

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360128

研究課題名(和文) 太陽光発電大量連系を可能とする次世代配電ネットワーク運用支援統合シミュレータ開発

研究課題名(英文) Development of integrated simulator for energy management assistance in electrical power distribution system with a large amount of photovoltaics

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) 10,200,000円、(間接経費) 3,060,000円

研究成果の概要(和文)：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実現するため、最適送出電圧制御方式と最適構成制御方式との協調運用という配電ネットワークの新しい運用形態の開発を行った。運用手法の開発に際し、構成要素のモデリングから最終的なネットワークの設計・運用指針の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し、グリッド模擬装置による実験と合わせて、開発運用手法の有効性を定量的に実証した。

研究成果の概要(英文)：The novel cooperative operation of the centralized voltage control method and the optimal sectionalizing switch control method was developed for realizing the mass introduction of photovoltaics into electrical power distribution systems against a backdrop of energy and environmental problems. For the proposed operation design, we also developed the integrated numerical simulator consisting of the modeling method of system components and the decision support method of system operation as well as the design optimization method. We verified the effectiveness of the developed operation through both the numerical simulations and the experiments carried out with the grid simulator that could simulate actual machine characteristics difficult to model in the numerical simulations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学

キーワード：太陽光発電 住宅負荷 予測 モデリング 最適送出電圧制御 最適構成制御

1. 研究開始当初の背景

近年、環境問題やエネルギー問題などにより、再生可能エネルギーへの期待が高まっており、わが国ではその中でも太陽光発電が注目されている。その結果、わが国の配電ネットワークの運用形態にも多種多様な課題が課せられており、太陽光発電の連系要望の増加、供給信頼性の維持、電力コスト低減の要望など、電力ネットワークを取り巻く状況は大きな変革期を迎えている。

しかし、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(太陽光発電のフリーアクセス化等)とネットワーク管理側である電気事業者のニーズ(供給信頼性の維持、電力品質の維持等)は必ずしも合致しておらず、現行の運用方式(電圧制御方式、構成制御方式等)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かったため、電圧降下計算をもとに配電線負荷中心点の電圧だけを許容範囲内に収める制御方式を採用しており、太陽光発電からの逆潮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、太陽光発電が大量に連系された際には電圧が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には、現行の運用方式にとらわれることのない新しい運用制御方式の創出、並びにその運用形態の実現可能性の詳細な解析が必要である。また、先に述べた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。さらに、今後、据置型蓄電装置や電気自動車バッテリーの活用など、これまで配電ネットワークになかった要素が組み入れられる可能性があり、運用制御の自由度も格段に高まることが考えられる。このようにニーズ(目的関数)とネットワーク設計・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、これらの複雑な相関を把握することは困難であり、次世代配電ネットワークの設計・運用の検討において真に有益な情報を抽出できる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、太陽光発電のフリーアクセス化等の次世代配電ネットワークに対する使用側からのニーズと、供給信頼性の維持、三相配電損失の最小化等の管理側からのニーズという双方からの多様なニーズを満たすべく、現状からの現実的な移行も踏まえた、最適送出電圧制御方式と最適構成制御方式との協調運用という配電ネットワークの新

しい運用形態の創出・確立を目指すと同時に、その実現可能性を高精度に定量化可能とする統合型のシミュレータを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

研究期間において、

- (1) 複数年かつ数百件規模の秒刻みの実測データに基づく一般家庭負荷や太陽光発電出力の高精度かつ汎用的なモデリング手法の開発
- (2) 配電ネットワークにおける最適送出電圧制御と最適構成制御の高速・高精度な探索手法の開発
- (3) 得られたパレート最適解より、多種多様なニーズ(目的関数)とネットワーク設計・運用制御の自由度(設計変数)間の複雑な相関情報を効果的に抽出してネットワーク設計・運用指針の決定を行う情報処理手法の開発

