

称号及び氏名 博士（工学） 米澤 征司

学位授与の日付 2016年3月31日

論文名 「無効電力制御機器を用いた配電系統高度化に関する研究」

論文審査委員 主査 石亀 篤司

副査 森本 茂雄

副査 小西 啓治

論文要旨

2012年に実施された固定価格買取制度以降、太陽光発電が急速に普及している。太陽光発電は自然エネルギーを利用したクリーンなエネルギーであり、再生可能型社会の実現に必要な電源である。太陽光発電は1システム当たりの設備規模が小さく、一般家庭の屋根や、空き地等に敷設することが容易である。つまり、太陽光発電は他の自然エネルギーと比べて、配電系統に広く設置される電源である。一方、太陽光発電は、他の自然エネルギー同様、気象条件により出力が急峻に変化する特性を持つ。配電系統に太陽光発電が大量導入された場合に、太陽光発電の出力変化による影響で、配電系統の適正な運用が困難となることが懸念されている。

配電系統の運用は電気事業法により、電圧が適正に維持されることが定められている。現在の配電系統では電力の需要変化によって発生する電圧変動に対し、配電用変電所に設置される負荷時タップ切換変圧器(LRT : Load Ratio Control Transformer) や、需要変動が大きい線路途中に設置される自動電圧調整器(SVR : Step Voltage Regulator)といった、変圧比タップを機械的に操作することで電圧を変化させる自動タップ切換機能付き変圧器によって電圧が適正に維持されている。これは、日中の電力消費量や夜間の電力消費量に合わせて、数時間単位で電圧調整が必要であることや、莫大な数の配電系統が存在することから、配電系統では自動タップ切換変圧器による自動制御が広く用いられている。

しかし、太陽光発電の導入量が増加すると、天候によって変化する太陽光発電の出力変化も同様に増加する。太陽光発電の大量導入により、電圧の変化が今まで以上の速度や大きさで変化する。現在のタップ切換による電圧制御機器による運用では、太陽光発電によって引き起こされる電圧変動に対応することが難しい。また、タップ切換動作が大幅に増加することで、電圧制御機器の故障が増加することや寿命の低下等も懸念されている。

つまり、配電系統に太陽光発電やその他自然エネルギーが大量導入された場合においても、配電系統の安定した運用を行うことができる次世代配電系統が必要とされている。

そこで、無効電力制御機器(SVC : Static Var Compensator)を配電系統に導入し、系統全体の電圧の制御性能を飛躍的に向上させることで次世代配電系統を合理的に構築する検討を行った。

SVC は進相から遅相まで無効電力を高速かつ連続的に系統に供給することで高速な電圧制御が可能である。また、送電系統では電力系統の安定化や電力品質の向上に貢献している実績がある。この **SVC** を配電系統に導入することで、太陽光発電で発生する急峻な電圧変動の抑制や運用精度の向上が期待されている。

しかし、送電系統に設置される **SVC** の制御法をそのまま配電系統へ適用するには課題がある。配電系統と送電系統における大きな運用の違いとして、送電系統では集中制御で運用されており、設置される **SVC** も主に集中制御による運用が行われている。電気事業において送電系統はミッションクリティカルなシステムである。そのため、発電所から主要変電所に至るまで電圧や電流等のリアルタイムの情報により、一貫した集中制御がなされている。送電系統における **SVC** も送電線の運用の一部に取り入れられ、他に設置される電力用機器（電力用コンデンサ、分路リアクトル）の投入・解放、変圧器タップの操作と組み合わせることで、最適な運用が行われている。

一方、配電系統は送電系統に比べ、広範囲に敷設されることや、敷設される地域によって多種多様な設備形成がなされる。このため、集中制御ではなく動作協調が図られたタップ切換電圧制御機器の組み合わせにより自動的な運用がなされている。**SVC** を導入する場合、同様に動作協調を図った自動制御されることが望ましい。しかし、配電系統は敷設される地域によって多様な設備形成やタップ切換電圧制御機器による自動運用システムが既に出来上がっている。**SVC** はタップ切換電圧制御機器と比べると動作が速いことや、動作原理が違っていることが課題として挙げられる。つまり、既設の設備との動作協調を図る合理的な制御手法が求められている。

SVC を配電系統に設置する場合の運用手法に関する文献では、リアルタイム情報や通信線を用いた集中制御手法、小型の制御器を複数台設置し自動制御を行う手法等が提案されている。しかし、集中制御では新たなセンサーの設置や、高速通信線の敷設が必要となる。また、複数台の小型制御器を設置する方法では機器数増加による運用の煩雑化や保守費用の増加を招く恐れがある。どちらの手法も現状のシステムで広く実用化することは困難であることが予想される。一方フィルタを用いた手法の提案も行われているが、**SVC** 自体に周波数分離機能や多種多様な系統に合わせたパラメータの設定等運用の煩雑化や技術開発が必要となる。

本論文では、**SVC** の導入による配電系統の高度化に対して集中制御に依存しないかつ実用的な手法の検討を行う。具体的には、自動制御を行うことができる **SVC** の自動制御手法の提案と **SVC** の導入を考慮した既設制御器の制御高度化手法の提案を行い、その有用性を確認する。

第1章では、電力業界の現状を説明した上で、配電系統に太陽光発電が急速に普及していることを説明した。さらに太陽光発電の大量導入による現状のシステムの課題を挙げた。本論文が対象とする課題を明らかにし、その課題を解決しうる手法の提案を行った。

