

論文の内容の要旨

論文題目 大規模電力系統の供給信頼性向上対策手法に関する研究

氏 名 橋 本 博 幸

大規模システムである電力系統は系統故障の直接的な影響を受けることとなるため、電力系統には安定供給を阻害するリスクが常に内在している。電力系統の供給信頼性とは、システムを構成する要素の不具合（設備故障や発電機停止など）による電力の安定供給・調整力発揮に生じる潜在的リスクへの対応能力を指す。一般に供給信頼性は電力系統の性質より2つの視点から議論される。

- (1) 動的な供給信頼性： 稀頻度の過酷故障など突発的な事象発生に耐えうる電力系統の能力
- (2) 静的な供給信頼性： 系統構成要素の計画的停止や頻度の高い故障停止を前提に、需要に見合う合計電力 (kW) および合計電力量 (kWh) を安定供給できる電力系統の能力

上記項目(1) は、需給運用時の突発的な過酷故障発生に対して、安定度問題や周波数異常の波及を防止し安定運転を維持できる対応策の準備が必要である。項目(2) は、需給計画業務において、前提条件に従って電力安定供給を阻害する要因を取り除く予防的な対応策として検討する。本研究では大規模電力系統の供給信頼性について、「動的な供給信頼性」および「静的な供給信頼性」から複数の課題を述べ、抽出課題から研究・開発項目を研究課題として設定した。1つ目の研究・開発項目は、動的な供給信頼性の視点から故障発生時に安定運用を実現するために必要な系統運用に関する対策手法である。具体的には、「負荷変化に対する系統安定性の系統安定化機器導入による向上効果評価手法」と「オンライン周波数安定化における負荷脱落量推定手法」について技術的課題の設定と解決策の提案を行った。2つ目は、静的な供給信頼性の視点から系統側電源運用の健全性を維持するために必要な需給運用に関する対策手法である。具体的に、まず「大規模計画問題に対する高速・安定な連続系最適化手法」の解決策を検討し、次にその適用を前提として「起動停止可能回数を考慮した年

間需給計画手法」について技術的課題の設定と解決策の提案を行った。以下、各章の内容について要点を述べる。

第 2 章（負荷変化に対する系統安定性の系統安定化機器による向上効果評価手法）では、電力系統で外乱が発生した場合の短時間領域の系統安定性について、エネルギー関数を使用した second-kick 法によりエネルギーマージンという指標で定量的に評価する手法を検討した。Second-kick 法は、電力系統の時間領域シミュレーションで初期外乱（first-kick）を与えた後のポテンシャルエネルギーの値を参照して仮想的な二度目の外乱（second-kick）を系統に挿入することにより、不安定平衡点の近似値を求めるユニークな手法である。しかし、本手法の評価アプローチは、従来、系統故障発生時の過渡（位相角）安定度を評価対象としたものであり、負荷変化により駆動される不安定現象の評価方法として適していないという課題があった。これに対して、ポテンシャルエネルギー記述式の要素項の中で、系統の無効電力と発電機の運動エネルギーに関する 2 つの項に着目し、従来手法と提案手法におけるエネルギー変化の違いを明らかにし、不安定メカニズムに対して適切な項のピーク値を参照して second-kick 適用タイミングを決定する新しい手法を提案した。モデル系統を用いたシミュレーションにより、提案手法は短時間領域における負荷変化により駆動される不安定メカニズムを考慮した新しい second-kick 法として有効であることを示した。本研究の知見は、電力系統に SVC など系統制御機器を導入したときの安定度向上効果について、同一の評価手法の枠組みを使用して異なる不安定メカニズムの系統故障による過渡安定度と負荷変化により駆動される系統の安定度を定量的に評価可能とし、系統制御機器による動的な供給信頼性の維持・向上対策の総合的な検討に寄与するものである。

第 3 章（オンライン周波数安定化における負荷脱落量推定手法）では、単独分離系統の周波数安定化システムにおいて、発電機制御／負荷制御といった制御仕上り精度に不確定要因として大きな影響を与える負荷脱落量を推定する手法を検討した。電力系統では系統故障発生時の電圧低下に伴い負荷構成機器の一部が自律的に系統から離脱する負荷脱落が観測される。オンライン周波数安定化システムは故障除去後の数百 ms 内で動作するが、その時間領域では有効電力計測データに負荷動特性に起因した過渡特性が重畳した観測波形となり負荷脱落量の把握が困難なため、オンラインシステム適用には動特性処理が課題で