を行い、最終的にはこれらを融合させた統合型シミュレータを構築した。そのうえで、最適送出電圧制御方式と最適構成制御方式との協調運用という配電ネットワークの新しい運用形態の開発を行い、上記シミュレータに加え、グリッド模擬装置による実験と合わせて、開発した運用手法の有効性を定量的に実証した。

4. 研究成果

太陽光発電設備が大量連系された配電ネットワークにおける供給信頼度(電圧余裕、配電損失等)を確保するため、最適送出電圧制御方式と最適構成制御方式を用いた新たな協調運用形態を検討した。まず最適送出電圧制御方式として、配電ネットワーク内に設置されているセンサ内蔵開閉器からの電圧監視情報をもとに、電力品質を制約条件として電圧余裕最大化を目的にオンラインで送出電圧プロファイルを制御する方法論の開発を行った。次に、最適構成制御方式として、配電ネットワークに設置されている開閉器を制御してネットワーク構成を切り換えることで、電圧上下制限、線路容量制約等の制約条件を満たし、配電損失を最小化する構成を決定可能な最適構成制御方式の開発を行った。最終的には、上述の最適送出電圧制御方式と協調運用することで電圧余裕最大化、配電損失最小化を実現可能な協調運用方式を開発した。

図1に検証用例題として使用した配電ネットワークモデルを示す。図1に示す開閉器により分割される区間をノードとし、太陽光発電と負荷が連系されるものとした。

図2に太陽光発電が導入された配電ネットワークにおける従来方式、開発した協調運用方式、それぞれを適用した際の全ノード電圧波形を示す。図2(a)に示す従来方式では配電ネットワークへの太陽光発電の大量連系を想定していないため、太陽光発電の余剰

電力に起因する逆潮流により、配電損失が増加し、電圧が上昇することで電圧余裕の確保が困難となり、パワーコンディショナ による出力抑制が発生していることがわかる。一方で、開発した協調運用方式適用時には、太陽光発電の導入状況に応じた開閉器制御を行うことで潮流の平滑化による配電損失低減と電圧余裕の確保が可能になり、出力抑制量の低減効果を確認することができた。

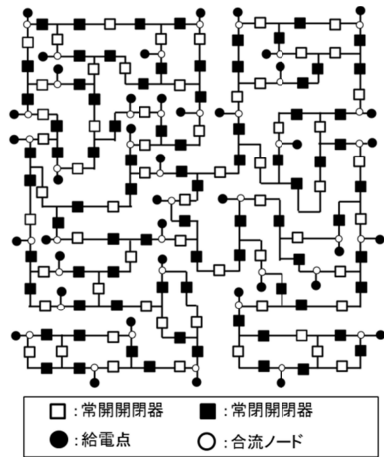
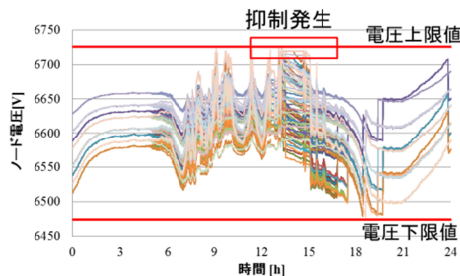
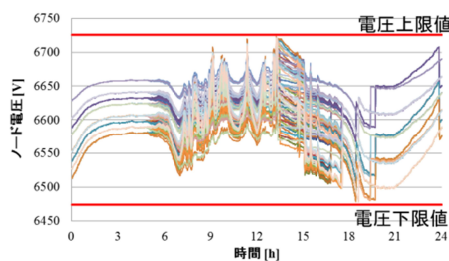


図1 配電ネットワークモデル



(a)従来方式



(b)協調運用方式

図2 シミュレーションによる電圧波形例

また、太陽光発電の導入パターンを多様に変化させたときの太陽光発電電力抑制量の分布を図3に示す。図3に示す箱ひげ図より、従来法と比較して、開発した協調運用方式を用いることで太陽光発電の出力抑制量が低減可能なことが分かる。すなわち、協調運用手法を適用すれば、太陽光発電の普及形態が不確実性を有していても、有効な配電ネットワーク構成を決定することが可能であり、需要家のニーズである太陽光発電のフリーアクセスが実現可能となることを確認した。

