

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820096

研究課題名（和文）電力システムにおける需要家を活用した電力品質の制御

研究課題名（英文）Power Quality Control utilizing Consumers in Power System

研究代表者

関崎 真也 (Sekizaki, Shinya)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号：70724897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、再生可能エネルギーの導入による電力品質劣化という課題に対し、通信網により結合した需要家を電力品質制御のためのプレーヤとして捉え、需要家所有機器を適切に制御することで、電力品質の効率的な管理を可能にする制御システムを構築した。提案システムは、電力品質のみならず、需要家間の利便性や、電力システムにおける設備の効率運用も考慮した最適化が可能であり、システム運用者が持つ多基準の運用目標を反映することができ、次世代電力システム構築に資することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research provides a novel framework to manage power quality in the power system utilizing the electric appliances of consumers. The power quality such as voltage in the power system will deteriorate due to the penetration of renewable energy sources. In the proposed system, the consumers connected with a system operator through the communication network are treated as players for the power quality control. The proposed system can manage the power quality efficiently by controlling the electric appliances of consumers. Moreover, a fairness between consumers and effective management of electric facility in the power system can be also taken into account by the proposed system. We believe that the proposed system can contribute to construct the power system integrated with renewable energy sources in the future.

研究分野：電力システム

キーワード：再生可能エネルギー 配電系統 需要家 電力品質

1. 研究開始当初の背景

わが国では再生可能エネルギーの導入が急速に進行しており、天候等に依存する再生可能エネルギーの不確実な出力変動により、周波数や電圧といった電力品質が劣化することが懸念されている。特に、需要家が導入する太陽光発電システムが数多く連系している配電系統においては、配電線の電圧が太陽光発電システムの出力により変動することが考えられ、適正範囲内に配電線電圧を管理することが重要な課題となっている。配電線電圧の管理には、蓄電池を用いた太陽光発電システム出力の平滑化や、太陽光発電システムの系統連系用パワーコンディショニングシステムによる無効電力制御、配電線上に設置された機器による電圧制御などが考えられるが、コストが大きい場合や、需要家間の不公平性の問題などが存在する。電力システムは社会にとって不可欠なインフラであり、低コストで運用することが求められるため、電力品質を効率的に管理することが重要である。

2. 研究の目的

電力品質を効率的に管理するためには、電力品質制御に寄与可能な要素（例えば、蓄電池や電圧制御機器）を適切に制御・運用する必要がある。本研究では、近年の情報通信技術の向上や、電力システム改革の一連の流れの中で双方向通信網が普及していくことが予想されることを鑑み、通信網によって結合した需要家を電力品質制御のためのプレーヤとして捉える。そして、これらのプレーヤを適切に管理することで、再生可能エネルギーが導入された電力システムにおける電力品質の効率的かつ適正な管理を目指す。

3. 研究の方法

(1) 解析モデルの構築

需要家を電力品質制御のためのプレーヤとして扱うためには、再生可能エネルギー導入時の電力システムにおける電力品質を表現可能なモデルを構築する必要がある。そこで、多数の再生可能エネルギーやプレーヤを含む配電系統が複数接続された大規模かつ複雑な電力システムモデルをシミュレーション用計算機上で構築する。次に、再生可能エネルギーとして主に太陽光発電システムを想定し、太陽光発電システムを導入した個々の需要家の挙動が電力システムへ及ぼす影響を評価するためのモデル構築を目的として、太陽光発電システムの発電量を、上記の電力システムモデルに組み込む。その上で、大規模な電力システムに接続されたプレーヤ集合の挙動を模擬モデルの構築を目的として、需要家種別毎、季節毎のロードカーブを基にベースとしての電力需要パターンを作成し、電力潮流方程式に組み込む。これにより、再生可能エネルギーが導入された電力システムにおける電力品質劣化問題と、プ

レーヤによる制御問題を扱う解析モデルを構築する。

(2) プレーヤによる電力品質制御効果検証

(1)で作成した解析モデルに対し、パワーコンディショニングシステムや蓄電池といった需要家所有の可制御負荷の制御量を決定変数として、電力品質の最適化問題の定式化を実施する。得られた最適解に基づき、(1)で作成したモデルを用いた数値シミュレーションを実施し、需要家をプレーヤとして扱った場合における電力品質改善量について検討を行う。

(3) プレーヤの利己的な行動の影響評価

需要家の利己的な行動を記述する意思決定モデルを構築する。定式化した意思決定問題の解として得られるプレーヤの挙動に基づいて、電力システム解析モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、電力品質改善量について評価を行う。再生可能エネルギーの導入量や導入分布に対して複数のシナリオを想定し、各ケースにおける電力品質について評価を行う。これから得られた結果に基づき、電力品質を向上させる電力システムの最適制御形態について検討を行う。

