

脱炭素化・電力自由化時代における電圧安定性を考慮した 電力システムの最適運用計画に関する研究

逢見 翔太

電圧安定性を考慮した最適運用計画決定手法に関する研究成果を本論文にまとめた。

第1章は導入として日本における脱炭素化と電力自由化をめぐる動向を整理した。脱炭素化に向けた再生可能エネルギー発電の普及と、電力自由化による電力システムへの経済メカニズムの導入が同時に進められており、電力システムの安定性と経済性を両立する運用計画手法が求められる。その上で、本研究では電圧安定性に着目し、電圧安定性を適切に評価する指標の分析・評価と、その指標を用いて電力システムの経済的な運用を実現するための最適運用計画手法を検討することを目的とした。

第2章では従来の電力システムの運用計画手法を踏まえて、脱炭素化・電力自由化時代における課題を整理した。従来は旧一般電気事業者による垂直一貫体制のもと、発電設備と送変電設備の建設計画は一体となって進められてきた。このため、運用計画では主に発電機の特性的みを考慮すればよかった。しかし、リードタイムの短い再生可能エネルギー発電の普及や、電力自由化に伴う市場原理の導入と広域的な運用により、電力システムの系統制約を考慮した上で、経済的な運用点を求める必要がある。

第3章では電圧安定性を考慮した最適運用計画手法に向けて、電圧安定性指標を比較・評価した。特に電圧安定性を評価する上では、運用点が電圧安定性の観点で安定であると保証できること、運用点から電圧崩壊点までの余裕を適切に示すことができること、の2点が重要となる。定性的な評価と、WSCC 9母線システムを用いた定量的評価に基づき、最適運用計画手法に好適と思われる指標として、Tangent Vector (TV) と Optimal-Power-Flow-based Direct Method with Complementarity Constraints (OPF-DM-CC)を抽出した。TVは電圧安定性を評価するうえで最もよく使われるP-Vカーブの勾配を表す指標であり、勾配が負の場合には安定運用点と示すことができる。OPF-DM-CCは安定運用点かどうかの判別はできないものの、運用点から電圧崩壊点までの余裕を表す電圧安定余裕を適切に示すことができる。

第4章ではTVを用いた最適運用計画手法を提案し、その有効性を数値的に検証した。TVにはLimit-induced Bifurcation (LIB)発生時において、電力システ

ムの安定性を過大評価してしまうという課題があった。これに対して本来の P-V カーブの軌跡に対する TV ではなく、電圧安定性に対して支配的な軌跡の TV を近似する Modified Tangent Vector (MTV) を提案し、最適運用計画手法に適用することとした。MTV を用いた Voltage-Stability-Constrained Optimal Power Flow (VSC-OPF)、Voltage-Stability-Constrained Single-Period Unit Commitment (VSC-SPUC) 共にその有効性を、4 母線系統や電気学会標準 WEST10-O/V 系統を用いた数値的な検証により確認することができた。ただし、MTV 自体が電圧安定余裕を直接的に表すわけではないため、MTV を用いた手法では MTV に対する制約値を別の手法で評価した電圧安定余裕に基づいて変更していく必要があった。このため、求解の過程において CPFLOW による演算が発生し、多時間断面を対象とする起動停止計画への適用は困難と判断した。

第 5 章では直接法である OPF-DM-CC を用いた最適運用計画手法を提案し、その有効性を数値的に評価した。OPF-DM-CC には相補性制約が含まれており、実行可能領域の形状が複雑であるため、収束性や大域最適性に課題があった。指標値を算出するための演算が収束しなければ、運用計画に適用することはできない。また、得られた解が大域的最適解でない場合は、電圧安定余裕を過小評価していることとなり、経済的な運用が損なわれる要因となる。そこで、ロングステップパス追跡法と電圧崩壊点の特性に基づいてロバストな計算手法を提案し、その有効性を IEEE 9 母線系統、30 母線系統、39 母線系統、300 母線系統、PEGASE 1354 母線系統、電気学会標準 WEST10-O/V 系統を用いた数値評価により検証した。検証の結果全ての条件において、提案手法によりロバストかつ正確に電圧安定余裕を算出できていることを確認できた。そこで、OPF-DM-CC を制約に含む VSC-OPF を実装・評価し、起動停止計画への応用が十分に可能であることを確認した。最後に、OPF-DM-CC を制約に含む Voltage-Stability-Constrained Unit Commitment (VSC-UC) をベンダーズ分解に基づいて求解する手法を提案し、IEEE 6 母線系統、電気学会標準 WEST10-O/V 系統における 24 時間断面を対象に起動停止計画を求めた。検証の結果、提案手法によって全ての時間において必要な電圧安定性を満足し、かつ、経済的なスケジュールを得られることを確認した。

以上を通して、電圧安定性を考慮した最適運用計画手法の提案と、その有効性を確認することができた。