

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 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

2017 年 2 月

地球温暖化対策や持続可能な社会構築の観点から、太陽光発電システム（PV）の配電システムへの導入量が急増している。PV が大量導入された配電システムにおいては、PV の発電出力が天候により不規則に時間変動して配電線全体の電圧を大きく変動させる。PV が配電システムに並列されて発電電力が配電網に流れ込む健全時だけでなく、落雷などの配電線事故時に PV が保安のために一斉に解列した時や、事故復旧後に PV が再び一斉並列した時にも、配電線に設置された電圧制御機器である負荷時タップ切替変圧器（OLTC: On-Load Tap Changer）と高圧自動電圧調整器（SVR: Step Voltage Regulator）により、四種類の電圧制御パラメータを有する Line Drop Compensation（LDC）制御方式に基づき、配電網のすべての地点電圧を電力品質が確保可能な適正範囲内に自動制御しなければならない。ところが、大量の PV が配電システムに並列されて発電電力が配電網に流入する場合と、配電システムから PV を解列して PV の発電を停止する場合とで、それぞれ電圧制御面の課題が存在する。

PV が配電システムに並列されている健全時においては、従来研究では過去の PV 波形に基づき予め決定した電圧制御パラメータ値に固定して季節単位・年間単位で運用しているが、PV 大量導入時には晴天日と曇天日のどちらでも電圧逸脱を回避できる同一の電圧制御パラメータが存在しなくなる場合があるため、天候に合わせて適切な電圧制御パラメータを動的に更新していかなければならない。また、PV 予測波形には予測誤差が含まれるため、予測波形に対して最適化した電圧制御パラメータを使用しても電圧逸脱を引き起こす場合がある。しかしながら、これらの課題を解決するために、過去の PV 予測波形と制御パラメータとのデータセットを利活用しながら天候にあわせて電圧制御パラメータを動的に決定していく手法はこれまで提案されていない。

一方、配電線事故が発生した際には、保安の観点から PV がシステムから一時的に一斉解列し、事故復旧後に解列した PV が一斉に再並列されるため、短時間で電圧が急降下・急上昇する。従来の LDC 電圧制御方式では、変圧器タップ制御に数十秒の時間を有するため、電圧の急変に制御が間に合わず、電圧逸脱を回避できない場合がある。電圧を適正範囲内に保つには、電圧が急変する前にタップ位置を制御する必要があるが、PV の一斉解列と一斉再並列を伴うような配電線事故時の電圧制御手法の提案はこれまでなされていない。

本論文では、大量の PV が配電システムに並列されている健全時の課題を解決するための電圧制御手法として、過去の PV 出力予測波形と電圧逸脱回避可能なすべての電圧制御パラメータ群とをセットでデータベース化し、PV 予測波形に応じて最も電圧逸脱回避能力の高い電圧制御パラメータを動的に選択する手法を提案している。さらに、PV の一斉解列と一斉再並列を伴う配電線事故時の課題を解決するための電圧制御手法として、衛星観測日射量情報から PV の解列・再並列時の電圧変動を推定して変圧器タップ位置を制御する手法を提案している。提案する各電圧制御手法の有用性を検証するため、PV が大量連系された実規模配電システムモデルを用いた数値計算を実施している。

本論文はこれらの一連の成果をまとめたもので、全 5 章で構成されている。以下に各章での研究成果の概要と評価を示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的として、再生可能エネルギー電源の運用容量と認可容量の現状、先行研究の電圧制御方式について説明し、従来研究の課題点と本論文の位置づけを説明している。