ある。本研究では、まず故障時の実測データにより負荷動特性モデルのパラメータ特性分析を実施し、動特性分パラメータについて有用な特性を確認した。特性情報を利用して実際の故障発生時に故障除去直後の短時間領域における電圧と有効電力計測波形に基づき負荷脱落量をオンライン推定する新手法を提案した。推定手法は、故障除去直後の負荷の過渡特性分を計測データから効率的に低減し、主に静特性分を含むデータに変換して故障除去後の負荷量を推定し負荷脱落量を算出することを特徴とする。提案手法を変電所実測データで検証した結果、故障除去直後 100ms 間の計測波形データを使用して 1% 台の誤差で負荷脱落量を推定可能であることを確認した。本研究の知見は、高速制御動作が必要なオンライン系統安定化システムの制御精度向上に非常に有効であり、負荷脱落量推定性能を大きく向上させ、周波数維持の観点から動的な供給信頼性の向上に寄与することが期待できるものである。

第 4 章（大規模計画問題に対する高速・安定な連続系最適化手法）では、静的な供給信頼性確保のために一般二次計画問題形式の大規模問題を、高速・安定に求解する手法について検討した。近年の計算機能力の増大と最適化技術の理論面における発展により最適化技術の導入が進んでいる。しかし、実用システムへの適用では、問題規模に起因する計算の不安定化と演算時間の増大が課題である。本研究では両課題の克服を目指し、内点法に有効制約法の求解戦略を取り入れた「変数の有効制約に関する推定機構を持つ内点法」を提案した。提案手法の特徴は、対数障壁関数を導入した上で、各演算ステップで上下限制約に接近する変数があれば制約が活性化変数と推定して上下限值に固定し、ラグランジュ乗数の近似値を用いて「制約が活性化変数のラグランジュ乗数は非負」という条件が満たされない場合に固定変数の解除を行う、という動的制御を行う点にある。提案手法の有効性確認のため、一般的ベンチマーク問題と実用問題の例として第 5 章で検討する需給計画問題で発電機出力を決定する経済負荷配分問題を用いて従来の内点法との比較評価を行った。評価結果より、提案手法が従来法と同等以上の処理速度を持ち、より高い正答率を示すことを確認した。特に、大規模問題でより高い求解性能を示したことから、内点法の実用的な改良手法として有用性が高いと考えられる。本研究成果は、次章の年間需給計画手法の実現を支える重要な技術となっている。

第 5 章（起動停止可能回数を考慮した年間需給計画手法）では、静的な供給信頼性を確保するため、電源設備故障の未然防止を目的に起動停止可能回数を

考慮した年間需給計画問題を、安定して効率的に求解するための実用的な手法を検討した。電源設備は全体として高効率な運転を行えるように発電ユニットの起動停止を行うが、起動停止時にタービン温度変化による熱疲労が加わる。設備故障リスク低減のため、次回定期検査までの期間（1年間程度）は起動停止回数に制限を設けて静的な供給信頼性の確保を図る。そのため、起動停止回数制限まで考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が重要である。また、年間計画ではLNG火力発電機に期間内の燃料消費総量が指定されるため、両者の協調を考慮した実用的な年間需給計画策定が課題である。本研究では、両制約を除外した問題の求解結果を初期状態とし、両者の制約違反解消による相互影響と運転コスト増分を考慮して逐次解消を図る手法を提案した。実規模の計画問題による評価の結果、燃料消費量制約の違反解消に対して、提案手法は起動停止回数制約を持つ発電機の起動停止状態を発電コストの観点から効果的に配置していることを確認した。また、両制約の協調的な違反解消を無視した実験を行い、本手法が発電コストを低減した計画結果作成のために重要であることを確認した。本研究成果を適用した年間需給計画システムは電力会社の実業務で運用されており有用性が高く、静的な供給信頼性を確保する実用上の役割を十分に果たしている。

今後の課題は、動的な供給信頼性確保の視点では、系統安定化システムにおける不確定要因増大への対処がある。特に過渡安定度に関しては、想定故障ケースに対して制御量を事前算出する安定化方式ではなく、不確定要因の影響を極力排除するため制御量算出演算タイミングを故障発生時として演算を実行する方式が必要になる。また、故障発生時に複数の現象（過渡安定度と電圧、周波数と電圧）が同時発現する複合問題の相互影響を考慮した制御方式には、系統潮流方程式を組み込んだ最適潮流計算上で各問題に対する制御量を同時決定する必要がある。静的な供給信頼性確保の視点では、動的な供給信頼性確保が困難な潮流状態となって供給能力にまで影響を及ぼす場合、需給計画段階から動的な供給信頼性を静的な供給信頼性に組み込む必要がある。これには系統側の潮流状態を制約条件に付加した需給計画問題を解く必要がある。また、自然エネルギーに基づく分散型電源を基幹系統電源と統合して需給計画を行う場合、実用的な観点からは、分散型電源の出力予測の確率分布などを考慮し、信頼性と経済性を両立する確率論的な需給計画手法の開発が期待される。