

博士論文概要

論文題目

太陽光発電連系配電系統における
健全時と事故復旧時の電圧管理手法の研究

Study on Voltage Management Methods
in Distribution Systems with Photovoltaics
under Normal and Fault Restoration Conditions

申請者

芳澤	信哉
Shinya	YOSHIZAWA

電気・情報生命専攻 先進電気エネルギーシステム研究

2015年10月

近年、我が国では再生可能エネルギー固定買取価格制度の施行などを背景として、太陽光発電などの再生可能エネルギー電源が配電系統に大量に導入され始めており、今後も導入量は増大することが想定される。

現在の配電系統では、全ての需要家の受電電圧が電気事業法施行規則で制定される適正電圧範囲を逸脱することのないように負荷時タップ切替変圧器（LRT：Load Ratio control Transformer）、ステップ式自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）などの配電系統電圧制御機器を用いた電圧制御が行われており、配電線路亘長が長い場合には、単一の配電線に複数台の電圧制御機器を設置して電圧降下を補償している。現在の電圧制御手法には、電圧値や電流値などの自端情報に基づき、個々に設定されている電圧制御パラメータに応じた自律分散型制御が採用されているが、配電線の電圧が電源側から需要家側へ単調に減少することを前提としているため、太陽光発電など再生可能エネルギー電源からの逆潮流に起因する配電線の電圧上昇や発電電力の変動に伴う急峻な電圧変動に対して、適正電圧範囲からの逸脱が生じ、電力品質を確保できない可能性がある。そこで、現在、太陽光発電などの急峻な出力変動による適正電圧範囲からの電圧逸脱に対応できる次世代電圧制御機器の導入、通信設備の配備、配電線路の電圧、電流、力率等を計測するセンサを内蔵した開閉器（以下、センサ内蔵開閉器）の導入が進められている。次世代電圧制御機器は遠隔整定機能を有しており、季節性・時間帯ごとに適した電圧制御パラメータの設定が可能であり、また、次世代電圧制御手法として、センサ内蔵開閉器にてオンラインで計測する電圧値に基づいて詳細に系統を監視し、適切な電圧管理を行う集中型電圧制御手法が期待されている。

しかしながら、複数台の電圧制御機器が同一の配電線内に設置された際の電圧管理、配電系統の事故復旧時における電圧管理、センサ計測電圧値が改ざんされた場合の電圧管理など、配電系統の電圧管理を行なう上で解決すべき課題が依然として存在する。複数台の電圧制御機器が多段に設置された場合には、太陽光発電出力に依存した急峻な電圧変動により、適正電圧の維持が困難となるだけでなく、タップ動作回数が増加することで電圧制御機器の摩耗劣化・短寿命化が懸念される。配電系統の事故復旧時には、適正電圧範囲からの電圧逸脱量の削減だけでなく、電圧逸脱の発生する需要家数の削減が重要であるが、これまで配電系統の事故復旧時に対応する多目的な電圧制御手法は提案されていない。また、通信設備を活用する集中型電圧制御手法において、計測電圧値が改ざんされるなどのサイバーセキュリティの評価も成されていない。

本論文では、上述した課題を解決するため、センサ内蔵開閉器ならびに通信設備が整備され、太陽光発電が大量導入された配電系統において、電圧制御機器が多段設置された配電系統における高度化した自律分散型電圧制御手法の提案、健

全時と事故復旧時の双方に対応可能な集中型電圧制御手法の提案，センサ内蔵開閉器の計測電圧値の改ざん検知手法の提案を行い，太陽光発電が大量導入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検証した。

