

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

PV出力変動に伴うSVR動作増加を低減する  
Volt-var制御を適用した配電線電圧制御の最適化に関する研究

Studies on Optimization of Voltage Control by Applying Volt-var  
Control Focusing on Decreasing SVR Operation Repetition  
with PV Output Fluctuations

申請者

山下 裕輔

Yusuke YAMASHITA

電気・情報生命専攻 先進電気エネルギーシステム研究

2023年7月

再生可能エネルギーの主力電源化に向け、太陽光発電（PV: Photovoltaic）の導入拡大が進む配電系統では、PVからの日射に応じて変動する逆潮流増加に伴う配電線潮流変化の複雑化とともに顕在化する電圧変動を低減し、適正電圧を維持する制御方式の確立は、PVの継続的な普及拡大のため不可欠である。配電線の電圧制御には、配電用自動電圧調整器（SVR: Step Voltage Regulator）のタップ切換制御と、静止型無効電力補償装置（SVC: Static Var Compensator）やPV用パワーコンディショナ（PCS: Power Conditioning System）の無効電力出力制御による方法がある。一般送配電事業者が一元的に管理を行うSVRのタップ切換およびSVC無効電力出力の組み合わせによる制御の最適化に関して、従来多くの検討がなされている。一方、今後導入が期待される需要家側の調整能力を積極活用して無効電力を提供するPVスマートインバータ機能と、SVRのタップ切換制御を組み合わせた配電線の電圧制御について、両者の電圧制御動作が互いに影響し合う効果を結びつけ全体としての効果を高める協調手法は未だ確立されていない。

本学位申請論文は、スマートインバータの代表的な電圧制御機能である Volt-Var 制御（インバータ連系点の電圧に応じて無効電力を出力することによる電圧制御機能）に着目し、高圧連系 PV に Volt-var 制御を適用し、SVR のタップ切換制御との相互の影響を適切に取り扱うことによって、電圧逸脱を起こさない範囲で SVR の寿命に直接的に関わる動作回数の抑制と、過剰な無効電力出力に起因する配電線損失増加の低減の両者を同時に達成する配電線の電圧制御手法を提案するものである。

以下、本学位申請論文における各章の研究成果と評価を記す。

第 1 章では、序論として、本論文の背景と目的が述べられている。

第 2 章では、配電系統への PV 普及が進むにしたがって顕著となる電圧変動課題を踏まえて、電圧変動を抑制するための手段として用いられる SVR のタップ切換制御と PCS の無効電力制御に関して整理するとともに、この両者の電圧制御負担バランスの適正化を図る考え方と、論文で提案する Volt-var 制御パラメータ決定手法の目的を述べている。論文の提案手法においては、PV 用 PCS として採用されるスマートインバータの Volt-var 制御の活用を想定し、オンライン通信を通じたパラメータ設定によって無効電力出力感度を柔軟に変更可能な調整能力を活用している。Volt-var 制御のみの電圧調整能力だけでなく、同時に、SVR のタップ切換動作を考慮する点が特徴である本提案手法の位置づけを述べている。

第 3 章では、第 2 章で述べられたスマートインバータの無効電力出力と SVR タップ切換制御の双方の動作の最適化を達成するため、提案手法において用いる目的関数や手順を説明している。スマートインバータから取得する出力計測値のオンライン実績データの活用を想定し、これを入力データとして潮流計算を行い、Volt-var 制御の曲線パラメータを逐次設定更新している。具体的な Volt-var 制御曲線の決定には、電圧逸脱制約の中での配電損失の最小化のほか、SVR タップ動作回数の最小化を目的関数に加えることで、Volt-var 制御と SVR 動作との協調を図っている。特に、PV 出力変動が激しく SVR の高頻度タップ切換が繰り返し発生する時間帯において、インバータの Volt-var 制御による電圧変動緩和効果のためタップ動作回数を削減でき、同時に Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加を極力削減する手法を具現化している。

第4章では、第3章で提案したSVRタップ動作を考慮するVolt-var曲線決定手法の基本動作とその有効性を確認するため、PVならびにSVRが存在する配電線モデルを用意し、提案手法適用ケースとその他電圧制御ケースを数値計算により比較検証している。9か月のPV出力実データ（1月～9月の計測値）を用いた連続期間の評価によると、電圧が適正範囲に抑えられる条件下で、力率95%一定制御ケースは、SVRのみによる電圧制御ケース基準で20%以上の損失増加、タップ動作回数が83%減となる。一方、提案のVolt-var制御手法は、配電損失が1%程度の少ない増加量に対して、タップ動作が55%削減される結果を示しており、提案手法の基本的な有効性を確認している。

第5章では、より詳細な配電システムモデルを用い、実際の運用に即した提案手法適用の評価を行っている。個別の詳細把握が困難となる低圧需要家のPVや負荷などの不確実性を考慮するとともに、高圧連系PVと低圧連系PVが混在するシステムにおいて高圧・低圧のPV比率の違いがどのように影響を与えるかについて、複数の観点から提案手法の有用性を検証している。PVインバータの無効電力制御方法の違いによる配電損失、SVRタップ動作回数、無効電力による電圧制御分担を指標に電圧の適正範囲維持のもと比較評価し、高圧PVへVolt-var制御を適用する提案手法ケースは、タップ動作削減回数あたりの配電損失増加の値が全評価ケースで改善される結果であり、Volt-var制御とタップ切換制御との電圧制御負担の適正化を図れることが示されている。このような検討は、今後懸念されるPVの大量導入によって生じる電圧変動問題の対策として重要な検討事項であるとともに、本論文で取り上げているように、配電システムに連系される高圧・低圧PVの容量比率によって、影響度合いが異なることを定量的に明らかにすることは、不確実性への対応の観点から重要なポイントであり、今後の国内配電システムの電圧制御に向けた指針になり得る検証がなされている。

第6章では結論として、研究の成果と、事業性に関連した今後の展望についてまとめている。

予備審査会および公聴会においては、本論文で利用・提案している電力システム工学の手法的な妥当性および得られた工学的知見の新規性の両面から厳密な審査が行われた。結果、本博士論文はこれらの審査プロセスを通して適切に改訂されている。

以上を総括すると、本論文は、導入拡大したPVの出力変動により発生するSVRタップ切換の繰り返し動作とPVインバータからの無効電力供出による配電損失増加の双方を低減するため、高圧連系PVによる無効電力出力制御を主対象としたスマートインバータのVolt-var制御パラメータを適切に決定する手法を提案し、数値実験を通じて提案手法の有用性を明らかにしたものである。Volt-var曲線の設定パラメータを不感帯上下限值などに限定したシンプルな手法としつつ、SVRタップ動作回数と配電損失をバランスよく低減できる実用的な手法を提案している。PV出力変動に起因して数分から数十分の時間オーダーにおいて繰り返し発生するSVRタップ切換動作と、配電損失増加の双方の低減に着目し、今後の活用が期待されるスマートインバータのVolt-var制御のパラメータ設定方法を具体的に示した成果は学術的に意義が高く、また、太陽光発電をはじめとした需要家リソースによる系統電圧調整力提供の実用化と、ひいてはさらなる再生可能エネルギーの拡大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。

2023 年 7 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 石山 敦士

---

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 若尾 真治

---

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 近藤 圭一郎

---

早稲田大学教授 博士(工学) 東京大学 石井 英雄

---

北海道大学准教授 博士(工学) 北海道大学 原 亮一

---