

学位論文題名

電力系統の安定度解析手法の効率化に関する研究

学位論文内容の要旨

長距離大電力輸送を特徴とする我が国の電力系統においては、電力輸送設備の運用限界を定める上で、同期安定度が支配的である。このため、電力系統の運用計画の策定において、同期安定度の解析作業は必須であり、多大な労力がこれに費やされていることから、安定度解析計算の効率化が運用計画の担当者に与える恩恵は極めて大きい。

同期安定度とは、定常状態において定格回転数で運転されている発電機が、外乱によって加速または減速された場合に、再び定格回転数へと復帰し、安定運転を継続できるか否かを意味する。同期安定度を大別すると、過渡安定度と定態安定度の二つに分けることができる。前者は、外乱の大きさや場所によって左右され、発電機に加えられる加速エネルギーと減速エネルギーの大きさに強く依存する。後者は、発電機の運転状態や制御系の設定などの電力系統のパラメータに依存し、微小外乱によって生じた小さな動揺が、徐々に拡大し、やがて一部の発電機の同期が失われるに至るか否かを問題とする。これらの安定判別には、それぞれの現象の特徴に基づいた種々の解析手法が提案されているが、それにもかかわらず、同期安定度の解析計算は電力系統の運用・計画分野において、最も計算負荷の大きなものの一つとなっている。

高度成長期から右肩あがりの堅調な伸びを示してきた電力需要も、近年その増加傾向に鈍化が見られる。その結果、電力輸送設備の一層の有効活用を図り、設備投資の繰り延べる必要性が高まっており、これには精度の高い安定限界の推定が必要とされる。その一方で、電力市場自由化が進展するに伴い、電力系統の運用・計画における不確実性の増大が予想されている。その結果、需要予測に基づくオフライン解析での想定ケース数の増大や、運用限界の適正なマージンの見直しも予測される。このため、安定度解析計算の効率化、ひいてはオンライン安定度解析のニーズが益々高まることが考えられるが、近年の計算機性能の飛躍的な向上を勘案しても、さらなる解析技術の改善が必要とされている。そこで、本研究では同期安定度の解析手法の効率化に関して、いくつかのアプローチを提案し、その有効性を検証した。

本論文は全7章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、これまでに提案されている解析手法について概観し、過渡安定度および定態安定度のそれぞれについて、解析手法の特徴をまとめ、課題の抽出を行った。

第3章では、定態安定度解析の代表的な手法である固有値解析の効率化について述べる。固有値解析そのものは、既に実用上十分な精度および速度が達成されている。本研究では、基本ケースの解析結果を基に、多数の変化ケースを高速に処理する手法として用いられている、固有値感度解析法の精度向上を図った。従来より用いられている一次の感度は、需要の増減などの比較的小さな変化を対象としたものであるのに対し、本研究では、二次の固有値感度を導入することにより、送電線開放のような大きな変化に対しても精度の向上が確かめられた。また、感度解析による予測が困難な極めて非線形性の強い固有値変化に

対しては、これを検出する指標を提案し、スクリーニング手法としての機能も備えている。

第4章では、系統縮約による過渡安定度解析シミュレーションの効率化について述べる。系統縮約とは、大規模系統の詳細なシミュレーション解析を実施する際に、その一部を簡略表現することにより、計算効率の向上を図る手段である。大別すると、対象部分に含まれる発電機、母線、送電線、負荷などをそれぞれ統合した簡単な系統に置き換える方法と、対象部分の動特性を表す数式をより低次の数式に変換する方法がある。提案法は後者に属するもので、系統の動揺モードに着目し、主要なモードを保存しつつ簡略化を図る。ただし、モードの抽出の際に数式の線形化を要するため、大外乱のシミュレーション時に誤差が拡大する点が課題であったが、これを座標系の変換によって改善した。

