

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630115

研究課題名(和文) 太陽光発電集中連系配電ネットワークにおける日射予測を用いた蓄エネ制御支援手法開発

研究課題名(英文) Development of storage battery management method based on PV output forecast for electrical power distribution system with a large amount of PV

研究代表者

若尾 真治 (WAKAO, Shinji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70257210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、環境エネルギー問題を背景に今後予想される太陽光発電の配電ネットワークへの大量連系を見据え、太陽光発電電力の効率的な利用を実現する蓄電デバイスへの蓄エネルギー運用技術の確立を目指して、日射予測・最適充放電制御の探索手法・最終的なエネルギーマネジメントの指針決定支援までを一体化した統合型シミュレータを構築した。また、数値実験を通して、本シミュレータにより開発した蓄電池運用手法の有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The storage battery management method based on photovoltaic (PV) output forecast was developed for realizing the mass introduction of PV into electrical power distribution systems with a background of energy and environmental problems. To carry out the efficient energy management of battery, we developed the integrated numerical simulator consisting of the PV output forecast method and the decision support method of battery operation as well as the optimization method of charging and discharging control. We also verified the effectiveness of the developed battery operation through the numerical simulations.

研究分野：工学

キーワード：太陽光発電 日射予測 予測信頼区間 蓄エネルギー 多目的最適化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、環境エネルギー問題を背景に、わが国では再生可能エネルギーの中でも特に太陽光発電への期待が高まっている。その導入促進に向けた政策的な支援もあり、太陽光発電の導入量は急激に増加しており、その結果、わが国の配電ネットワークの運用においては、供給信頼性の維持、電力コストの低減の要望など、多種多様な課題が生じている。すなわち、太陽光発電のフリーアクセス化、電力コストの低減等のネットワーク使用側である太陽光発電連系者や需要家のニーズと、供給信頼性や電力品質の維持、過剰設備投資の抑制等のネットワーク管理側である電気事業者のニーズは必ずしも合致しておらず、現行の運用方式では、双方のニーズを満足可能な配電ネットワーク運用の実現は極めて困難な状況である。

例えば、わが国で成熟した 6kV の配電ネットワークの電圧管理は、太陽光発電の連系を前提としていないため、太陽光発電からの逆流による電圧上昇を踏まえた配電線全体の電圧管理を動的に行うことは現行の方式ではできない。そのため、今後、太陽光発電が大量連系された際には電圧が適正値を逸脱する場合もあり、供給信頼性の確保が困難となる。

このような配電ネットワークの運用形態を取り巻く閉塞的局面を打破する一つの方法として、新たな蓄エネルギーデバイスの導入、並びにその運用方式の実現可能性の詳細な解析が必要であると考え。一方、先に述べたように、太陽光発電連系者や需要家、ネットワーク管理者の多種多様なニーズは複雑なトレードオフ関係を有する。特に本研究では、据置型蓄電装置の活用など、これまで配電ネットワークになかった要素に焦点を当てるが、これは運用制御の自由度が大幅に高まることを意味する。

このようにニーズ（目的関数）とネットワーク運用制御の自由度（設計変数）が多様化すればするほど、従来の数値シミュレーション手法では、精度面の問題に加え、これらの相関が不透明のままであり、配電ネットワークにおける蓄電デバイスの運用支援には不十分である。すなわち、蓄電装置のエネルギー管理の指針を効率よく決定支援できる高精度なシミュレータの開発が必要となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、環境・エネルギー問題を背景に今後予想される太陽光発電の配電ネットワークへの大量連系を見据え、太陽光発電電力の効率的な利用を実現する据置蓄電装置などへの蓄エネルギー運用技術の確立を目指した。

具体的には、数値解析、最適化、統計推測、機械学習の理論を融合した、日射予測からネットワークにおける最終的な蓄電装置のエネルギー管理の指針決定支援までの一貫したプロセスを全てカバーする高精度な統

合型のシミュレータを構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、日射予測情報を活用した据置蓄電装置などへの蓄エネルギーにより、太陽光発電が大量連系された配電ネットワーク内の効果的なエネルギー管理指針を効率よく支援することを目指し、