(4) 電力品質制御システムの構築とその検証

(1)(2)(3)で得られた知見に基づき、再生可能エネルギーが導入された電力システムにおける電力品質制御システムを構築する。具体的には、電力品質制御とプレーヤ利益の向上という複数の目的を考慮したシステムを構築し、数値シミュレーションによりその有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 大規模電力システムモデルの構築

再生可能エネルギーおよび需要家を含む配電系統が多数接続された大規模電力システムにおける電力品質の振る舞いを分析可能なモデル構築を目的とし、需要家の連系箇所や需要家種別、季節や時刻依存性等の諸特性を考慮した上で解析用の大規模電力システムモデルを計算機上に構築した。構築した解析用大規模電力システムモデルを図1に示す。

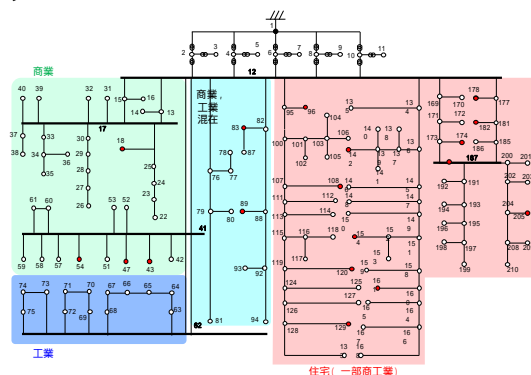


図1 大規模システムモデル

(2)最適化問題の定式化

電力品質として重要と考えられる電圧に着目し、太陽光発電システムの導入により変動する電圧を管理するための、プレーヤ所有の可制御負荷を用いた電圧制御に関する最適化問題の定式化を行った。最適化問題の定式化にあたっては、電力システムの階層構造に起因する大規模問題となることが懸念されたため、解探索時の探索時間の低減等の実用性を考慮した定式化および解法を提案し、数値シミュレーションにより、提案手法が電圧変動を抑制可能であることを確認した[学会発表 15]。

(3)プレーヤの意思決定モデルの定式化

電力システムに連系されたプレーヤの振る舞いを分析するためには、電力システムモデル上での需要家の行動を表現する意思決定モデルが必要である。そこで、プレーヤの意思決定を、利益最大化といった利己的な行動を表現可能なモデルに落とし込むことで模擬し、プレーヤの行動が電力品質に及ぼす影響について分析を行うための枠組みを構築した。そして、需要家の行動を模擬した数値シミュレーションを複数のシナリオの下で実施し、需要家の挙動が電力品質に及ぼす影響を定量的に評価した[学会発表 14]。その結果、再生可能エネルギーの導入状況や需要家種別の地理的分布といった諸条件に応じて、電力システムにおける電力品質がどのように推移するかについての知見を得た。これにより、将来的に顕在化し得る問題点を具体化したとともに、需要家を電力品質制御のためのプレーヤとして用いることの効果と、有効性が期待される条件を明らかにした。

(4) 電力品質制御システムの構築

システム構築

これまでに得られた成果より、需要家を電力品質制御におけるプレーヤとして取り扱うにあたり、プレーヤが電力品質制御に協力する合理性が存在する制御システムの構築が重要であると結論付け、電力品質とプレーヤ間の不公平性の改善という複数の目標を達成するための最適化問題を定式化した[学会発表 5, 6]。最適化においては、電力システムを持つインフラ特有の性質を考慮し、低コストで実現可能なシステムを考案しており、実現性の観点から効果的であると判断できる。

システムの発展と改良

需要家が所有する太陽光発電システムにより生じている電圧変動量に着目し、この電圧変動量を用いた公平な電圧品質制御システムを提案した[雑誌論文 1]。提案システムは、配電システムが常時は放射状で運用されていることを利用し、需要家が別の需要家の受電点電圧に及ぼす電圧変動量から相対的な電圧変動量(電圧変動影響度: VVI)を算出し、

