

# 博士論文審査報告書

## 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

2016年 2月

近年、地球温暖化の防止やエネルギー自給率の向上などを目的として、太陽光発電等の再生可能エネルギー電源の配電システムへの導入が急速に進展している。配電システムに太陽光発電が大量に導入されると、太陽光発電設備からの逆流に起因する配電線の電圧上昇により、適正電圧範囲から電圧が逸脱し電力品質を確保できなくなるという電圧問題が生じる。この電圧問題への対策の一つとして、我が国では次世代電圧制御機器と配電線電圧等を計測するセンサを有したセンサ内蔵開閉器の導入、ならびに通信設備の配備が進められることから、これらの機器を活用した電圧管理手法の基礎研究が始まっている。ところが、配電線に複数台の電圧制御機器が多段設置される場合など、電圧管理に最適な電圧制御パラメータを体系的にどう決定するかの手法開発の課題が存在する。また、配電システムから電力供給を受ける需要家の電力品質を常に確保するためには、健全時だけでなく、配電システム事故復旧時にも対応可能な電圧制御手法の開発も必要となる。さらに、通信設備からの電圧計測情報を活用する電圧管理手法を開発する場合には、サイバーセキュリティの対策を組み込むことも必要となる。しかしながら、これらの課題を解決する太陽光発電連系配電システムの電圧管理手法は未だ確立されていない。

そこで、本論文では、電圧制御機器として負荷時タップ切替装置（LRT: Load Ratio control Transformer）とステップ式自動電圧調整器（SVR: Step Voltage Regulator）を対象とし、電圧制御機器が多段設置された配電システムにおける高度化電圧制御手法、健全時と配電事故復旧時の双方に対応する集中型電圧制御手法、センサ内蔵開閉器の計測電圧値の改ざん検知を組み込んだ電圧管理手法をそれぞれ提案し、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計算を通して、提案する電圧管理手法の有効性を示している。

本論文はその一連の成果をまとめたものであり、五つの章から構成されている。以下に、各章での研究成果の概要とその評価を示す。

第1章は序論であり、我が国の電力システムへの再生可能エネルギー電源の導入状況等を示すとともに、配電システム電圧管理の高度化に向けた取り組みとして、次世代電圧制御機器と従来の研究事例を示しながら課題を明確化し、本論文の位置づけを説明している。

第2章では、同一配電線に多段設置された複数台の次世代電圧制御機器の電圧制御手法を提案している。電圧制御機器が同一配電線内に多段で複数設置されている場合には、太陽光発電出力の時間変動による急峻な電圧変動に伴う複数電圧制御機器の同時制御の複雑性に加え、機器タップ動作回数の増加に伴う機械的要因による電圧制御機器の短寿命化が課題として存在する。これらの課題解決のために、複数の電圧制御機器の電圧制御パラメータ値を時間帯ごとに最良値に動的に一括更新する実用的な電圧管理手法を提案している。提案手法は、従来から専門家が経験的に使用している電圧制御パラメータ固定値を初期値として、離散の修正値を貪欲法で更新しながら、電圧制御機器間の最大電圧降下値・上昇値を利用して局所解からの脱出を行うとい

うシンプルな手続きにもとづくため、配電システムの管理者が受け入れやすく構成変化にも容易に対応可能な実用的手法となっている。また、電圧逸脱量と電圧制御機器のタップ動作回数の削減に加え、多段設置された電圧制御機器のタップ動作回数の偏りをなくし、均平化を可能としたことが特長となっている。ここでは、4台の次世代電圧制御機器が多段設置された実配電システムモデルを用いた数値計算にて、提案手法の有用性を検証している。数値計算では、曇天日 60 日の全ての評価期間において、従来手法を用いた際に発生していた電圧逸脱を提案手法によって回避でき、1台の次世代電圧制御機器のタップ動作回数を最大で約 70%削減、平均では約 28%削減できることを明らかにしており、提案手法の有効性が示されている点で評価できる。

