴリズムにおける計算量低減の理論構築

シミュレーションベースにおいて、複数の EV の充電行動を仮想的に一つの容量の大きな EV として扱う Clustering 手法を開発した。複数の EV の充電拠点にそれぞれ異なる到着時刻・出発時刻・充電残量をもった EV が任意の充電行動を取る際に、ユーザーの要求（出発時刻までにどれだけの充電量が必要か）を満たす充放電スケジュールを現実的な計算時間で実施することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kure T, Tsuchiya HD, Kameda Y, Yamamoto H, Kodaira D, Kondoh J.	4. 巻 15
2. 論文標題 Parameter Evaluation in Motion Estimation for Forecasting Multiple Photovoltaic Power Generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2855-2875
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en15082855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kodaira D, Tsukazaki K, Kure T, Kondoh J.	4. 巻 14
2. 論文標題 Improving Forecast Reliability for Geographically Distributed Photovoltaic Generations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 7340-7355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14217340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Park J, Kodaira D, Agyeman KA, Jyung T, Han S	4. 巻 14
2. 論文標題 Adaptive Power Flow Prediction Based on Machine Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3942-3960
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14133842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------