

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Studies on Voltage Control for Distribution
Networks with Disconnecting/Connecting
Photovoltaic Systems

太陽光発電システムの並解列時における
配電系統電圧制御に関する研究

申 請 者

Shunsuke	KAWANO
河野	俊介

先進理工学専攻 電気・情報生命研究 A

2016 年 10 月

配電系統における電圧は、主に負荷時タップ切替変圧器（LRT: Load Ratio control Transformer）、高圧自動電圧調整器（SVR: Step Voltage Regulator）と呼ばれる電圧制御器の変圧比（以下、タップ位置）を適切に調整することで適正範囲内に管理されている。太陽光発電（以下、PV）の連系量が拡大した配電系統では、太陽光発電からの電力の逆潮流が配電系統内の電圧を上昇させるため、PVが系統に並列されている健全時においては、天候の変化によってPV出力が変動することによる電圧変動が生じ、電気事業法施行規則で規定されている適正電圧範囲の上下限値を逸脱する。一方、配電事故発生時においては、保安・保全の観点からPVが系統から一時的に一斉解列し、その後解列したPVが一斉に再並列される。PVが一斉解列した際には、電圧が降下することによって電圧下限値を逸脱し、PVが一斉再並列される際には、電圧が上昇し、電圧上限値を逸脱する。そのため、PVが連系された配電系統の電圧を適正範囲内に管理するためには、健全時ならびに事故時の双方に対応した電圧制御器の運用手法が不可欠である。

健全時においては、各制御器は2次側電圧・電流と個別に設定される電圧制御パラメータによって自動で自律的にタップ位置を制御するため、各電圧制御器の電圧制御パラメータを適切に設定することで電圧制御効果は向上する。これまでは、シミュレーションを実施し発見的手法を適用して電圧制御パラメータを決定する手法や過去の計測データを用いてシミュレーションを行わずに静的な代数計算から導出する手法が提案されているが、両手法とも電圧逸脱量の観点や、制御器の劣化軽減・長寿命化のためのタップ動作回数最小化の観点で最適性を保証していない。最適性を保証するためには全数探索する必要があるが、解候補となる組合せ数が膨大であるため、天文学的な計算時間を要する。また、PVが大量連系された配電系統では、天候によって最適な電圧制御パラメータが異なるが、天候に応じて電圧制御パラメータやタップ位置を決定する手法は提案されていない。

配電系統事故時においては、配電事故が発生した配電線では全ての開閉器を開放することで一時的に停電し、このタイミングでPVが一斉に解列するため、順次開閉器が再投入される際の系統電圧は事故前より低くなり、下限電圧を逸脱する。また、系統電圧が復帰した一定時間後に解列したPVは一斉に系統に再並列されるため、急激に電圧が上昇し上限逸脱をする。電圧制御パラメータに基づく電圧制御方式では、制御点電圧が不感帯を逸脱してから数十秒経過しないとタップ位置を変更できないため、開閉器を投入した際、もしくは太陽光発電が再連系された瞬間の電圧変動に対しては制御遅れとなり、電圧逸脱を回避できなくなるが、この事故復旧プロセス中の電圧制御手法の提案は未だなされていない。

本論文では、上述の課題を解決することで、PVが並列された健全時とPVが解列・再並列する事故時の電圧管理手法を提案する。具体的には、PV並列時において、電圧逸脱を回避する電圧制御パラメータ（実行可能電圧制御パラメータ）の中で、タップ動作回数を最小化する電圧制御パラメータを現実時間内に探索する

方法の提案，過去の各日の実行可能電圧制御パラメータを蓄積したデータベースと PV 出力予測から天候によって電圧制御パラメータを周期的に更新する手法の提案，事故時の PV 一斉解列・再並列の際の電圧変動を衛星観測日射量データからリアルタイムで推定し，PV が一斉解列もしくは一斉再並列する直前に電圧逸脱を回避できるタップ位置に各電圧制御器を制御する手法の提案を行い，PV が連系され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，提案する電圧管理手法の有効性を示す。