第2章では、電圧制御機器やその運用法、太陽光発電導入時の課題等に関して記述を行った。配電系統に設置される自動タップ切換変圧器による自動制御手法や太陽光発電の大量導入による課題、また無効電力制御機器の制御手法や配電系統に設置されることによる影響等に関して本論文を理解するのに必要な知識をまとめた。

第3章では、**SVC** の自動制御手法に関して検討を行った内容を記述している。自動的な運用がされている配電系統に対して **SVC** の自動制御を行うために移動平均手法を用いた自動制御手法を提案する。太陽光発電は時刻や天候に依存して時々刻々と出力が変化する。この変動に合わせて **SVC** を適切に運用しなければ、良い制御結果が得られないだけでなく、既設の電圧調整器の誤動作を引き起こすことが先行研究より明らかとなっている。この **SVC** の自動制御手法に関連する研究として、ある1日の負荷曲線に対して **SVC** の最適なパラメータを算出する手法、設定された不感帯を逸脱した場合に無効電力出力が **0** となるように制御をおこなう **SVC** の制御手法や、風車によるフリッカ雑音の抑制を対象にした **SVC** の制御手法等が提案されている。また **PCS** に着目し、**PCS** と通信を行い、**PCS** から太陽光発電の出力状況に応じた制御を行うことなども提案されている。しかし、これらの論文でさまざまな手法が提案されているものの、高速な通信線といったインフラの整備や **SVC** 自体に相互通信機能や周波数分離といった新たな機能の追加、運用の煩雑化を招くなど課題も多い。そこで、提案する移動平均手法を用いた自動制御手法では

実運用を考慮し、**SVC** の設定値の設定方法を **SVC** の自端電圧の移動平均により自動的に設定することで、時刻や天候に左右されない自動制御手法の提案を行い、その効果を検証した。

第4章では、既設制御器の制御高度化手法に関して検討を行った内容を記述している。**SVC** を設置することによって既設の制御機器の問題となる制御部分を明らかにし、その解決策として既設の制御機器のニューラルネットワークを用いた既設制御器の制御高度化手法を提案した。**SVC** と既設のタップ切換電圧制御機器を完全なる協調動作を図るためには既設のタップ切換電圧制御機器の制御手法を高度化する必要がある。というのも、**SVC** とタップ切換電圧制御機器との動作原理の違いにより、**SVC** が設置される場合はタップ切換電圧制御機器の動作に悪影響を与える。そこで本論文では、制御手法の本質である「タップ切換命令をどのタイミングで与えるかの指標を与える」という点、事業者が持つ過去から現在まで実際に運用を行ってきた知見や、運用記録等の経験を持っている点に着目し、既設制御器に広く採用されている線路電圧降下補償手法に代わるニューラルネットワークによる制御手法を提案した。ニューラルネットワークを用いることで、**SVC** 設置により影響を受けるパラメータを利用せずタップ動作を決定することができ、完全な協調が期待される手法を提案した。また、ニューラルネットワークを実運用に適用しやすく改良した手法や、ニューラルネットワークの追加学習による制御性能向上の検討等を行い、既設制御器の制御高度化手法の適用効果を検証した。

第5章では、配電系統高度化に関する研究成果を要約している。第3章で提案する **SVC** の制御手法と第4章で提案する既設制御器の制御高度化手法によって **SVC** の導入による配電系統の高度化に関する本論文がまとめられている。

審査結果の要旨

本論文は、地球環境問題を背景として太陽光発電が電力システムへ大量連系されることで顕在化すると予想される配電系統の電圧逸脱を解消するために、新たな無効電力制御機器を用いた配電系統高度化手法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 配電系統に太陽光発電が大量連系された場合に無効電力制御機器 (**SVC**) が設置された状況を考え、移動平均手法による **SVC** の自端制御手法の提案を行った。提案手法の有効性を検証するために、実系統を基にしたモデル系統2種類に対してシミュレーションを行った。その検討より、提案する移動平均手法を適用することで、晴天時では両モデルともに逸脱が減少する結果が得られた。また **SVC** 総出力が従来法と比べ削減されており、**SVC** を効率的に利用できていることを明らかにした。
- (2) 系統インピーダンスが変化しても適切に動作を行えるニューラルネットワークによる制御手法を提案した。階層型ニューラルネットワークに **TAP** 切換タイミングを記憶させることでインピーダンスに依存しない手法を構築した。実系統を基にしたモデルに対してシミュレーションを行った結果より、提案するニューラルネットワークを適用することで、従来の **LDC** 手法と比べて電圧逸脱の減少といった良好な結果を与える有効な手法であることを明らかにした。
- (3) 制御器がブラックボックスとなるため信頼性に欠けるというニューラルネットワーク手法の問題点を克服するために、**LDC** 手法の系統インピーダンスにあたる部分をニューラルネットワークに置き換えることで、従来手法との親和性が高くなる制御手法の提案を行った。重回帰分析等との比較検討より、タップ動作の減少など良好な性能を与える信頼性の高い制御手法であることを明らかにした。

(4) ニューラルネットワーク手法の追加学習に関して検討を行った。モデル系統に対して、過去の運用情報を基に学習を繰り返すシミュレーションを行い、逸脱電圧の減少や制御性能の向上が見込まれることを確認した。提案手法は、長期間運用することでより最適な制御結果に近づくことを明らかにした。

以上の諸成果は、再生可能エネルギーの大量連系を促進する頑強な次世代配電系統構築のための知見を与え、電力システムの信頼性向上に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。