本論文は全5章で構成される。第1章は序論であり，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，健全時の電圧制御手法として，複数台の電圧制御機器が配電線に多段設置された配電システムにおける最適な自律分散型電圧制御手法を提案した。多段設置された電圧制御機器は各々が独立して制御するため，太陽光発電出力の変動による急峻な電圧変動が生じた際には適正電圧の維持が困難となるだけでなく，電圧制御に偏りが生じ，タップ動作回数が増加するという課題があった。そのため，導入が進められている次世代電圧制御機器を対象とし，遠隔整定機能を活用して，動的に時間帯ごとに適した電圧制御パラメータに更新し，配電システムでの電圧逸脱量と電圧制御機器のタップ動作回数の削減，ならびにタップ動作回数の均平化を可能とする電圧管理手法を提案した。その際，動的更新する電圧制御パラメータ決定にはヒューリスティックアルゴリズムである貪欲法をベースとした探索手法を用いている。貪欲法を用いる探索手法は他の最適化手法と比較して探索に要するパラメータが少なく，電圧制御機器の増加や開閉器の状態遷移などのシステム構成の変化に容易に対応できることが特徴であり，また，近傍探索を繰り返すことにより，膨大な電圧制御パラメータの組合せの中から局所最適な電圧制御パラメータを高速に決定できるため，実用的な手法である。しかし，貪欲法による探索結果は初期値に依存し，電圧逸脱を回避できない局所解に収束する可能性があるため，提案手法では，一定回数の探索を終えた際に電圧逸脱を回避できないと判断した場合のみ，電圧制御パラメータの探索範囲の絞込みと移動を行い，大域的最適解を得られやすいように対策を講じた。本研究では，太陽光発電が大量導入された配電システムモデルにおいて提案する電圧制御手法と従来の電圧制御手法を適用した際の電圧制御結果の比較を行い，提案手法の検証を行った。年間の実測太陽光発電データの中から出力変動が激しい60日間の曇天日の太陽光発電データを抽出した数値計算を実施し，全ての日で電圧逸脱を解消でき，平均タップ動作回数を約28%削減できることを明らかにした。

第3章では，配電システム事故として最も電圧管理が困難となるバンク事故を想定し，健全時とバンク事故復旧時に対応した電圧制御機器の集中型電圧制御手法を提案した。これまでの集中型電圧制御手法では，電圧制御機器のタップ切替を決定する電圧制御指標として電圧逸脱量のみを考えた単目的なものであったため，

バンク事故復旧時のような電圧逸脱が生じやすい場合には事故復旧配電線の電圧逸脱が他の複数の配電線に波及してしまい、電圧逸脱量は削減できるが、電圧逸脱が発生する需要家数が増加してしまう恐れがあった。面的に広がる配電系統に存在する多様な需要家に対する電力品質を確保するためには、電圧逸脱量だけでなく、電圧逸脱需要家数の削減も必要である。そこで、電圧制御指標に電圧逸脱需要家数を取り入れ、また、バンク事故発生時の電圧逸脱量を増加させない制約を設けることで、電圧逸脱量と電圧逸脱需要家数の双方を削減可能とする多目的な電圧制御手法を提案した。ここでは、配電系統モデル上にて健全時からバンク事故復旧時への系統切替を踏まえた数値計算を実施し、まず、健全時において提案する電圧制御手法と現行の電圧制御手法との比較を行い、電圧逸脱量の観点で有効であることを示した。次に、健全時からバンク事故復旧時に及ぶ数値計算において、季節性や太陽光発電の導入率などの様々な条件のもと、電圧逸脱量のみを考慮する単目的な集中型電圧制御手法との比較により、提案手法を用いることで電圧逸脱需要家数を約 59%削減でき、他配電線への電圧逸脱の波及を防止できることを明らかにした。

第 4 章では、センサ内蔵開閉器の計測情報を活用した集中型電圧制御手法において、配電系統電圧制御のサイバーセキュリティの観点から、計測電圧値の改ざん検知手法を提案した。計測情報を活用する集中型電圧制御手法の場合、センサ計測電圧値が改ざんされた場合に電圧制御機器が誤動作し、適正電圧範囲からの電圧逸脱が発生する可能性があるため、電圧管理上のサイバーセキュリティを向上させる必要がある。そこで、計測電圧値の改ざんが配電系統の電圧制御に与える影響を評価し、健全時の電圧の振る舞いや過去の計測情報に基づいた計測電圧値の改ざんの検知手法を提案した。提案する改ざん検知手法は計測電圧値の改ざんによるタップ切替の抑制、強制的なタップ切替といった電圧制御機器の誤動作を最大限に防止し、適正電圧範囲からの電圧逸脱の発生を回避することを目的としている。本研究では、提案する検知手法に検知されることなく電圧制御機器の誤動作を引き起こす改ざんの可能性を考え、太陽光発電が大量導入された実配電系統モデルを用いて、改ざんされるセンサ内蔵開閉器数と改ざんに伴う電圧逸脱量、ならびに太陽光発電の発電量との関係を定量的に評価した。その結果、改ざんされるセンサ内蔵開閉器数が一定数以下であれば提案手法による計測電圧値の改ざんを検知可能であることを明らかにした。

