

氏名	鈴木 亮平
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第173号
学位授与の日付	令和4年9月30日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	分散性または不確実性を有する Optimal Power Flow の 2レベル最適化手法に関する研究
論文審査委員	主査 教授 安田 恵一郎 委員 教授 須原 理彦 委員 准教授 相馬 隆郎 委員 教授 小塚 成一（千葉大学）

【論文の内容の要旨】

電力システムを安定にかつ効率的に運用するために、システム最適化の考え方が従来より取り入れられ、電力システムおよび電力設備の多くが集中定数回路による高精度のモデル化が可能であることから、数理モデルに基づく最適化問題の定式化と最適化手法の適用が行われてきた。たとえば電力システムの安定性や経済性の向上のために、最適潮流計算（Optimal Power Flow; OPF）が広く用いられている。OPFの最適化問題では、電力システムにおける発電機や負荷に対する有効電力・無効電力の節点ごとの需給バランス、およびそれらの節点間をつなぐ送電ネットワークが等式制約で表わされ、節点ごとの電圧制約や電源等の容量制約が不等式制約として課され、また送電損失や発電コストなどが目的関数として用いられる。本論文では、OPFに関する計算手法を対象とし、近年の電力システムにおいて直面、ないしは近い将来新たに惹起しうる課題のうち、そのいくつかを解決することを主眼としている。

従来の電力システムでは、特別高圧の基幹システムまたは地域システム（以降、これらを上位システムと称する）に連系された大容量の電源から、高圧ないしは低圧の配電システムに連系された需要家まで、電力が一方向に流れるような運用が行われてきた。これに対して近年では、需要家自体やそれに近接する配電システムにいわゆる分散電源が導入されるようになり、この傾向が将来にわたって拡大していく状況となっている。また電力システム改革や需給調整市場、容量市場の開設により、既存の送配電事業者や大口需要家に加え、多数の分散電源を保有・運用する新たな事業者、たとえば特定卸売供給事業者（アグリゲータ）やマイクログリッド事業者、配電ライセンス事業者などの参入が今後活発化する見込みである。

このような電力システムにおける設備・事業者の構成の変化により、多くの運用上の課題が提

起されている。たとえば、事業者が多数介在することによる意思決定の分散化の問題が挙げられる（以降、この特性を「分散性」と称する）。具体的には、上述した様々な事業者がそれぞれの目的のために分散電源を導入・運用することにより、電力品質や経済性がこれまでよりも低下する可能性がある。すなわち、需給調整市場の取引量の増加により、分散電源の発電量は今後増加すると見込まれるが、同時に分散電源が接続される配電系統の電圧逸脱や系統混雑化を助長する可能性がある。また配電系統の運用が複数の事業者により分割されることにより、円滑な運用が損なわれ、全体の運用コストの増加ならびに電気料金の高騰を招く可能性がある。これらの問題は互いに密接に関連していることから、どのようにして安定にかつ効率的に電力系統を運用していくかが課題となる。

また、配電系統に大量導入される分散電源の多くが自然エネルギー由来の間欠性の電源であることに起因する「不確実性」の問題もある。自然エネルギー由来の分散電源以外にも、たとえば電気自動車や自家発電設備も個人レベルの需要家の行動に大きく依存する電源のため、それらの不確実な出力変動に伴う配電系統の電力品質の低下などが懸念されている。

以上のような電力系統の運用上の課題に対して、システム最適化の導入と最適化手法の適用は重要な解決手段と考えられる。システム最適化の考え方を導入するにあたり、上述した分散性や不確実性を考慮した最適化問題は、意思決定が入れ子構造となる 2 レベル最適化問題として定式化することができる。具体的には、意思決定が分散化した場合には、元の最適化問題が意思決定者ごとのより規模の小さい複数の部分問題への分割と、それらを協調するための中央の問題からなる 2 レベル構造の問題に変換され、その複数の部分問題における意思決定と、中央の意思決定が入れ子の構造となる。またシステムの不確実性を考慮した最適化問題は、不確実下における最悪の状況を想定した意思決定が **min-max** 問題として表されることから、その構造をもって 2 レベル最適化問題とみなすことができる。しかしながら、これら 2 レベル最適化問題に対する既存の解法の多くが、目的関数や制約条件が線形かつ凸関数で表される場合に限定されており、潮流方程式が交流法で記述される電力系統に対する **OPF** においては、その電力系統が非線形かつ非凸のシステム方程式で記述されるために、従来の解法をそのまま適用することはできない。とくに不確実性を有する **OPF** においては、その問題の定式化さえも確立されていないのが現状である。そこで本論文では、分散性あるいは不確実性を有する **OPF** に対して、2 レベル最適化の考え方に基づく定式化を行うとともに、実用的な解法を提案することを目的とする。

本論文は、全 4 章より構成されており、各章の概要および得られた成果は以下の通りである。

第 1 章の序論では、本研究の背景・目的・位置づけ、及び本論文の構成について述べた。

第 2 章では、離散変数を有する **Multi-Area OPF** を対象として、資源配分型分割に基づく分散型計算法を提案した。離散変数を有する **Multi-Area OPF** は、その意思決定が分散化していることに加え、離散変数と連続変数の両方を含む混合変数非線形最適化問題 (**MINLP**) となり容易に解くことはできないが、上述の **MINLP** において離散変数を連続

変数に緩和して得られる近似問題に対し、資源配分型分割を適用してその資源配分変数の連続解を効率よく求めることにより、MINLP を直接連続緩和して得られる解よりも誤差を少なく抑え、各部分問題の計算過程における他の Area との情報交換を省略することにより、計算効率を大幅に向上させることができる手法を提案した。複数のテスト系統により構成された実用的な規模の multi-area OPF 問題に対して数値計算を実行した結果、最適解が高い精度で得られており、計算量に関しても適用する問題規模に応じて優れたスケーラビリティを持つことを確認した。

第 3 章では、予測が困難な再生可能エネルギー由来の電源や需要の急峻な変動を不確実性と捉え、これら不確実下での Robust AC OPF の定式化とその解法を提案した。定式化にあたっては、非線形等式制約条件を含む一般的な不確実下での最適化問題（以降、不確実最適化問題と称する）を検討し、この問題に対する厳密な解法がこれまで提案されてこなかったことを指摘した上で、新たな解法を提案している。具体的には、目的関数に関しては min-max 基準を、不等式制約条件に対してはロバスト性基準を適用した定式化をおこない、システムの状態をシナリオとして想定し、不等式制約条件の制約逸脱量が最大となるシナリオを逐次生成することで不確実最適化問題の解を求める新たな制約緩和法を提案した。提案法は、不確実な分散電源や需要を考慮した Robust AC OPF に対し、厳密な意味でロバスト性を満たす解を導出しており、得られた解の運用上の妥当性についても検証している。

第 4 章は、本論文の結論であり、本研究で得られた研究成果、および今後の課題と展望をまとめた。とくに今後の予定としては、「分散性」と「不確実性」を同時に考慮した最適化問題の解決や、動的な最適化問題への拡張などを挙げている。