- (1) ブラックボックスモデリングの一種である Just-In-Time (JIT) Modeling に基づく翌日日射予測技術の開発
- (2) 翌日の日射予測情報に基づく蓄電デバイスへの最適な充放電制御の探索（多目的最適化）手法の開発
- (3) 得られたパレート最適解より、多様なニーズ（目的関数）とエネルギー管理方式の自由度（設計変数）間の複雑な相関情報を効果的に抽出し、日射予測誤差も踏まえてネットワークにおける蓄電デバイスのエネルギー管理指針の決定を行う情報処理手法の開発

の3項目を実施し、最終的には、これらを統合したシミュレータを構築した。また、本シミュレータにより開発した蓄電池運用手法の有効性を、数値実験を通じて明らかにした。

## 4. 研究成果

「JIT Modeling に基づく翌日日射予測技術」では、物理的な定式化を必要としないブラックボックスモデリングの特長を活かし、気象現象のような複雑な対象を簡便かつ高精度にモデル化することを試みた。JIT Modeling は、対象システムにおける過去の入出力関係をデータベース化し、データベース中の入力ベクトルデータ群と予測対象の入力ベクトルを比較して類似データを抽出し、その類似データ情報に基づきシステムの出力を予測推定する手法である。翌日日射量の推定精度向上のため出力と相関を有する適切な入力群を随時選択する必要があり、開発手法では気象庁が配信する GPV (Grid Point Value) データ等、入力データとして適性の高いものを精査・選択し、データ選択時の距離測度の最適化を行うなどの工夫を施した。その結果、蓄電装置を併設した太陽光発電システムの運用制御に十分活かせる予測精度を達成した。

また、広域に太陽光発電が大量導入された場合を想定し、導入エリア全体における総日射量予測にも開発手法を適用し、単地点予測と比較して予測精度における均し効果の影響等も定量的に明らかにした。

さらに、JIT Modeling にカーネル密度推定法を組み入れることで、日射予測手法をさらに展開し、予測値の信頼性の指標である予測信頼区間を推定する手法も開発した。実測データを用いた精度検証の結果、JIT Modeling における調整パラメータの一つである近傍数を過去のデータベースから時間別に学習し、カーネル関数に対して重み付けを行うなどの

工夫を施すことで、高精度な予測信頼区間の推定が可能であることを実証した。本開発手法により、太陽光発電出力予測値の信頼性を確率的に議論することができ、予測情報を用いた蓄電デバイスの運用効果をさらに向上させることが可能となった。

「翌日の日射予測情報に基づく蓄電デバイスへの最適な充放電制御の多目的最適化技術」および「得られたパレート最適解より、日射予測誤差も踏まえてネットワークにおける蓄電デバイスのエネルギーマネジメント指針の決定を行う情報処理技術」では、先ず、簡便かつ実用的な手法として、予測された発電量と負荷量の差異を複数段階にレベル（区分）分けし、各区分に応じて蓄電池運用パラメータを最適値に切り替える運用手法（区分予測別運用手法）を開発した。

予測を行う時間単位を細かくし区分数を増やすことで蓄電デバイスの制御性は向上するものの、予測精度の悪化に伴う運用効果の低減が懸念される。すなわち、予測情報を活用した蓄電デバイスの運用では、運用のきめ細やかさによる制御性の向上と予測精度の悪化とのトレードオフ関係を考える必要がある。そこで、次に、散布図行列を用いることで運用効果（目的関数）と運用方式の自由度（設計変数）間の複雑な相関情報を効果的に抽出する分析手法を開発した。

最終的には、遺伝的アルゴリズムにより環境性と経済性の複数の目的を考慮した多目的最適化を提案の区分予測別運用手法に適用し、散布図行列による提案の分析手法を組み合わせることで、蓄電デバイスの導入目的に応じた実用的な（日射予測誤差の影響も適切に考慮した）運用パラメータの設定指針を効率よく明らかにする方法論を確立した。また、蓄電池併設型太陽光発電システムが大量導入された1000軒規模の住宅群モデルを用いた数値実験により、これら一連の提案手法の有効性を明らかにした。