本論文は全 5 章で構成される。第 1 章は緒論であり，本論文の背景と目的を述べるとともに，本論文の構成を説明する。

第 2 章では，電圧逸脱を回避できる電圧制御パラメータを全列挙し，なおかつタップ切り替え回数を最小化する実行可能電圧制御パラメータを導出する手法を提案する。最適性を保証するためには，全数探索が必要であるが，解候補数は各制御器の 4 種類の電圧制御パラメータの組合せ数の制御器台数 n 乗で増えるため，シミュレーションを全解候補数回実施することによって全数探索するとなると天文学的な計算時間を要する。提案法では，電圧逸脱する解候補はシミュレーション中に電圧逸脱すると明らかになった段階で解候補から外すことで解候補数を削減し，さらに，時間断面ごとに各電圧制御器のタップ位置が決まると，各電圧制御器の 2 次側電圧・電流が一意に決まることから，タップ位置を上げる・維持する・下げる電圧制御パラメータの範囲を制御器毎に独立に計算することによって，制御器の台数 n が増えても計算量が n 乗で増加しないことで，解の最適性を保証しつつ，高速に最適解を導出することができる。本論文では，実測の太陽光発電出力データと LRT・SVR が連系された実配電システムモデルにおいて，提案法を用いて実行可能電圧制御パラメータを全列挙するのに要する時間を評価した。その結果，全数探索ではおよそ 1800 年要するのに対し，提案法は 8 時間程度でおよそ 7000 個の実行可能電圧制御パラメータを全列挙できることを明らかにした。さらに，実行可能電圧制御パラメータの中で，タップ切り替え回数を最小化する電圧制御パラメータで運用した場合，LRT・SVR のタップ切り替え回数はそれぞれ，6 回，0 回となることが明らかとなった。また，過去に提案されている，メタヒューリスティック手法である貪欲法をベースとした探索手法では 24 時間ほど探索したにもかかわらず，実行可能電圧制御パラメータを発見できずに局所解に陥ったことが確認され，LRT・SVR のタップ切り替え回数はそれぞれ，6 回，14 回であった。

第 3 章では，PV 出力予測を用い，天候に合わせて電圧制御器の電圧制御パラメータを，第 2 章の手法を活用して各日の全実行可能電圧制御パラメータが蓄積されたデータベースから選択することで，周期的に更新する手法を提案する。これまでの電圧制御パラメータ探索手法では，電圧逸脱しない電圧制御パラメータを 1 個発見することはできても，全列挙することはできないため，データベース

を構築できないという課題があった。提案する手法では、第2章の手法を活用して列挙した全実行可能電圧制御パラメータとPV予測波形のセットを日毎にデータベースに蓄積しておき、リアルタイムで得られるPV予測波形とデータベース上の過去のPV予測波形を比較し、リアルタイムのPV予測波形と類似日の中から共通する実行可能電圧制御パラメータを選択する。このことによって、似たようなPV発電予測をした日に共通して電圧逸脱を回避できる電圧制御パラメータを選択できる。本論文では1時間周期で電圧制御パラメータを選択し、各電圧制御器の電圧制御パラメータを更新することで、1日の中で天気が変わるような日の電圧管理にも対応する。実測の太陽光発電出力波形と配電システムモデルによる数値計算の結果、PV予測波形を使用せず、リアルタイムでセンサ内蔵開閉器の計測情報を活用して、逐次タップ位置を決定する手法と比較し、PV導入量が15%拡大する数値計算例を確認し、天候に合わせて電圧制御パラメータを更新することの有用性を示した。

第4章では、PVの一斉解列・再並列を伴う配電事故時復旧プロセス中において、リアルタイムで得られる衛星観測日射量情報からPV発電量を推定し、PVが解列もしくは再並列される際の電圧変動を計算することで、各電圧制御器のタップ位置をPVが解列もしくは再並列される直前に電圧逸脱を回避できるように制御する手法を提案する。提案する電圧制御手法では、リアルタイムで得られるひまわり7号の1kmメッシュの面的な日射量情報を活用し、各地点のPV出力を計算し、PVが解列・再並列される際の電圧値を、事故前のセンサ内蔵開閉器の電圧・電流情報と、PV発電量から潮流計算によって推定する。PVが解列・再並列される直前に、各電圧制御器のタップ位置の組合せを推定した電圧と電圧適正範囲までの最小電圧余裕量が最大となるタップ位置に制御する。実地図上の配電システムモデルにおいて、22回の配電事故ケースの数値シミュレーションを実施し、現状の電圧制御をしない配電自動化による事故復旧プロセスと提案する電圧制御手法を備えた事故復旧プロセスにおいて、電圧逸脱が発生する件数を比較した。その結果、現行の配電自動化による事故復旧では下限逸脱が22回中18回、上限逸脱が22回中21回発生したが、提案法では1回も電圧逸脱が発生しなかったことを確認し、事故復旧プロセス中の電圧制御手法の有効性を示した。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について言及する。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 河野 俊介 印