第 2 章では、大量の PV の配電システムへの並列時において、電圧逸脱を回避可能な電圧制御パラメータ候補（実行可能解）を実用時間内に全て列挙する手法を提案している。全数探索では、解候補数が各制御機器の 4 種類の電圧制御パラメータの組合せ数に対する制御機器台数のべき乗となり、天文学的な計算時間がかかるという課題があった。提案手法では、電圧制御パラメータ値のある範囲での電圧制御結果は同一となる点に着目し、1 ステップ前の時間断面からの電圧制御機器のタップ位置の上げ・維持・下げの 3 つのそれぞれの制御動作を引き起こすような電圧制御パラメータ値の範囲を電圧制御機器毎に独立に算出させ、同一の電圧制御結果となる電圧制御パラメータ候補の集合（解候補群）を高速に列挙させることで、電圧逸脱のない全ての電圧制御パラメータ候補を実用時間内で高速に列挙可能にしている。実測の PV 波形と負荷波形と実配電システムモデルを用いた数値計算例において、従来手法であるメタヒューリスティック手法を用いた探索手法では 24 時間の探索時間で電圧逸脱を回避できる電圧制御パラメータを発見できなかったのに対し、提案手法では電圧逸脱回避可能な約 7000 個の電圧制御パラメータを探し出している。また、電圧制御機器 4 台が設置された配電システムモデルでの数値計算結果では、約 3.8 億年を要すると推定される従来計算と比較して、提案手法では約 1.5 時間という実用的な時間内で電圧逸脱回避可能なすべての電圧制御パラメータを列挙しており、提案手法の有用性を評価できる。

第 3 章では、配電システムへの大量の PV の並列時において、過去の PV 出力予測波形と電圧逸脱回避可能な電圧制御パラメータ群からなるデータベースを構築・活用し、天候によって動的に電圧制御パラメータを更新していく手法を提案している。PV 出力や負荷変動を事前に 100% の精度で予測できれば最適な電圧制御パラメータを選択できるが、予測には誤差が含まれるため、予測波形に対して最適化した電圧制御パラメータはリアルタイムの実波形に対しては最適ではなく、電圧逸脱を引き起こすという課題がある。そこで、提案手法では、第 2 章の提案手法を用いて高速列挙した電圧逸脱回避可能なすべての電圧制御パラメータ群と過去の PV 出力予測波形とを紐付して時間帯ごとにデータベースに予め蓄積しておき、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 予測波形と類似度が高い複数の過去時間断面の PV 予測波形にそれぞれ紐付いている実行可能な電圧制御パラメータ群の中から最も使用されているパラメータ値を選択して使用する。PV 実測波形と配電システムモデルによる数値計算では、PV 予測波形を使用せずにリアルタイムで電圧センサ計測情報を使用して

タップ位置を決定する従来電圧制御手法と比較し、提案手法では配電系統への PV 導入可能量が 15%も拡大しており、提案手法の電圧制御能力面からの有用性を評価できる。

第 4 章では、PV の一斉解列と一斉再並列を伴う配電線事故時において、衛星観測日射量情報から PV の解列時と再並列時の電圧変動を予め推定して変圧器タップ位置を制御する電圧制御手法を提案している。配電線事故時には、PV の一斉解列・一斉再並列によって、系統内の電圧が急降下・急上昇するため、電圧逸脱を回避するには、電圧が急変動する直前にタップ位置を適切な位置に制御しなければならない。提案手法では、事故復旧中の電圧を推定し、推定電圧値から電圧適正範囲の上下限值までの最小電圧余裕量が最大となるタップ位置に各電圧制御器のタップ位置を制御している。電圧変動の大きさは事故発生時の PV 発電量に依存するため、提案手法では、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、推定 PV 発電量をもとに PV 解列時と再並列時の電圧変動を推定している。実測の衛星観測日射量情報と実地図上の配電系統モデルを用いた数値計算結果では、現状の配電自動化システムによる事故復旧時には電圧逸脱が生じるのに対し、提案手法では電圧逸脱を回避できることを示しており、提案手法の電圧制御効果が評価できる。

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、3 章の手法に機械学習を導入することによる電圧制御効果の向上、2016 年に打ち上げられたひまわり 8 号と 9 号の衛星観測情報を活用した PV 出力や電圧の短周期予測技術との融合展開等が述べられており、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、配電系統への大量 PV の並列時と解列時での電圧制御上の技術的課題に対し、電圧逸脱を回避できる制御パラメータを実用時間内に全列挙する手法、PV 予測波形とデータベースから電圧逸脱回避能力が最も高い電圧制御パラメータを選定する手法、配電線事故時の PV 解列と再並列に対応した電圧制御手法を提案し、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、配電系統の次世代電圧制御手法の確立に資するものであり、PV の導入拡大と電力の安定供給に貢献し、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。

2017 年 1 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	博士（理学）	早稲田大学	朝日 透
	早稲田大学教授	博士（工学）	東京大学	石井 英雄
	早稲田大学教授	博士（工学）	東京大学	村田 昇