また、提案した協調運用形態について、太陽光発電が分散配置された大規模配電ネットワークを用いた上述のシミュレーション検証に加え、数値計算では再現が困難な実機特性を模擬可能なグリッド模擬装置による実験も併用し、計算と実験の両面から評価することで供給信頼度と受容性について詳細な検証を行った。図4にグリッド模擬装置による検証例を示す。図4より実機特性を模擬した環境においても、協調運用手法を用いて配電ネットワーク構成を適切に変更することで効果的な潮流制御が可能になり、電圧逸脱が回避可能なことを確認した。

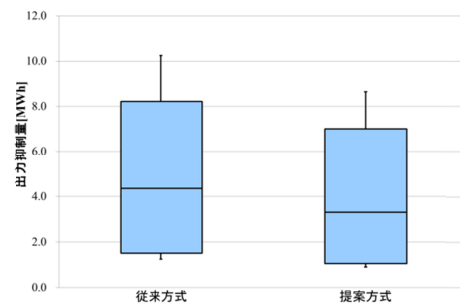
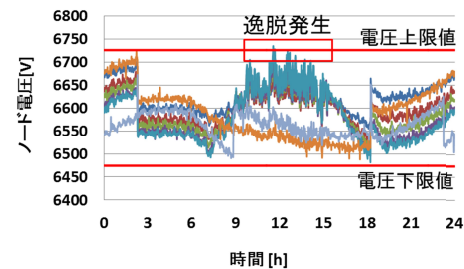
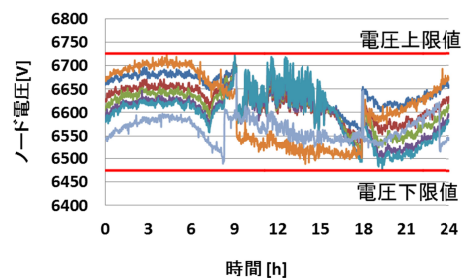


図3 様々な太陽光発電導入形態における出力抑制量の分布



(a)従来方式



(b)協調運用方式

図4 グリッド模擬装置による実験検証例

以上より、太陽光発電が導入された配電ネットワークに開発した協調運用方式を適用することで、配電損失低減、電圧余裕確保、および太陽光発電の受容性の担保が可能となることが検証され、本方式は今後の配電ネットワーク運用に有用な方式となることが期待できる。

なお、本協調運用方式の開発に際し構築した統合型シミュレータにおいては、最適化計算のみならず、出発点となる構成要素のモデ

リングから最終的なネットワークの設計・運用指針の決定支援までの一貫したプロセスを全てカバーしている点に特長がある。

「一般家庭負荷や PV 出力の高精度かつ汎用的なモデリング手法」の開発に関しては、数百件規模の PV 設置住宅における実測データに対しクラスター分析などを実施し（図 5）数理工学の側面から需要家の負荷および PV 出力の時間変動特性を解明した。また、同一クラスター内においても需要家の負荷や PV 出力にはばらつきが存在するため（図 6）シミュレーションに転用可能な汎用性のあるモデリングを目指し、正規乱数係数を用いた一般性のある負荷・発電量のモデル化手法を開発した。