(2017年 1月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○ 1. <u>Shunsuke Kawano</u>, Yu Fujimoto, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Hideaki Takenaka, Hitoshi Irie, Takahi Y. Nakajima, “Voltage Control Method Utilizing Solar Radiation Data in High Spatial Resolution for Service Restoration in Distribution Networks with PV”, Journal of Energy Engineering, p. F4016003, Apr. 2016.</p> <p>2. Yuji Takenobu, Norihito Yasuda, <u>Shunsuke Kawano</u>, Yasuhiro Hayashi, and Shin-ichi Minato, “Evaluation of Annual Energy Loss Reduction Based on Reconfiguration Scheduling”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no. 99, pp. 1-1</p> <p>3. Yu Fujimoto, Hiroshi Kikusato, Shinya Yoshizawa, <u>Shunsuke Kawano</u>, Akira Yoshida, Shinji Wakao, Noboru Murata, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, and Yasuhiro Hayashi, “Distributed Energy Management for Comprehensive Utilization of Residential Photovoltaic Outputs”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no. 99, pp. 1-1</p> <p>4. Shinya Yoshizawa, Akira Yoshida, <u>Shunsuke Kawano</u>, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, and Yasuhiro Hayashi, “Evaluation of coordinated energy management system for grid and home in distribution system with PVs”, Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 126-133, Jun 2016</p> <p>○ 5. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, “Maximum PV Penetration Capacity Evaluation of a Novel Method for Determining LDC Control Parameters of Step Voltage Regulators”, International Journal of Electrical Energy, Vol. 3, No. 1, pp. 13-18, March 2015</p> <p>6. Inoue Takeru, Norihito Yasuda, <u>Shunsuke Kawano</u>, Yuji Takenobu, Shinichi Minato, Yasuhiro Hayashi, “Distribution network verification for secure restoration by enumerating all critical failures.” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 843-852, February 2015</p> <p>7. <u>河野俊介</u>, 林泰弘, 板屋伸彦, 高野富裕, 大野哲史, “低圧配電系統における高速電圧計算手法の開発と評価”, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 4, pp. 343-349, 2013年4月</p>
Proceedings	<p>1. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, and Yasuhiro Hayashi, “Method for Enumerating Feasible LDC parameters for OLTC and SVR in Distribution Networks”, Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, Prague, Czech Republic, June 2016</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>2. <u>Shunsuke Kawano</u>, Yu Fujimoto and Yasuhiro Hayashi, “Basic study for PV output estimation utilizing meteorological satellite solar radiation data and SCADA data”, Proc. of 2016 International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, Japan, July 2016</p> <p>3. Yuji Takenobu, <u>Shunsuke Kawano</u>, Yasuhiro Hayashi, Norihito Yasuda, Shin-ich Minato, “Maximizing Hosting Capacity of Distributed Generation by Network Reconfiguration in Distribution System”, Proc. of Power Systems Computation Conference 2016, Genoa, Italy, June 2016</p> <p>4. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, and Yasuhiro Hayashi, “Centralized Voltage Control Method using Voltage Forecasting by JIT Modeling in Distribution Networks”, Proc. of 2016 IEEE PES Transmission & Distribution, Dallas, USA, May 2016</p> <p>5. Shinya Yoshizawa, Akira Yoshida, <u>Shunsuke Kawano</u>, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, and Yasuhiro Hayashi, “Evaluation of Coordinated Energy Management System for Grid and Home in Distribution System with PVs,” Proc. of The International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, pp.1-6, July 2015</p> <p>6. <u>Shunsuke Kawano</u>, Yu Fujimoto, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Hideaki Takenaka, Hitoshi Irie and Takashi Nakajima, “Distribution Automation System for Service Restoration Involving Simultaneous Disconnection and Reconnection of Distributed Generators”, Proc. of 2015 IEEE PES PowerTech, Eindhoven, Netherland, ppl-6, June 2015</p> <p>7. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto and Yasuhiro Hayashi, “Method for Determining LDC Parameters of OLTC and Multiple SVRs in Distribution System by Using Database”, Proc. of International Youth Conference on Energy, Pisa, Italy, pp.1-6 , May 2015</p> <p>8. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, “The Basic Study for Development of a Method for Determining the LDC Parameters of LRT and SVR Using PV Output Forecasting”, Proc. IEEE PES 2015 Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington DC, USA, pp. 1-5, Feburary 2015</p> <p>9. <u>Shunsuke Kawano</u>, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto and Yasuhiro Hayashi , “Maximum PV Penetration Capacity Evaluation of a Novel Method for Determining LDC Control Parameters of Step Voltage Regulators”, Proc. of 2014 3rd International Conference on Power Science and Engineering, Barcelona, Spain, pp.1-7, December 2014</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	10. <u>Shunsuke Kawano</u> , Yu Fujimoto, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Hideaki Takenaka, Hitoshi Irie, and Takashi Y. Nakajima, “A Basic Study of Distribution Automation for Service Restoration in a Distribution System with Distributed Generators”, Proc. of International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, Kyoto, Japan, pp.1-2, November 2014
	11. <u>Shunsuke Kawano</u> , Yasuhiro Hayashi, Nobuhiko Itaya, Tomihiro Takano, and Tetsufumi Ono, “The basic study for Accelerating a Voltage Calculation Method for high- and low-voltage Distribution System”, Proc. of 2014 International Conference on Electrical Engineering, Jeju, Korea, pp.1-6, June 2014
	1. <u>河野俊介</u> , 林泰弘, 高野富裕, 板屋伸彦, “センサ内蔵開閉器とスマートメータの取得情報を用いた柱上変圧器の接続相推定に関する基礎研究”, 平成 28 年電力・エネルギー部門大会, 福岡, 2016 年 9 月
	2. 金子曜久, <u>河野俊介</u> , 伊藤雅一, 林 泰弘, 小池 健, 山本享慶, 伊藤隆治, “潮流力率を考慮した連立方程式による分散型電源大量導入に対応した LDC 制御パラメータ決定手法”, 平成 28 年電力・エネルギー部門大会, 福岡, 2016 年 9 月
	3. 竹延祐二, 安田宜仁, <u>河野俊介</u> , 湊 真一, 林 泰弘, “ZDD ベクタを用いた運用制約付き分散型電源連系可能容量最適化”, 平成 28 年電力・エネルギー部門大会, 福岡, 2016 年 9 月
	4. 竹延祐二, <u>河野俊介</u> , 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, “大規模配電網における分散型電源連系可能最大容量の厳密解法”, 平成 28 年電気学会全国大会, 宮城, 2016 年 3 月
	5. 安田宜仁, 竹延祐二, <u>河野俊介</u> , 林 泰弘, 湊 真一, “網羅的な実行可能構成の列举に基づく年間配電エネルギー損失最小化”, 平成 27 年電力・エネルギー部門大会, 愛知, 2015 年 8 月
	6. 竹延祐二, 安田宜仁, <u>河野俊介</u> , 湊 真一, 林 泰弘, “系統構成を考慮した分散型電源の連系可能最大容量の決定手法”, 平成 27 年電力・エネルギー部門大会, 愛知, 2015 年 8 月
	7. 竹延祐二, <u>河野俊介</u> , 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, “分枝限定法を用いた系統構成切替による年間の配電損失最小化手法”, 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月
	8. 芳澤信哉, <u>河野俊介</u> , 吉田彬, 藤本悠, 村田昇, 若尾真治, 田辺新一, 天野嘉春, 林泰弘, “予測・運用・制御の一貫した GEMS の電圧制御と HEMS の電熱運用手法との協調 EMS 手法の評価,” 平成 26 年電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月
	その他 13 件