

学位論文題名

次世代配電システムの信頼性・経済性の評価および
電圧制御手法の検討(Evaluation of Reliability and Economic Efficiency, Voltage Control Methods
in Next Generation Distribution System)

学位論文内容の要旨

低炭素社会への期待の高まり、それに伴う太陽光発電の普及、2011年3月に発生した東日本大震災を契機とした、原子力発電の停止に伴う上位系統の信頼度低下、蓄電技術の進歩による電気自動車 (electric vehicle; EV) の普及など、電力・エネルギー業界を取り巻く環境は今、大きな転換期を迎えている。とりわけ太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギー発電からの逆潮流に対する電圧上昇問題に対する対応は、急務となっている。これは、電源側から需要家側への一方向の電力潮流を前提とした従来の電力システムが、近年増加している分散電源からの逆潮流に対応しきれなくなっていることが原因として挙げられる。一般的にこのような分散電源は需要の末端に設置されるため、特に電力を供給する側と電力を消費する側の接点に相当する配電システムにおいては、供給側・需要家側の双方の要求に柔軟に対応すべく、大きく変貌を遂げる必要がある。こうした背景をもとに、次世代の配電システムとして「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)」や、スマートグリッドといった概念が提唱されている。

本論文ではそのような次世代の配電システムに関して、主に二つの観点からの検討を実施した。一点目は、次世代配電システムの信頼性・経済性の評価である。次世代配電システムの導入に適した分散電源の導入量、負荷状態等を考察し、システム導入に有利な条件を明らかにすることを目的として、信頼度の異なる二つの需要に対して電力供給を行うことを想定し、それを従来システムの枠組みで行う方法と、FRIENDS の枠組みで行う方法の両者を信頼性、経済性の観点から比較・検討した。二点目は、EV による配電系統電圧の制御手法の検討である。配電系統において、EV の増加による配電系統の電圧降下を、EV 自身の制御により適切なレベルに維持することを目的として、その制御手法を検討した。以下に本論文の構成とまとめおよび得られた知見を簡潔に述べる。

第1章では、本節の冒頭で述べた背景を詳述し、本論文の目的と構成、および関連する研究動向についてをまとめて示した。

第2章では、従来の配電系統で特に電圧が問題になっている状況および、次世代配電システムとして、FRIENDS とスマートグリッドの概要を述べた。さらに、EV の利用可能性として、EV に蓄えられた有効電力を系統利用する場合に、必要となる経済的インセンティブを、EV 所有者の利便性の損失を考慮して定量的に評価した。その結果、現状の技術では蓄電可能なエネルギー量が限られているため、EV に蓄えられたエネルギーを系統が利用することは EV 所有者の著しい利便性の損失につながり、必要な経済的インセンティブは非常に大きく、実質的には利用が非常に難しい。しかしながら技術の進歩に伴い EV に搭載される蓄電池容量が大きくなるほど、翌日の走行に対して蓄えられるエネルギーに余力がでるため、系統利用がしやすくなるとの知見が得られた。

第3章では、FRIENDS の信頼度および経済性の評価を行った。この評価では、ある新規需要地域を想定し、そこに配電設備を一から構成することを考えた時に、従来の配電方式の枠組みで配電

設備を構成する場合と、FRIENDS の枠組みで構成する場合を考え、両配電方式の信頼度を比較するという方法で検討した。また、需要については、それほど高い供給信頼度を求めない「標準品質需要」と、高い供給信頼度を求める「高品質需要」の 2 種類を仮定した。信頼度の評価においては、時系列モンテカルロシミュレーション法を用い、経済性の評価としては、システム構築にかかる設備コストを算出した。その際、システム全体にかかるコストを両方式とも揃えて信頼度を比較する方法と、高品質需要の信頼度を同一にして、コストと標準品質需要の信頼度を比較する方法の二つで比較を行った。前者の評価では、将来、規制緩和の進展などにより発電・送電システムの信頼度が低下するような状況においては、FRIENDS 方式による信頼度管理が優位に立つ可能性が示された。一方、後者の評価からは、FRIENDS 方式においては、DG の導入量に対して信頼度改善の度合いが飽和する可能性も示された。そのため、FRIENDS 方式を採用する際には、DG を過剰に導入してしまわぬよう注意が必要であることが示された。

第 4 章では、配電系統における EV による電圧降下を、EV 自身の制御で補償する手法を提案し、その効果を EV の導入可能台数により定量的に評価した。この手法は、EV の充電には通常、時間的な余力があることを利用し、充電電力を抑えること、およびそれにより生じたインバータの空き容量を使って無効電力制御をすることにより、EV の充電による電圧降下を補償するものである。もっとも基本となる制御である「PQ 制御」、電圧の予測を使ってさらにその制御を応用した「予測制御」、PQ 制御をベースとしてさらに電圧逸脱情報のやりとりによって系統全体で協力的な制御を実現する「通信制御」を提案した。その結果、提案手法を採用すれば、EV による電圧降下を補償することが可能となることがわかった。ここでは電圧下限逸脱に対して非常に厳しい条件を想定して評価を行ったが、実際にはここで想定したような過酷な条件はまれであるため、実質的には本手法を採用すれば EV の夜間一斉充電に伴う電圧下限逸脱という問題は解消できるものと考えられる。

