

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文概要

## 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5月

世界的な気候変動問題に対する脱炭素化への流れが一層強まる中、日本においても 2050 年カーボンニュートラルを実現すべく、2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの電源構成比率を現状の 18%から 2030 年に 36~38%へ拡大する方針目標が掲げられている。2012 年 7 月の固定価格買取制度導入以降、特に太陽光発電（PV：Photovoltaic）の導入が拡大している。PV は発電時に CO<sub>2</sub> を排出しないことや、分散電源として設置場所の制約が少ないなどのメリットがある一方、発電出力が天候に依存して変動する。そのため、PV 導入拡大に伴い、電力系統での余剰電力発生や周波数変動増大、電圧変動増大といった、電力の安定供給・電力の品質に及ぼす影響が問題視されている。特に、電圧変動に関する課題は、配電系統において PV が配電線末端付近で局所的かつ大規模に接続された場合に顕在化しやすくなる。カーボンニュートラル実現に向けて、現在よりも更に多くの PV が導入拡大される動向を踏まえると、雲の通過による PV 出力急変で高頻度に発生する電圧変動が顕著になり、法定の電圧維持範囲内に調整することが困難になると想定される。

配電系統において電圧変動を抑制する対策として実施されている、変圧器のタップ（変圧比）を切り換えることで変圧器二次側の送出し電圧を段階的に調整する負荷時タップ切換変圧器（LRT：Load Ratio control Transformer）、ステップ式電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）といった従来型電圧調整機器のタップ切換制御では、PV 出力変動による短周期かつ高頻度に発生する電圧変動の抑制維持が難しくなっている。タップ切換による電圧調整手段以外に、連続的な無効電力調整により電圧を安定化させる PV 用パワーコンディショナ（PCS）の力率一定制御運転の一律採用や、静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）による電圧制御方式がある。現行の力率一定制御は、PV 出力の逆潮流に起因する電圧上昇を防止する目的で、一律の力率設定値が適用されており、電圧上昇が問題にならないような PV 出力が小さい時間帯においても、発電出力に比例した無効電力が常に出力されるため、PV 導入量が大きいほど無効電力出力に伴う線路電流が増加し、結果として配電系統全体の線路損失増加の影響が大きくなると想定される。また、PV 出力が PCS 定格容量×力率値を上回る場合に、本来得られるはずの有効電力出力を抑制する動作が発生して発電機会損失につながる可能性が存在する。このような観点から、再生可能エネルギーの主力電源化に向けて将来的に PV 連系量が増加していくことを想定すると、力率一定制御のような一律設定値の運用ではなく、効率的な電圧制御方式や電圧管理の高度化が求められると考える。

本論文では、系統管理者が実施する SVR タップ切換制御による電圧維持に加え、需要家（発電事業者）側の設備を活用する PV 用 PCS の出力調整力利用の適正化を目的とする。そのための配電系統の電圧管理方法として、現在日本国内で採用

されている力率一定制御に代わり、より柔軟な PV 用 PCS の無効電力出力制御が可能となるスマートインバータ (S-INV: Smart Inverter) による Volt-var (電圧・無効電力) 制御機能に着目する。S-INV は、双方向通信機能ならびに系統周波数や電圧の安定化などに貢献するための系統サポート機能を有する PCS であり、米国や欧州ではグリッドコードへの要件化が進んでいる。日本国内では、通信システムを含む実用に向けた実証や Power Hardware-In-the-Loop (PHIL) によるテスト環境構築と実機検証が行われている。Volt-var 制御は、S-INV の系統サポート機能の一つで、連系点電圧入力に対する無効電力出力の特性曲線を定義するパラメータを設定することで、系統状況に応じて任意の無効電力出力制御特性を持たせることができる。そのため、適用先の配電線の状況に応じてどのようにして適切な制御パラメータを設定するかが重要になる。また、制御対象の S-INV の数が多い場合には、それら制御パラメータの管理が煩雑になり得ることが課題である。S-INV 活用に関する研究として、Volt-var 制御や Volt-Watt 制御のパラメータ設定方法、多数台の S-INV や複数系統サポート機能併用による効果を解析検証するためのシミュレーション手法などが検討されている。本論文で扱う S-INV の Volt-var 曲線決定手法に関連する国内外の先行研究では多くの場合、LRT や SVR のタップ位置が固定である条件下で、配電損失最小化を主な目的としてパラメータ決定する Volt-var 制御の最適化計算が行われており、タップ切換動作を制御する 90 リレー (電圧調整リレー) の要素が含まれておらず、SVR のタップ切換による段階的な電圧調整動作と Volt-var 制御による無効電力出力との電圧制御動作の対応づけに関しては、十分な検討がなされていない。そこで本論文では、Volt-var 制御を適用した配電線電圧制御を最適化する一手法として、Volt-var 制御による無効電力出力とタップ切換制御の双方の動作を考慮した曲線パラメータ決定手法を提案する。