第 3 章では、配電システムの事故復旧時も考慮した電圧管理手法として、配電システムの電圧逸脱量だけでなく、電圧逸脱需要家数をも削減可能な多目的な電圧制御手法を提案している。従来の電圧制御手法では電圧逸脱量のみを最小化を目的としていたため、システム事故復旧時に電圧逸脱量を削減できたとしても、電圧逸脱の生じる需要家数が逆に増加してしまう恐れがあった。そこで、提案する電圧制御手法では、配電システム内に設置したセンサ内蔵開閉器の計測情報をもとに、電圧逸脱量を増加させることなく、電圧逸脱需要家数を削減するように電圧制御機器を直接制御することによって、多目的な電圧制御を可能としている。提案手法の有用性を検証するために、健全時からバンク事故復旧時へのシステム切替を踏まえた数値計算を実施し、健全時には現行の電圧制御手法である LDC (Line Drop Compensator) 方式、バンク事故復旧時には電圧逸脱量のみを最小化する従来の電圧制御手法との比較を行っている。比較結果として、健全時においては、従来法である LDC 方式では太陽光発電の出力変動のない晴天時においても電圧逸脱が生じるが、提案手法では完全に電圧逸脱を回避できることを示している。一方、バンク事故復旧時には、重負荷期には、従来手法を用いた場合には配電用変電所下位のすべての配電線において電圧逸脱を生じさせてしまっているが、提案手法はわずかな高圧配電線数の局所的な部分にしか電圧逸脱を発生させておらず、電圧逸脱需要家数を最大で約 59%削減させることに成功している。また、軽負荷期には、従来手法で生じていた電圧逸脱を提案手法では完全に解消することができている。これらの結果から、電圧逸脱量を増加させずに電圧逸脱需要家数を最小化する提案手法が健全時とバンク事故復旧時の双方において有効であることを明らかにした点は評価に値する。

第 4 章では、過去の健全時の計測電圧値にもとづき、電圧範囲制約、電圧順序制約、電圧変動幅制約、電圧分布幅制約の 4 つの指標から判断されるセンサ計測電圧値の改ざん検知手法を提案している。センサ計測電圧値を用いる集中型電圧制御手法では、センサ計測電圧値が改ざんされた場合に電圧制御機器のタップ制御が抑制されてしまうなどの支障が生じ、適正電圧範囲からの電圧逸脱が発生してしまう恐れがある。しかしながら、配電システムの電圧

管理において、計測電圧値が改ざんされると電圧制御にどの程度の影響が生じるかなどのサイバーセキュリティ面での評価はこれまでなされていなかった。そこで、対象とする集中型電圧制御下において、センサ計測電圧値の改ざんにより適正電圧範囲からの電圧逸脱を引き起こす度合いを提案手法の適用により分析することで、電圧逸脱を引き起こすための必要条件を明確にしている。また、太陽光発電が導入された実配電システムモデルを用いた数値計算により、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の関係を定量的に評価し、改ざんされるセンサ内蔵開閉器数が2つ以下の場合には計測電圧値の改ざんを完全に検知できることを明らかにしている。さらに、改ざんされるセンサ内蔵開閉器数と太陽光発電の出力抑制との関係についても評価しており、センサ計測電圧値の改ざんが1つでもある場合には、改ざんのない健全時と比較して太陽光発電の発電出力が50%程度まで抑制されてしまう可能性があることを示している。サイバーセキュリティの観点から、計測電圧値の改ざんのレベルの違いにより、電圧管理にどの程度の影響を及ぼすのかを初めて定量的に明らかにしたことは高く評価できる。

第5章は結論であり、本論文での研究成果をまとめている。今後の展望として、近年の需要家側での次世代エネルギー機器の普及の情勢も踏まえ、配電システムに存在する太陽光発電の発電電力や需要家の消費電力の予測技術との融合、ならびに電力供給側の電圧制御機器と需要家側のエネルギー機器とが情報通信制御技術を介して協調した電圧管理手法の開発などが述べられており、本論文での提案手法が発展性に富むものであることが示されている。

以上を要約するに、本論文は、太陽光発電が大量導入された配電システムにおける様々な技術課題を解決するために、多段設置された電圧制御機器の電圧管理手法、配電システム事故復旧時における電圧管理手法、センサ内蔵開閉器の計測電圧値の改ざん検知手法を包含した電圧管理手法をそれぞれ提案し、数値計算を通じて提案手法の有効性を明らかにしたものである。本論文で得られた成果は、情報通信制御機器の配備が進む配電システムにおける次世代電圧管理手法の確立に資するものであり、再生可能エネルギー電源の導入拡大と電力の安定供給、電圧制御機器の長寿命化に貢献し、電気エネルギーシステム工学の発展に寄与するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2015年12月

審査員

(主査) 早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 林 泰弘  
早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 岩本 伸一  
早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 石山 敦士  
早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 若尾 真治