

電力系統の電圧安定性解析手法の開発

学位論文内容の要旨

電力系統の電圧不安定現象は、従来電源から離れた重負荷地点近傍での比較的ローカルなものと考えられてきた。しかしながら近年の電源の大容量化や更なる遠隔化、送電網設備の効率的運用を目指した長距離基幹送電線の重潮流化、電化生活の一層の定着による負荷機器の定出力維持化などにより、大規模電力系統の電圧不安定現象が注目を集めるようになった。一方、大規模な電圧不安定現象の基本特性の解明やこれに基づく実用的な解析手法の開発は十分でない。このため本論文では、この現象の基本特性の解明とそれをベースとした大規模系統用解析手法ならびに安定性評価指標の開発をおこなった。論文の構成と主なる成果は以下のとおりである。

「まえがき」では、本現象に関する論議の歴史と主として対象系統規模の変遷による視点の変化、今日的な要請から見た現象把握と対策立案の背景について概説した。

続いて第1章「概説」では、本論のベースとなる「電圧・無効電力」の基本特性と過大なコンデンサー補償による特異領域の出現、その領域における変圧器タップ制御効果の逆転などを、水流モデルとの対比によって示した。さらに電力中央研究所の模擬送電線設備を用いた実験の概要を介して、電力系統の潮流分析からは判断し難い不安定現象のローカル性などを例示した。

第2章「電圧安定性の基本特性の解明と模擬実験による検証」では、解析的検討により1電源1負荷系統を例にこの現象が内包する一般的要因を定量的に分析した。また、模擬実験により負荷固有の特性の影響、需要急増時の電圧動揺、系統事故時の電圧不安定現象を示すとともに、2負荷系統を構成しこの現象が近隣地点と持つ相互の影響について基礎的検証をおこなった。

第3章「電圧安定性解析手法の開発」では、所与の需給状況や系統構成など全系統条件を考慮した各需要地点の常時安定性余裕を定量的に把握するとともに、想定外の負荷急増、送電線多重事故に対する制御・操作効果などを分析する手

法を開発した。その内容は概略2つからなる。ひとつは新しい潮流計算法の開発である。これは、電圧安定性解析が一般的に潮流解の収斂し難い条件からスタートするという背景への対応が要求されたからである。まず、所謂浮遊ノードの扱いをアドミタンス・ベースに改め収斂計算上の非線形効果を著しく低減した。また負荷の電圧特性を取り込み、これを対電流ヤコビアン表示とすることで対角要素以外を単純線形表示に収め前記に準ずる効果を挙げた。さらに系統周波数を変数とし発電機制御系特性を取り込むことで、スイング・ノードを排し人間の介入を不要とした。ふたつめは現象のダイナミックなシミュレーション法の開発である。これは万が一の場合を想定した系統の分離や負荷制限の効果を確認するためのもので、広域VQC（電圧・無効電力制御）やLFC（負荷・周波数制御）の模擬が肝要となる。このためには、電力系統運用の現場からきめ細かい注文をきくとともに変化に対応し易いソフトとすることもポイントである。

第4章「電圧安定性の評価指標の開発」では、前章で述べた解析結果を実運用上にどう用いるかを論じた。対象としているのはまず中央の系統運用者と各需要地の1次変電所の運用者であるが、広い意味では前者には設備計画の立案者も含む。電圧不安定現象が生じた場合直接対応するのは需要地の変電所運用者であろうから、まず需要地で日常的に何を監視すべきかを論じた。学問的な立場から種々の監視指標が提案されていたが、これらを横並びに比較してみるとそれぞれの特徴はあるものの限界を示す需給条件に差はみられなかった。そこで現場感覚では最も分かり易い限界供給力とその時点での供給実態との差を監視指標として提案した。これは前章で提案している解析ソフトで極めて簡便に得られるものである。中央で全系の健全さを監視する指標としては、線路インピーダンスによる無効電力損失と総需要との比を提案した。これは最も基本的なものとして認識し得るが、設備計画においては他に考慮すべき事柄も多く1つの評価項目ということになろう。これらにより、電圧不安定現象の本質的要因が明らかにするとともに、予防対策や緊急時操作の立案に資する。