第 5 章では、4 章で提案した手法をより効率的、安定的に動作させる手法を検討した。すなわち、PQ 制御をさらに発展させ、必要最低限の有効電力の抑制により、可能な限り短時間で充電を完了させる効率性と、周囲に EV が存在して同様の制御を行ったときにも安定的な動作を実現する安定性を実現する「改良 PQ 制御」の手法を開発した。本手法では、EV が接続されているノード電圧を確認しながら有効電力および無効電力を微小量ずつ変化させて最低限、すなわち電圧下限値を下回らないぎりぎりの電圧値を維持する。さらに、ハンチングの原因となる有効電力および無効電力の微小調整量と制御不感帯の関係の検討により制御が安定となる条件を考察した。

第 6 章では、本論文で検討した結果をまとめ、今後への展望を示した。本研究により、次世代配電システムの有効性および必要性を示し、EV が配電系統に及ぼす影響およびその対策についての知見が得られた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	北	裕	幸
副査	教授	小笠原	悟	司
副査	准教授	原	亮	一

学位論文題名

次世代配電システムの信頼性・経済性の評価および 電圧制御手法の検討

(Evaluation of Reliability and Economic Efficiency, Voltage Control Method
in Next Generation Distribution System)

近年の電力系統においては、太陽光発電・風力発電等の分散型電源の増大、蓄電技術の進歩による電気自動車 (electric vehicle; EV) の普及、2011 年 3 月に発生した東日本大震災を契機とした電力安定供給に対する需要家意識の高まりなど、電力・エネルギー業界を取り巻く環境は大きく変化してきている。しかしながら、現在の電力系統は、電源側から需要家側への一方向・単一品質の電力潮流を前提とするとともに、発電と送配電の機能を一体的に運用するシステムであるため、現状のままでは上記のような環境の変化に十分に対応できなくなってくる可能性がある。

こうした背景のもと、「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)」や、スマートグリッドといった次世代の配電システムの概念が提唱されている。本論文は、こうした次世代の配電システムに関して、主に「信頼性・経済性の評価」ならびに「EV による配電系統電圧の制御」の二つの観点から検討を行ったものである。本論文で得られた主たる成果は以下のようにまとめられる。(1) 次世代配電システムの導入に適した分散電源の導入量、負荷状態等を考察し、システム導入に有利な条件を明らかにすることを目的として、信頼度の異なる二つの需要 (標準品質需要、高品質需要) に対して電力供給を行うことを想定し、それを従来システムの枠組みで行う方法と、FRIENDS の枠組みで行う方法の両者を信頼性、経済性の観点から比較・検討を行っている。供給信頼度評価において、複数信頼度の電力を供給することを前提とした評価は世界的にも新しいものである。また、モデル系統を用いたシミュレーションの結果、特に上位系統の信頼度が低下するようなケースおよび需要が過密化するようなケースにおいて、次世代配電システムが従来配電システムよりも有利になることが定量的に示された。次世代配電システムの有効性については、これまで定性的に議論されるケースがほとんどであり、本論文のようにその信頼性や経済性を定量的に評価した研究はほとんど見られず、本論文の独創的な点と言える。

(2) 配電系統において、EV の増加による配電系統の電圧降下を、EV 自身の制御により適切なレベルに維持することを目的として、その制御手法を検討している。EV を電力系統の周波数制御に活用するという論文はすでに提案されているが、EV を配電系統の電圧安定化に利用するという研究は世界的にも新しい試みである。特に、PQ 制御、予測制御、通信制御という新しい電圧制御手法を提案すると共に、それぞれの有効性を実際の配電系統モデルにおける EV の導入可能量で評価しており、本論文の特色・独創的な点であると言える。特に、通信制御については、情報通信技術 (ICT)、スマートメータを用いた、電力系統と需要家間の双方向通信の可能性を示すものであり、将来有望な技術に

なるものと期待できる。

(3) 著者が提案した EV の PQ 制御手法をより効率的、安定的に動作させるために、系統電圧を常に確認しながら制御量を決定する手法を提案している。これにより、電圧逸脱回避に最低限必要な充電抑制及び無効電力制御を実施することが可能となっている。また、より実際の制御の観点から、EV のプラグイン時、充電中の 2 つの運転パターンにおける具体的な制御モードや不感帯を適切に設定することで制御のハンチングを抑制する方法等が明らかにされている。ここで得られた成果は、EV を電力系統運用に活用することを想定した、蓄電システムの設計に有効な知見を与えるものと期待できる。

これを要するに、著者は、次世代配電システムについて、新しい信頼度評価手法および電圧制御手法を開発すると共に、実際の配電系統モデルを用いて、その有効性を定量的に評価したものであり、配電工学、電力系統工学の発展に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。