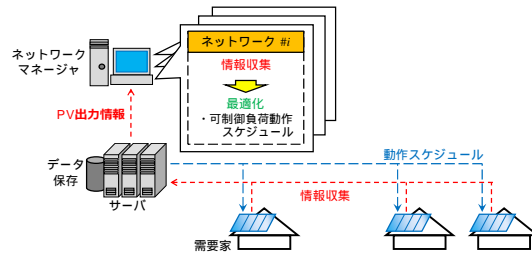


図2 提案システムの概要図

VVIの値に基づき配電システム全体の不公平性指標を演算する。そして、この不公平性指標を最小化する需要家所有の可制御機器制御量を求め、需要家へ可制御負荷の動作要請を行う。提案システムの利点は、電力品質制御に需要家所有の可制御負荷を単に使用するというのではなく、公平性を定量化する新たな指標 VVI を用いることで、需要家が電力品質制御に協力するための合理性を定量的に与える点である。この電力品質制御システムは、VVI の算出と可制御負荷の動作に双方向通信網を利用する。双方向通信網の使用自体は非現実的な仮定とは言えないが、提案システムを実際に運用することを考えた場合、高速な通信網はコストの観点から望めない。また、可制御負荷の動作指令に対し、速やかに需要家が反応することも難しい。そこで、システム運用者が所有するサーバに、低速通信で収集したデータを蓄え、このデータに基づき VVI を算出する方式を採用した。また、可制御負荷の動作指令をリアルタイムで送信するのではなく、低速通信網を介して予め動作スケジュールを提示することで、需要家の反応に関する問題を解消することを可能にした。

定式化

で構築した電力品質制御システムを実際に運用するためには、収集した膨大なデータに基づき、可制御負荷の動作指令を制御周期内で求める必要がある。そこで、VVI の算出と最適化問題を線形計画問題として定式化した。ここで定式化した問題は凸であり、かつ連続の決定変数を持つ線形問題であるため、例え膨大な数の決定変数が存在していたとしても、商用ソルバにより高速に厳密解を求解することが可能である。以上のことから、実用性の観点からも、提案システムは有用性を持つことが期待できる。

数値シミュレーションによる検証

構築し、定式化により計算機上に実装した提案システムの有効性を、数値シミュレーションにより検証した。複数の需要家と太陽光発電システムが連系した配電システムモデルを用いた数値シミュレーションにより、提案システムが電圧を適正範囲内に制御することが可能であることを確認した。また、需要家間の不公平性が提案システムを用いること

で低減することを確認するとともに、配電系統に設置された電圧制御機器の動作回数が抑制されることで、より効率的に電圧を管理可能であることを確認した。

(5)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究では、需要家を電力品質制御のためのプレーヤとして扱った。国内外の類似研究では、電力システムの周波数制御に需要家側の応答を利用するデマンドレスポンスが活発に議論されている。電圧制御や管理に関しては、需要家が所有するパワーコンディショニングシステムや蓄電池、電気自動車、分散型電源を利用する類似研究が多い。一方で、これらの研究では需要家が協力する合理性が金銭的な面で評価されていることが多く、また、配電系統における太陽光発電システムの大量導入を扱っているものは国外では少ない。国内では、太陽光発電システムの導入により生じ得る電圧変動問題が活発に扱われているが、不公平性に着目した研究例は少ない。以上より、本研究で提案したシステムは、今後、太陽光発電システムが大量導入された場合において、必ずしも金銭的な価値だけでは議論できない問題に対し、公平性に基づいた示唆を与えるものであると考えられる。

(6)今後の展望

本研究では、需要家が電力品質制御に協力する動機として不公平性の尺度を提案したが、需要家が積極的に電圧制御に寄与するためのインセンティブとしては決して強いとは言えない。今後は、インセンティブの評価を目的として、協力ゲームとしての定式化を行い、電力システム全体で望ましいシステム形態について検討を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “太陽光発電システムが導入された配電系統における需要家の公平性を考慮した電圧管理手法に関する検討,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 61, No. 4, pp. 105-114 (2017) 査読有.
2. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “機会制約付き最適化問題における Fractile model を用いた市場価格変動リスクを考慮した小売業者の電力調達問題,” 電気学会論文誌 C, 136(5), pp. 732-745 (2016) 査読有, DOI: 10.1541/ieejieiss.136.732
3. Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, “Impact of retailer and consumer behavior on voltage in distribution network under liberalization of electricity retail market,” Electrical

Engineering in Japan, 194(4), pp. 27-41, (2016) 査読有, DOI: 10.1002/eej.22743

4. Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, “Electricity retail market model with flexible price settings and elastic price-based demand responses by consumers in distribution network,” International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 81, pp. 371-386, (2016) 査読有,

DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.02.029

5. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “配電ネットワークにおけるデマンドレスポンスを導入した電力市場モデルの分析,” 電気学会論文誌 C, 135(3), pp. 292-303 (2015) 査読有, DOI: 10.1541/ieejieiss.135.292

6. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力小売自由化における小売業者と需要家が配電系統電圧に及ぼす影響,” 電気学会論文誌 B, 134(11), pp. 917-929 (2014) 査読有, DOI: 10.1541/ieejpes.134.917

〔学会発表〕(計 22 件)

1. 植原 健太郎, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “需要家の応答を考慮した小売業者の電力取引戦略の解,” 平成 28 年度 (第 67 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016 年 10 月 22 日, 広島県東広島市 広島大学 東広島キャンパス