本論文は全 6 章で構成され、第 1 章では本序論として、背景および目的と論文の内容について述べる。

第 2 章においては、PV をはじめとする分散電源の拡大、PV の短時間かつ急峻な出力変動が配電系統の電圧管理に及ぼす課題、そして S-INV の Volt-var 制御による無効電力出力と SVR によるタップ切換との双方の電圧制御動作の関係性について言及する。Volt-var 制御と SVR タップ切換制御との間の関係性を考えると、Volt-var 曲線の不感帯の選び方によって Volt-var 制御の無効電力制御感度が変化する。同時に Volt-var 制御による無効電力出力によってタップ切換動作感度にも影響を及ぼす。Volt-var 制御の電圧感度が高い場合は、無効電力が積極的に出力されることで電圧変動が抑えられ、タップ切換動作が減少するが、無効電力出力増加に伴う配電損失が増加する。一方、Volt-var 制御の電圧感度が低い場合は、無効電力出力が抑えられて配電損失の増加が抑制されるが、タップ切換の動作回数が増加するものと想定できる。このように、タップ切換と無効電力制御の

どちらが優先して動作するかにより、Volt-var 制御による配電損失増加量とタップ切替動作回数の間には、トレードオフの関係が想定できる。このような考え方を基に、本論文で考える Volt-var 制御と SVR タップ切替の双方の動作協調を図ることを説明する。

第 3 章においては、PV 出力変動に伴う SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 制御曲線決定手法を提案する。また、大きな電圧制御効果が得られる運用として、高圧配電線に連系される容量の大きいメガソーラー規模の PCS が S-INV 機能に対応した場合を想定し、この大規模な高圧連系 PV（高圧 PV）の調整力を活用した Volt-var 制御を対象にする。本提案手法は、配電損失のほか、タップ切替回数を目的関数に加えることで Volt-var 制御と SVR 動作との協調を図る。具体的には、Volt-var 制御による無効電力量と SVR タップ切替回数の関係に対応づけた曲線設定の最適判断指標として、Volt-var 制御の電圧感度を高める（＝不感帯幅を狭める）ことによる【(損失増加分) / (タップ切替削減回数)】を数値化する。潮流計算により、Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加とタップ動作回数を推定し、1 回あたりのタップ切替削減とともに生じる損失増加分を最小化する Volt-var 曲線を最適パラメータとして決定する。提案手法では、S-INV のモニタリング機能によって得られる高圧 PV 出力情報を基に、Volt-var 曲線を一定間隔周期で逐次更新する。これは、雲の通過頻度など時間帯により変化する PV 出力と電圧の変動様相に追従するためである。

第 4 章においては、第 3 章で提案の Volt-var 制御手法の確立のため、S-INV と SVR が導入される基礎的な配電線モデル上で、提案手法を適用した際の動作を検証している。数値計算により、複数の PV 変動パターンおよび Volt-var 制御提案手法とその他電圧維持対策とを比較することで、提案手法の有効性を確認した。結果として、力率一定制御ならびに Volt-var 制御の固定設定運用との比較により、Volt-var 制御曲線設定を逐次更新する提案手法では無効電力出力に伴う損失増を抑えつつ、より大きなタップ切替回数削減効果を得られることが確認できた。

第 5 章においては、第 4 章で反映されていない面的な広がりを持つ実配電線規模のモデルにおいて、高圧 PV および低圧 PV の両方が接続され、低圧需要家各軒の電力実測値を反映した詳細な数値計算を行い、低圧データを参照できない不確実性の影響など、より実際の配電線運用に即した提案手法の実現可能性を評価した。その結果、PV 導入割合によって高圧 PV 全体で出力可能な無効電力最大値が制限されるケースがあるものの、提案 Volt-var 制御手法を用いることで、タップ切り換え動作による無効電力出力量および損失の低減に寄与できることがわかった。加えて、低圧 PV の力率一定制御を行わないケースにおいても、高圧 PV の Volt-var 制御を主体とすることで、適正電圧を確保できる優位性が確認できた。

第 6 章においては、本論文をまとめるとともに、提案手法の実適用や事業性に関連した展望および今後の課題について述べる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山下 裕輔

印

(2023年 6月 29日 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	
○	1. 山下裕輔, 児玉安広, 林 泰弘, 村下直久, 「高低圧PV混在配電線のVolt-var制御による無効電力出力とSVR動作の適正化」, 電気学会論文誌B, Vol.143, No.5, pp.270-281, 2023年5月
○	2. 山下裕輔, 芳澤信哉, 児玉安広, 林 泰弘, 村下直久, 「PV出力変動に伴うSVR動作と配電損失増加を低減するVolt-var曲線決定手法」, 電気学会論文誌B, Vol.141, No.12, pp.763-772, 2021年12月
講演 国際会議	1. Yusuke Yamashita, Yasuhiro Kodama, Yasuhiro Hayashi and Naohisa Murashita, "Effective Reactive Power Reduction of Low-Voltage PV Inverters by Applying Volt-var Control Method to High-Voltage PV Smart Inverters," Proc. 10th IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia (ISGT-Asia), December 2021.
国内会議	1. 山下裕輔, 宮崎輝, 芳澤信哉, 林 泰弘, 村下直久, 「Volt-var制御の時間変化率設定にともなう電圧逸脱量の低減効果」, 令和2年 電気学会 電力・エネルギー部門大会, オンライン, 2020年9月
	2. 山下裕輔, 宮崎輝, 芳澤信哉, 林 泰弘, 村下直久, 「SVR設置配電系統へのVolt-var制御適用に関する基礎検討」, 令和元年 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 広島, 2019年9月
	3. 山下裕輔, 村下直久, 芳澤信哉, 宮崎輝, 林 泰弘, 「Volt-var制御の時間変化率変更による電圧制御効果への影響評価」, 平成31年 電気学会 全国大会, 北海道, 2019年3月