第5章では、発電機の過渡安定度余裕を求めることにより、効率的に安定限界を推定する方法について述べる。従来、シミュレーション解析は、主としてオフラインでの安定判別に用いられ、安定度指標の算出は目的とされていなかった。しかし、詳細な系統構成モデルを用いたシミュレーション結果から、加速・減速エネルギーを高い精度で求めることが可能であることが、近年注目された。提案法は、発電機個別のエネルギー余裕を精度良く推定する方法を提案し、発電機のトルク・位相角特性に基づくエネルギー感度を定義し、これを用いた安定限界出力の推定法を示した。これにより、従来は発電機出力を調整しつつ試行錯誤的に求められていた安定限界が、少数の計算ケースから効率的に推定可能となる。

第6章では、前章で述べた安定限界出力の推定法を、オンライン予防制御へ適用することについて提案を行った。高速性の要求されるオンラインへの適用においては、多数の想定故障ケースを有効に絞り込むスクリーニングが極めて重要となるが、これまで、予防制御のための事故選択スクリーニングについては十分な議論がなされていなかった。本研究では、安定判別と予防制御とでスクリーニングに求められる要件の違いを明らかとし、第一波脱調現象のみに対象を限定することにより、効率的なスクリーニング手法の提案を行った。発電機出力の再配分を予防制御の手段とし、個々の発電機の安定限界出力の範囲内で、発電コスト最小となる配分結果が得られる手法を開発した。

第7章は結論であり、本論文の総括を行うと共に、同期安定度解析手法に残されている課題についてまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 北 裕 幸

副 査 教 授 本 間 利 久

副 査 教 授 五十嵐 一

副 査 教 授 山 下 裕

学 位 論 文 題 名

電力系統の安定度解析手法の効率化に関する研究

長距離大電力輸送を特徴とするわが国の電力系統においては、電力輸送設備の運用限界を定める上で、システム全体としての安定性、すなわち同期安定度が支配的となっている。このため、電力系統の運用計画の策定において、同期安定度の解析は必須であるが、電力系統の大規模・複雑化により、その解析には多大な労力が費やされてきている。

同期安定度とは、定常状態において定格回転数で運転されている発電機が、落雷などの外乱によって加速または減速された場合に、再び定格回転数へと復帰し、安定運転を継続できるか否かを表す概念である。同期安定度を大別すると、過渡安定度と定態安定度の二つに分けることができる。前者は、外乱の大きさや場所によって左右され、発電機に加えられる加速エネルギーと減速エネルギーの大きさに強く依存する。後者は、発電機の運転状態や制御系の設定などの電力系統のパラメータに依存し、微少外乱によって生じた小さな動揺が、徐々に拡大し、やがて一部の発電機の同期が失われるに至るか否かを問題とする。これらの安定判別には、それぞれの現象の特徴に基づいた種々の解析手法が提案されているが、それにもかかわらず、同期安定度の解析計算は電力系統の運用・計画分野において、最も計算負荷の大きなものの一つとなっている。

高度成長期から右肩あがりの堅調な伸びを示してきた電力需要も、近年その増加傾向に鈍化が見られる。その結果、電力輸送設備の一層の有効活用を図り、設備投資の繰り延べる必要性が高まっており、これには精度の高い安定限界の推定が必要とされる。その一方で、電力市場自由化が進展するのに伴い、電力系統の運用・計画における不確実性の増大が予想されている。その結果、需要予測に基づくオフライン解析での想定ケース数の増大や、運用限界の適正なマージンの見直しも予測される。このため、安定度解析計算の効率化、ひいてはオンライン安定度解析のニーズが益々高まることが考えられるが、近年の計算機性能の飛躍的な向上を勘案しても、さらなる解析技術の改善が必要とされている。本論文は、同期安定度の解析手法の効率化が、電力系統の運用計画において極めて重要であるとの視点から、いくつかの効率化アプローチを提案すると共に、その有効性を検証した成果について取り纏めたものである。

