

|      |             |
|------|-------------|
| 報告番号 | 甲 第 14505 号 |
|------|-------------|

# 主 論 文 の 要 旨

論文題目    **スマートメータ活用による高圧配電系統の  
状態推定に関する研究  
(Study on State Estimation of Medium  
Voltage Distribution Line Using Smart  
Meter Measurements)**

氏 名    彦山 和久

## 論 文 内 容 の 要 旨

電力は社会に欠かせないエネルギーであり、配電系統、すなわち、配電用変電所から長さ数 km から数十 km の三相高圧配電線を通じて、電力需要家に供給されている。従来は、電力の流れは配電用変電所から需要家に向かって一方向、すなわち、順潮流であったため、配電用変電所にて計測した電流を需要家の契約容量で案分することによって、配電系統の線間電圧分布を推定できた。また、従来は、一旦、各需要家内に接続されている負荷設備がすべて三相平衡であると仮定したうえで線間電圧分布を推定し、次に、ある一定の電圧不平衡分をマージンとして加味した電圧上下限制約を定め、推定した線間電圧が制約範囲内に収まるように配電用変電所の送り出し電圧を制御することによって、三相すべての線間電圧を適正範囲内に維持できていた。

しかし、地球温暖化防止に向けた対応の一環として、配電系統への太陽光発電設備の連系量が増加し続けており、近年では、発電電力が需要家にて消費される負荷電力を超過し、電力の流れが従来とは逆方向、すなわち、逆潮流となっている配電系統が生じている。その結果として、従来の電圧推定手法では、もはや配電系統の電圧分布を正しく推定できなくなっている。また、単相の家庭用太陽光発電設備の連系に加え、今後、電気自動車の充電設備のような単相負荷設備が大量に導入されることで、電圧不平衡が拡大することも懸念されており、その結果、電圧不平衡分として加味すべきマージンが適正電圧範囲以上に大きくなり、三相すべての線間電圧を適正範囲内に維持できなくなる事態が懸念されている。この場合、電圧不平衡を抑制するために、単相設備が接続されている相、すなわち、接続相を変

更する作業が必要となる。しかしながら、配電系統に接続されている単相設備の数は膨大にあり、また、配電線は配電系統全体に亘って多くの地点で捻架されているため、現実的な時間内で接続相を把握することは困難である。

本研究では、高圧配電系統における線間電圧分布の推定に関する課題に加えて、単相設備の接続相の把握に関する課題を解決することを目的とし、近年、需要家や発電設備ごとに設置が進んでいるスマートメータを活用した状態推定手法、すなわち、線間電圧分布および接続相の推定手法を新たに提案する。スマートメータは従来の計量器にはない機能として、電力量の30分毎計量機能、電圧計測機能等が実装されており、これらの計測情報を推定に活用する。

本論文は、全5章で構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

第1章では、研究の背景として、太陽光発電設備や電気自動車、スマートメータに関する動向を述べたうえで、本研究にて対象とする状態推定に関する課題について述べている。

第2章では、発電・負荷設備群が三相平衡で接続されている高圧配電系統を対象とした線間電圧分布推定方法について検討した。まず、逆潮流の生じている配電系統において、従来手法では電圧分布を正しく推定できない要因として、負荷電流と発電電流とを分けて計算していないことに着目した。そこで、まず、一需要家内の負荷設備および発電設備を明確に区別して設定した。次に、推定に活用する計測量として、実運用性を加味し、高圧配電線の送り出し地点に設置されたセンサ付開閉器の電圧・電流計測値と各負荷および各発電設備に設置されたスマートメータの計測値のうちの電力計測値のみを活用する方針を定めた。さらに、推定精度向上と計算量低減の両立を図ることを目的として、各ノードの電圧計算結果に応じて各ノード電流の位相のみを補正し、改めて電圧を計算するという補正計算手法を取り入れ、高圧配電系統における線間電圧分布推定手法の定式化を図った。シミュレーションによる検証の結果、ノード電流位相を2回補正するのみで、計算結果が収束することを明らかにした。さらに、2回補正計算を実施するのみで、配電系統内の各地点の電圧を誤差0.3%以内の精度で推定でき、実運用上問題のない精度で推定することに成功した。提案手法は発電・負荷設備群が三相平衡であることを前提とした電圧分布推定手法であるが、三相不平衡な発電・負荷設備がある場合についても三相平衡とみなすことで計算自体は可能であり、実運用上、問題のないレベルで電圧分布を推定することができる。実際に、本手法は電力会社の制御システムに実装され、2021年から、一部の配電線を対象に運用を開始した。本システムでは、配電線の線路電流および線間電圧を導き、さらに、この結果に基づいて、配電系統に設置されている電圧調整器を適切に制御することに成功している。今後、本システムにて制御する配電線を拡大していく予定である。