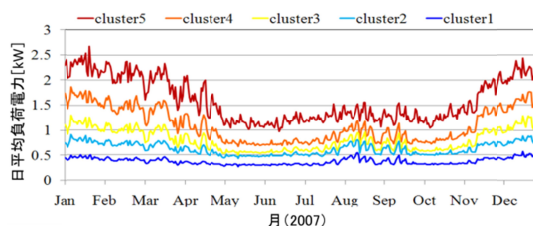


図 5 NEDO 技術開発機構「集中連系型太陽光発電システム実証研究」における負荷実測データ（NEDO より公開）のクラスター分析例

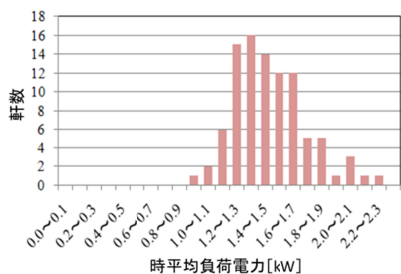


図 6 クラスター 4（冬季）における時平均負荷電力のヒストグラム

「多種多様な目的関数とネットワーク設計・運用制御の設計変数間の複雑な相関情報をパレート最適解より抽出し、最終的なネットワーク設計・運用指針の決定を行う情報処理手法」に関しては、電力品質・保護・保安面に加え、太陽光発電のコストや CO₂ ペイバックタイムなどの経済性・環境性の指標など、目的関数および設計変数を大幅に多様化した状況下でも、最終的なネットワーク設計・運用指針の決定作業効率を向上させる自己組織化マップを活用した情報処理手法を開発した。開発手法は、多次元ベクトルデータをその特徴を残し他のデータとの相互関係を保ったまま 2 次元のマップに写像することで、多次元データの関係性を 2 次元平面上の距離として視覚的に容易に理解することが可能であるという特長を持っている（図 7）。

本研究で開発した統合型シミュレータの応用範囲は広く、新しい電力工学研究分野の開拓と進展への寄与が期待できる。

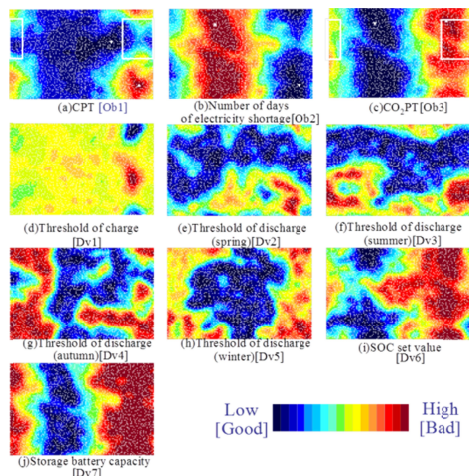


図 7 パレート最適解（3 目的・7 設計変数）に基づき作成した自己組織化マップ例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 8 件）

T. Udagawa, Y. Hayashi, N. Takahashi, Y. Matsuura, T. Morita, M. Minami, “Evaluation of Voltage Control Effect for Data Acquisition Period Length from SCADA with IT Switches,” Journal of International Council on Electrical Engineering (JICEE), Vol. 3, No. 2, pp.146-152, 2013, 査読有, 10.5370/JICEE.2013.3.2.146

高橋尚之, 林 泰弘, 「不感帯制御 SVC による配電系統の動的電圧制御手法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 4, pp. 396-403, 2013, 査読有, 10.1541/ieejpes.133.396

渡辺喬之, 林 泰弘, 「PV 導入ケースの多様性に対応した送配電系統の遮断器と開閉器の階層制御による送配電損失最小構成の決定手法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 4, pp. 383-395, 2013, 査読有, 10.1541/ieejpes.133.383

宇田川 剛, 林 泰弘, 高橋尚之, 松浦康雄, 森田智比古, 南 雅弘, 「センサ開閉器情報の取得周期が配電系統電圧制御に与える影響の評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 4, pp. 324-332, 2013, 査読有, 10.1541/ieejpes.133.324

飯嶋 彩, 鈴木一生, 若尾真治, 川崎憲広, 宇佐美章, 「統計的パターン認識を用いた分光放射照度の波長重心推定に関する基礎的検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 2, pp. 189-196, 2012, 査読有, 10.1541/ieejpes.132.189

S. Takahashi, Y. Hayashi, Y. Tsuji, E. Kamiya, “Method of Optimal Allocation of SVR in Distribution Feeders with Renewable Energy Sources,” Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 2, pp. 159-165, 2012, 査読有

J. Inagaki, Y. Hayashi, “Experimental Analysis on Influences of Harmonic Voltage at High-Voltage Network on Harmonic Current at Medium-Voltage Network,” Journal of Int'l Council on Electrical Engineering, Vol. 2, pp. 146-152, 2012, 査読有