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

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 芳澤 信哉 印

(2015年 10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. Y. Isozaki, <u>S. Yoshizawa</u>, Y. Fujimoto, H. Ishii, I. Ono, T. Onoda, Y. Hayashi, “Detection of Cyber Attacks Against Voltage Control in Distribution Power Grids with PVs,” IEEE Transactions on Smart Grid (掲載決定)</p> <p>○ 2. 芳澤信哉, 山本祐也, 林 泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「多段設置された次世代 SVR の最適整定値の動的更新手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.9, pp.550-558, 2015年9月.</p> <p>○ 3. Y. Yamamoto, <u>S. Yoshizawa</u>, J. Yoshinaga, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigeto, and, H. Nomura, ” Effectiveness of optimization updating the control parameters of advanced SVRs , ” Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol.5, no. 1, pp. 12- 17, Mar. 2015.</p> <p>○ 4. 芳澤信哉, 林泰弘, 辻祐毅, 神谷英志, 「バンク事故復旧対応型 LRT・SVR 協調電圧制御手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.133, No.4, pp.333-342, 2013年4月.</p>
講演 国際会議 全件査読 あり	<p>1. Y. Isozaki, <u>S. Yoshizawa</u>, Y. Fujimoto, H. Ishii, I. Ono, T. Onoda, and, Y. Hayashi, “On detection of cyber attacks against voltage control in distribution power grids,” Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp.842- 847, Nov. 2014.</p> <p>2. <u>S. Yoshizawa</u>, Y. Yamamoto, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigeto, and, H. Nomura, “Advanced Voltage Control Method of Multiple Step Voltage Regulators in Distribution Feeder,” The 6th International Conference on Renewable and Distributed Energy Resources (IREN 2014), Nov. 2014.</p> <p>3. <u>S. Yoshizawa</u>, Y. Yamamoto, J. Yoshinaga, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigetou, and, H. Nomura, “Voltage Control of Multiple Step Voltage Regulators by Renewing Control Parameters,” Proc. Power Systems Computation Conference (PSCC), pp.1- 7, Aug. 2014.</p> <p>4. Y. Yamamoto, <u>S. Yoshizawa</u>, J. Yoshinaga, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigeto, and, H. Nomura, “Effectiveness of Optimization Updating the Control Parameters of Advanced SVRs,” Proc. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.887-892, Jul. 2014.</p> <p>5. Y. Yamamoto, <u>S. Yoshizawa</u>, J. Yoshinaga, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigetou, and, H. Nomura, “Verification of efficiency of searching methods determining optimal control parameters of advanced SVRs,” Proc. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), pp.1076-1082, May. 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）
国内会議	6. <u>S. Yoshizawa</u> , Y. Yamamoto, J. Yoshinaga, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigetou, and, H. Nomura, “Novel voltage control of multiple step voltage regulators in a distribution system,” Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp.1-5, Feb. 2014.
	7. <u>S. Yoshizawa</u> , Y. Hayashi, M. Tsuji, and, E. Kamiya, “Centralized voltage control method of load ratio control transformer and step voltage regulator for bank fault restoration,” Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), pp.1-7, Oct. 2012.
	8. <u>S. Yoshizawa</u> , Y. Hayashi, M. Tsuji, and, E. Kamiya, “Voltage Control Method of LRT and SVR in Distribution System with PV systems corresponding to Bank Fault Restoration,” Proc. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.8-13, Jul. 2012.
	9. <u>S. Yoshizawa</u> , Y. Hayashi, M. Tsuji, and, E. Kamiya, “Evaluation of Voltage Control Method in Distribution System with PV systems during Bank Fault Restoration,” Proc. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.1-6, Jul. 2011.
	1. 山本祐也, <u>芳澤信哉</u> , 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「次世代 SVR のパラメータ更新による配電系統の電圧制御最適化の基礎検討」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-14-092, PSE-14-092, pp.1-5, 2014.
	2. 磯崎保徳, <u>芳澤信哉</u> , 藤本悠, 石井秀明, 小野功, 小野田崇, 林泰弘, 「配電系統電圧制御におけるサイバー攻撃検知に関する考察」, 計測自動制御学会 第1回制御部門マルチシンポジウム, 2014.
	3. 山本祐也, <u>芳澤信哉</u> , 吉永淳, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「PV の出力変動に対応した次世代 SVR の最適整定値決定手法」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-13-131, PSE-13-147, pp.1-5, 2013.
	4. 山本祐也, <u>芳澤信哉</u> , 吉永淳, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「次世代 SVR の多段設置を想定した PV 連系系統の最適整定値決定手法」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.13-14, 2013.
	5. <u>芳澤信哉</u> , 山本祐也, 吉永淳, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「多段設置された SVR の最適整定値決定手法の評価」, 平成 25 年電気学会 全国大会講演論文集, pp.410-411, 2013.
	6. <u>芳澤信哉</u> , 林泰弘, 辻祐毅, 神谷英志, 「バンク事故復旧時における電圧逸脱軒数の最小化を目的とした電圧制御手法の評価」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-180, PSE-11-197, pp.1-5, 2011.