「あとがき」では以上で述べた現象論やソフト開発上の工夫などをさて置き、その実用上の留意点のみを示した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	長谷川	淳
副 査	教 授	土 谷	武 士
副 査	教 授	大 西	利 只
副 査	教 授	本 間	利 久
副 査	助教授	北	裕 幸

学 位 論 文 題 名

電力系統の電圧安定性解析手法の開発

電力系統においては、系統内の各地点における電圧を常に適正な許容範囲内に維持する必要がある、そのための電圧・無効電力調整設備を適切に配置するとともに、十分な調整能力を発揮できるよう制御されている。しかしながら、電力系統の設備および運用の状況によっては、電圧を適正範囲に維持できずに大規模な停電に到る可能性があり、電圧不安定現象と呼ばれている。この現象は、重負荷地点近傍の比較的ローカルな問題と見られていたが、電源の大容量化と長距離送電化、長距離送電幹線の重潮流化、定出力特性を持ち電圧の制御に逆作用をしがちな負荷の増大などにより、大規模電力系統においても現象が顕在化してきた。一方において、大規模な電圧不安定現象は、その基本特性の解明が必ずしも十分ではなく、実用的な解析手法も十分には開発・確立されていない実状にある。

本論文では、大規模電力系統を視野に据えて、電圧不安定現象の基本特性の解明、それに基づいた大規模系統用解析手法の開発、電圧安定性の評価・監視指標の開発に関して論じており、新しく得られた主要な成果は、以下の3点に集約される。

第一に、電圧安定性の基本特性を、簡単な系統における詳細な解析的検討と模擬実験とにより解明している。すなわち、1電源1負荷系統に対する詳細な解析的検討により、電圧不安定現象が内包する一般的要因を定量的に明らかにするとともに、模擬実験によって、負荷固有の特性の影響、需要急増時の電圧動揺、系統事故時の電圧不安定現象、近隣地点との相互影響について、解析的検討から得られた知見を検証している。この知見は、実際に大規模停電にまで到った電圧不安定現象に起因する事故の理解に、大きく貢献した。

第二に、全系の需給状況や系統構成などに基づき、各需要地点の常時安定性

余裕の定量的把握ができる解析手法や、想定外の負荷急増や送電線多重事故に対する制御・操作の効果を分析できる解析手法を、はじめて開発・確立した。すなわち、前者については、従来収束が難しいとされていた条件下で電力系統の電圧や潮流の分布を計算できる新しい潮流計算法を開発している。また後者については、各種の制御機能や電力系統運用に関する多岐に亘る機能をも模擬できるダイナミック・シミュレーション法を開発している。これらの解析手法により、種々の条件下で電圧不安定現象がどのように現れるのか、系統の条件を変えるとどのような影響が出るか、時間の推移とともに現象はどのように進展するか、電圧・無効電力の制御に電圧安定性の面から要求される性能はどのようなものかなど、多くの知見をはじめて得ることができることとなった。

第三に、実運用の面から解析によって得られる知見をどのように用いるのかについて詳細に分析し、実運用現場の技術者にとって最も分かり易い電圧安定性の監視指標を提唱し、その有効性を明らかにしている。先ず、学問的立場から提案されていた種々の監視指標（実運用面では必ずしも理解し易くはないものが多い）が、それぞれの特徴は有するものの、電圧安定性から見た限界供給力を与える需給条件の評価であまり差をもたらさないことを明らかにした上で、実運用現場で使いやすい監視指標として「限界供給力とその時点での供給実態との差」を新しく提案している。この指標は、前述の新しい解析手法によって簡単に算出・評価ができる。また、電力系統全体の健全さを中央で監視する際の指標として「線路インピーダンスによる無効電力損失と総需要の比」を提案している。有用かつ基本的な指標である。

これを要するに、著者は、大規模電力系統の電圧不安定現象に関して、その基本特性の解明、解析手法の開発・確立、評価・監視指標の開発について多くの新知見を得たものであり、電力工学、電力系統工学に対して貢献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。