本研究で開発した「日射予測から太陽光発電システムにおける蓄電デバイスのエネルギーマネジメントの指針決定支援までの一貫したプロセスを全てカバーする高精度な統合型シミュレータ」は、蓄電デバイスを有する様々なエネルギーシステムの運用に広く適用可能であり、今後の再生可能エネルギーの普及拡大への寄与が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① 山寄朋秀, 本間隼人, 若尾真治, 藤本悠, 林泰弘, 「太陽光発電出力予測のための Just-In-Time Modeling を用いた日射量予測信頼区間の推定方法」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.3, pp.160-167, 2015, 査読有, 10.1541/ieejpes.135.160
- ② 林 尚芳, 下尾高廣, 若尾真治, 「蓄電池併設型太陽光発電システムの運用設計に

おける発電量・負荷量の予測誤差の影響評価」, 電気学会論文誌B, Vol.133, No.11, pp.903-909, 2013, 査読有, 10.1541/ieejpes.133.903

〔学会発表〕（計 12 件）

- ① T. Yamazaki, S. Wakao, Y. Fujimoto, Y. Hayashi, “Improvement of prediction interval estimation algorithm with Just-In-Time Modeling for PV system operation,” The 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2015.6.14-19, New Orleans, USA
- ② Y. Hara, T. Yamazaki, S. Wakao, K. Nukada, T. Tamura, M. Takahata, “Robust battery operation of green base stations considering forecast of PV output,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2014-11.23-27, Kyoto, Japan
- ③ T. Yamazaki, Y. Hara, S. Wakao, Y. Fujimoto, Y. Hayashi, K. Nukada, T. Tamura, M. Takahata, “Application of PV output prediction interval to battery operation of green base stations,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2014.11.23-27, Kyoto, Japan
- ④ T. Matsuyuki, S. Wakao, T. Iwato, T. Tanaka, Y. Kanai, N. Yamashita, “Energy management method with PV and storage battery by optimal combination of various control modes,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2014.11.23-27, Kyoto, Japan
- ⑤ T. Matuyuki, S. Wakao, T. Iwato, Y. Kanai, T. Babasaki, “Constant-ratio reversal power flow control of EV battery for redressing inequality in the case of mass introduction of large amount of PV system,” 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 2014.9.22-26, Amsterdam, Netherland
- ⑥ Y. Hara, T. Yamazaki, S. Wakao, K. Nukada, T. Tamura, M. Takahata, “Multi-objective battery operation of green base transceiver station by utilizing of PV power forecast,” 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 2014.9.22-26, Amsterdam, Netherland
- ⑦ T. Yamazaki, H. Homma, S. Wakao, Y. Fujimoto, “Estimation method of prediction interval of forecasted solar irradiance with Just-In-Time modeling,” Grand Renewable Energy 2014, 2014.7.27-8.1, Tokyo, Japan

- ⑧ 松雪 峻, 若尾真治, 岩戸 健, 金井康通, 馬場崎忠利, 「PV大量導入時の不平等性解消に向けたEVバッテリーによる定比率逆流制御」, 平成26年電気学会全国大会, 2014. 3. 18-20, 愛媛大学城北キャンパス, 愛媛県・松山市
- ⑨ 本間隼人, 若尾真治, 「MSM-GPVデータを用いた各種日射量予測手法の比較検討」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2013. 11. 28-29, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄県・那覇市
- ⑩ 原 嘉彦, 山崎朋秀, 若尾真治, 「PV発電量予測の活用によるグリーン無線通信基地局における蓄電池運用の多目的化」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2013. 11. 28-29, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄県・那覇市
- ⑪ 松雪 峻, 若尾真治, 「太陽光発電システムにおける発電量予測および残存SOC情報を活用した蓄電理運用」, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2013. 11. 28-29, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄県・那覇市
- ⑫ T. Hayashi, T. Matsuyuki, S. Wakao, J. Inamori, T. Babasaki, “Charge and discharge control of electric vehicle in PV system with PV output and load power forecast information,” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (28th EUPVSEC), 2013. 9. 30-2013. 10. 4, Paris, France

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

若尾 真治 (WAKAO, Shinji)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号 : 70257210