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）
その他 (講演)	7. 芳澤信哉, 林泰弘, 辻祐毅, 神谷英志, 「バンク事故復旧時における PV 連系配電系統の電圧逸脱軒数最小化を目的とした電圧制御」, 平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.31-32, 2011.
	8. 芳澤信哉, 林泰弘, 辻祐毅, 神谷英志, 「電圧逸脱軒数の最小化を目的としたバンク事故復旧時における電圧制御手法の評価」, 平成 23 年電気学会全国大会, pp.1-2, 2011.
	9. 芳澤信哉, 林泰弘, 森健二郎, 神谷英志, 「PV が導入された配電系統のバンク事故復旧時における電圧逸脱地域最小化手法」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-10-194, PSE-10-193, pp.1-5, 2010.
	1. S. Yoshizawa, A. Yoshida, S. Kawano, Y. Fujimoto, Y. Amano, and, Y. Hayashi, “Evaluation of Coordinated Energy Management System for Grid and Home in Distribution System with PVs,” Proc. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.1-6, Jul. 2015.
	2. S. Yoshizawa, H. Homma, Y. Fujimoto, S. Wakao, and, Y. Hayashi, “A Novel Grid Energy Management System in Distribution System with PVs,” Proc. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 949-953, Jul. 2014.
	3. 芳澤信哉, 河野俊介, 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」, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-14-080, PSE-14-080, pp.1-5, 2014.
	4. 芳澤信哉, 庄司智昭, 藤本悠, 天野嘉春, 田辺新一, 村田昇, 若尾真治, 林泰弘, 「PV 連系配電系統における GEMS の電圧制御と HEMS の宅内負荷機器制御との協調 EMS の基礎検討」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.13-14, 2014.
	5. 芳澤信哉, 本間隼人, 藤本悠, 若尾真治, 林泰弘, 「PV 予測を活用した Grid EMS の基礎検討」, 平成 26 年電気学会 全国大会講演論文集, pp. 362-363, 2014.
	6. 芳澤信哉, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, 「日中負荷シフトが配電系統の電圧制御機器のタップ制御に与える影響の評価」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.9-10, 2013.
	7. 芳澤信哉, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, 「GEMS と HEMS の統一モデルにおける協調制御の基礎検討」, 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 (SSI), pp. 557-560, 2013
	他, 国際会議 10 件, 国内会議 7 件.