第3章では、捻架のある配電系統に接続された負荷の接続相推定手法の開発に取り組んだ。まず、配電系統の中間に接続相推定対象となる不平衡負荷が接続され、配電系統の末端に平衡負荷が接続された2ノードの配電系統モデルを対象として検討した。ここで、もし、不平衡負荷設置地点における三相線間電圧を精度よく推定できれば、不平衡負荷に設置さ

れたスマートメータによる電圧計測値との比較により接続相を推定できる可能性があることを見出した。そこで、第 2 章にて提案した線間電圧分布推定手法をベースとして、送り出し地点に設置されたセンサ付開閉器の三相線間電圧・三相線電流計測値および負荷に設置されたスマートメータの電力計測値から不平衡負荷設置箇所における三相線間電圧を推定する手法の定式化に成功した。さらに、不平衡負荷設置箇所における三相線間電圧推定値とスマートメータの電圧計測値との差分が最も小さい相を接続相として同定する手法を定式化した。次に、検証のため、100 通りの計測パターンを作成し、シミュレーションを実施した結果、三相線間電圧を誤差 0.5%以内で推定できることを明らかにした。さらに、三相線間電圧推定値と不平衡負荷に設置されたスマートメータの電圧計測値から、100 通りの計測パターンのうち 75 パターンについては接続相を正しく推定できることを示した。これは不平衡負荷の偏りの検出に活用できるレベルの精度であると考えられる。

第 4 章では、不平衡が特に大きい三相配電システムについて、電圧管理上、負荷の接続相を適切に変更し、不平衡を解消する必要があることを鑑み、複数時点のデータの活用による接続相推定精度の向上を目指した。まず、第 3 章と同じ配電システムモデルを対象として検討を始めた。ここで、第 3 章の提案手法より計算される線間電圧推定値と電圧計測値を軸とする座標空間上に 3 時点のデータをプロットし、3 点のプロットから形成される三角形の面積を相ごとに計算したとき、接続相と合致する相に対する計算結果が他相に対する計算結果より小さくなる傾向があることを見出した。そこで、上述の特性に着眼し、センサ付開閉器にて計測されたある 3 時点における三相線間電圧・三相線電流およびスマートメータにて計測された同 3 時点における電力・電圧から、上述の面積の大小関係をもとに接続相を推定する手法の定式化を図った。第 3 章にて作成した 100 通りの計測パターンのうちから重複なく 3 時点を選ぶすべてのパターン ( ${}_{100}C_3=161,700$  通り) に対して、本手法を適用した結果、98%という高い精度で接続相を正しく推定できることが検証できた。さらに、これは接続相の変更作業による不平衡の改善にも活用可能な十分な精度であることを示した。最後に、多ノードモデルへの拡張について検証するため、3 ノードの配電システムモデルを対象として検討を行った。ここでは、前述の手法を送り出し地点から末端地点に向けて順番に逐次的に三相線間電圧を推定のうえ、接続相を推定する手法について、定式化を図った。あるシミュレーション条件をもとに検証した結果、各地点における負荷の接続相を問題なく推定できることを見出した。

第 5 章では、本論文を総括し、本研究で得られた主要な知見をまとめ、今後の展望を示した。