2. 田中 僚, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “時変データを考慮した配電系統構成多目的最適化に関する一検討,” 平成 28 年度 (第 67 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016 年 10 月 22 日, 広島県東広島市 広島大学 東広島キャンパス

3. 大石 竜平, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “家庭用機器群に対する需要家の選好学習型スマート HEMS の開発,” 2016 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2016 年 7 月 16 日, 広島県東広島市 広島大学 東広島キャンパス

4. 西山 翔悟, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “協力ゲームの枠組みに基づいた需給バランス維持に関する考察,” 2016 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2016 年 7 月 16 日, 広島県東広島市 広島大学 東広島キャンパス

5. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “太陽光発電システムが導入された配電系統における需要家の公平性を考慮した電圧管理手法に関する一検討,” 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016 年 5 月 25-27 日, 京都府京都市南区 京都テルサ

6. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “需要家間の電圧変動相互影響度をを用いた PV 導入時の配電系統電圧管理に関する一検討,” 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 3 月 16-18 日, 宮城県仙台市 東北大学 川内北キャンパス

7. Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, “An intelligent home

energy management system with classifier system,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), 6-7 Nov. 2015, Hiroshima, Japan.

8. Kentaro Uehara, Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, “A study for retailer’s risk hedge considering responses of consumers in electricity deregulation,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), 6-7 Nov. 2015, Hiroshima, Japan.

9. Ryo Tanaka, Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki and Tomohiro Hayashida, “The multiobjective optimization of distribution system management in deregulated electricity market,” 2015 IEEE 8th International Workshop on Computational Intelligence & Applications Proceedings (IWCIA 2015), 6-7 Nov. 2015, Hiroshima, Japan.

10. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “クラシファイアシステムを用いたユーザ行動学習型 HEMS,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会・2015 年秋季研究発表会, 2015 年 9 月 10-11 日, 福岡県北九州市 九州工業大学 戸畑キャンパス

11. Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, “Multiobjective Optimization of Distribution Network Management in Deregulated Electricity Market,” 23rd International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM2015), 2-7 Aug. 2015, Hamburg, Germany.

12. 田中 僚, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力小売全面自由化における配電系統構成多目的最適化,” 2015 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2015 年 7 月 18 日, 広島県広島市 広島市立大学

13. 植原 健太郎, 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力自由化における需要家の応答を考慮した小売業者のリスクヘッジに対する一検討,” 2015 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2015 年 7 月 18 日, 広島県広島市 広島市立大学

14. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力自由化と再生可能エネルギーの導入が進展した電力システムにおける電圧管理手法,” 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015 年 5 月 20-22 日, 大阪府大阪市 一般社団法人 中央電気倶楽部

15. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “送配電ネットワークの電力品質管理における需要家資源の割り当て問題,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会・2015 年春季研究発表会, 2015 年 3 月 26-27 日, 東京都新宿区神楽坂東京理科大学神楽坂キャンパス

16. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力自由化における配電系統構成多目的最適化,” 平成 27 年電気学会全国大会, 2015 年 3 月 24-26 日, 東京都世田谷区 東京都市大学 世田谷キャンパス

17. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “配電系統における電圧制御機器の整定値計画に対するデマンドレスポンスが及ぼす影響の評価,” 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2014 年 9 月 24-25 日, 大阪府堺市中央区 大阪府立大学 中百舌島キャンパス

18. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “デマンドレスポンスを活用した電力自由化における PV 導入時の配電系統電圧管理に関する基礎検討,” 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2014 年 9 月 10-12 日, 京都府京田辺市 同志社大学 京田辺キャンパス

19. 関崎 真也, 林田 智弘, 西崎 一郎, “消費者のデマンドレスポンスを考慮した小売業者の先渡取引を含む電力調達問題,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会・2014 年秋季研究発表会, 2014 年 8 月 28-29 日, 北海道札幌市 北海道科学大学

20. Shinya Sekizaki and Ichiro Nishizaki, “Impact of demand response on voltage in distribution network with photovoltaic generations,” Grand Renewable Energy 2014, 27 Jul.-1 Aug. 2014, Tokyo, Japan (2014).

21. Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, “Evaluation of demand response in liberalized electricity market at distribution network level for power system management,” Energy Systems Conference, 24-25 Jun. 2014, London, UK.

22. 関崎 真也, 西崎 一郎, 林田 智弘, “電力自由化に向けたデマンドレスポンスを活用した配電系統管理手法,” 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014 年 5 月 21-23 日, 京都府京都市南区 京都テルサ

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.hil.hiroshima-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関崎 真也 (SEKIZAKI SHINYA)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：70724897

(4) 研究協力者

西崎 一郎 (NISHIZAKI ICHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：80231504
林田 智弘 (HAYASHIDA TOMOHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：20432685