本論文の第3章において、事故後の定態安定度の解析について、スクリーニングによる効率化手法を提案している。すなわち、基本ケースの解析結果で得られた固有値情報を基に、固有値感度を用いて多数の事故ケースごとに、事故後の系統状態に対する定態安定度を簡略に評価し、不安定となる可能性のある事故ケースのみを選択する手法である。従来から用いられている一次近似の感度では、需要の増減などの比較的小さな変化を対象とし

たものであるのに対し、本研究では、二次近似の固有値感度を導入することにより、事故除去のための送電線開放のような大きな変化に対しても精度の向上が確かめられた。また、二次近似による予測が困難な極めて非線形性の強い固有値変化に対しては、これを検出する指標を提案している。定態安定度解析手法は、固有値解析手法の適用によって既に実用上十分な精度および速度が達成されているが、過渡安定度解析も含めた一連の安定度解析作業を総合的に効率化するという点で、本研究は有意義であると考ええる。

第4章において、著者は系統縮約による過渡安定度解析シミュレーションの効率化について提案を行っている。系統縮約とは、比較的長時間を要する大規模な電力系統のシミュレーション解析を実施する際に、その一部を簡略表現することにより、計算効率の向上を図る手段である。大別すると、対象部分に含まれる発電機、母線、送電線、負荷などをそれぞれ統合した簡単な系統に置き換える方法と、対象部分の動特性を表す数式をより低次の数式に変換する方法がある。提案法は後者に属するもので、落雷などの事故時の電力系統の動揺モードに着目し、主要なモードを保存しつつ簡略化を図っている。従来法においては、モードの抽出の際に数式の線形化を要するため、大外乱のシミュレーション時に誤差が拡大する点が課題であったが、電力系統が有する固有の性質に着目した座標系の変換を行うことによって、線形化に起因する誤差を低減することに成功している。また、提案法は電力会社が所有する電力系統シミュレーター装置の機能として採用された実績があることから、実用性も高いと判断される。

第5章において、著者は詳細なシミュレーション解析結果に基づき、発電機の過渡安定度余裕を求めることにより、効率的に安定限界を推定する方法が提案されている。従来、電力会社の計画・運用部門での実務においては、主としてオフラインでの安定判別にシミュレーション解析が用いられ、定量的な安定度指標の算出には用いられていなかった。近年、シミュレーション結果から、加速・減速エネルギーを高い精度で求める手法が提案されたが、これは詳細な系統構成モデルへの対応が不十分である点が課題であった。著者は、上記の手法に改良を加えることにより、詳細なモデルへの対応を可能とし、発電機個別のエネルギー余裕を精度良く推定する方法を提案した。発電機のトルク一位相角特性に基づくエネルギー感度を定義し、これを用いた安定限界出力の推定法を示した。これにより、従来は発電機出力を調整しつつ試行錯誤的に求められていた安定限界が、少数の計算ケースから効率的に推定可能となる。提案法はすべての不安定現象に対応したものではないが、信頼性の高いシミュレーション解析結果から定量的な安定度指標を導出した点では、電力会社の解析業務担当者にとっての支援として有益であると判断される。

第6章において、著者は5章で提案した安定限界出力推定法によって得られる結果の適用例の一つとして、オンライン予防制御手法の提案を行っている。高速性の要求されるオンライン予防制御への適用においては、計算量の多いシミュレーション解析に基づく手法はこれまで提案されていなかった。本研究では、第一波脱調現象のみに対象を限定するなど、いくつかの前提条件を設け、発電コスト最小となる発電出力配分結果が得られる手法として定式化を行っている。これによって、精度と計算時間および経済性を考慮した予防制御手法実現の可能性を示したという点で、有意義であると考ええる。

これを要するに、著者は、電力系統の安定度解析手法の効率化という喫緊の重要課題を解決すべく、定態安定度、過渡安定度解析の効率化並びに安定限界算出の高度化と予防制御への適用について新しい概念・手法を開発したものであり、その成果は、電力工学、電力系統工学の発展に対して寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。