鈴木孝宣, 後藤悠主, 寺園隆宏, 若尾真治, 大関 崇, 「Just-In-Time Modeling に基づく日射量予測手法の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 11, pp. 912-919, 2011, 査読有, 10.1541/ieejpes.131.912

[学会発表](計 40 件)

高橋 諒, 高橋尚之, 林 泰弘, 「PV 連系配電システムにおける電圧感度推定を用いた動的集中制御手法の基礎検討」, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014 年 3 月, 愛媛大学

榎本恭平, 宇田川 剛, 高橋尚之, 林 泰弘, 松浦康雄, 阿部勝也, 南 雅弘, 「集中型配電システム電圧制御におけるセンサ開閉器の最適設置箇所の評価」, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014 年 3 月, 愛媛大学

K. Nishijima, S. Wakao, “Utilization of EV battery for load leveling with PV power,” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (28th EUPVSEC), Oct. 2013, Paris, France

K. Uekusa, Y. Aoshima, S. Wakao, Y. Kude, N. Fujiwara, “Economic effects of peak clipping by storage battery in PV installed residential area,” 28th European Photovoltaic solar Energy Conference and Exhibition(28th EUPVSEC), Oct. 2013, Paris, France

M. Ryunosuke, R. Takahashi, N. Takahashi, Y. Hayashi, S. Ashidate, “Evaluation of the Effect of Solar Inverters Installed with Different Reactive Power Control Systems Types on the Distribution System,” the 23rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Oct. 2013, Taipei, Taiwan

大坪 敦, 高橋尚之, 林 泰弘, 「PV 連系システムに対応した開閉器切替制御による電圧制御の検討」, 平成 25 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2013 年 9 月, 九州工業大学

林 尚芳, 若尾真治, 「住宅地域における蓄電池併設型 PV システムの PV 導入率等の条件変化に応じた最適化設計」, 平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 3 月, 名古屋大学

N. Takahashi, Y. Hayashi, “Centralized Voltage Control Method Using Plural D-STATCOM with Controllable Dead Band in Distribution System with Renewable Energy,” IEEE PES ISGT Europe 2012, Oct. 2012, Berlin, Germany

T. Terazono, S. Wakao, S. Haoyang, H. Hino, N. Murata, “Confidence estimation of solar radiation forecast with just-in time modelling,” 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (27th EUPVSEC), Sep. 2012, Frankfurt, Germany

T. Hayashi, S. Wakao, “Multi-objective design of battery operation in a photovoltaic system by means of PV output and load power forecasts,” 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (27th EUPVSEC), Sep. 2012, Frankfurt, Germany

渡辺喬之, 藤本 悠, 林 泰弘, 「送電系統遮断器と配電系統開閉器の協調制御による送配電損失最小化手法を用いた PV 導入分布の違いによる損失削減」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2012 年 9 月, 北海道大学

T. Hayashi, S. Wakao, “Battery design optimization according to reversal PV power flow quantity from a distributing substation bank,” The 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), Nov. 2011, Fukuoka, Japan

林 尚芳, 若尾真治, 「発電量および負荷量予測を利用した PV システムにおける蓄電池運用法の多目的評価」, 電気学会新エネルギー・環境ノメタボリズム社会・環境システム合同研究会, 2011 年 11 月, 北海道大学

高橋修平, 林 泰弘, 辻 祐毅, 神谷英志, 「太陽光発電導入拡大に対応した SVR の最適配置と移設の決定手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2011 年 9 月, 大阪工業大学

S. Kinoshita, T. Shimoo, S. Wakao, Y. Miyamoto, “Multi-objective optimization of storage battery operation in clustered residential grid-interconnected PV,” 17th Power Systems Computation Conference (17th PSCC), Aug. 2011, Stockholm, Sweden

ほか 25 件

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

(2) 研究分担者

林 泰弘 (HAYASHI, Yasuhiro)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 40257209