

博士(工学) 金 美 映

学位論文題名

ULTC Voltage Regulation in Distribution Systems
with Distributed Generations

(分散型電源を考慮した配電系統での ULTC 電圧調整に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、需要家側のコスト低減や省エネルギー対策、さらには地球環境問題、エネルギー資源枯渇問題などへの対策として、風力発電や太陽光発電などの新エネルギー、燃料電池やマイクロガスタービンなどのコージェネレーションシステムを含む多種多様な分散型電源 (Distributed Generator:DG) が導入されてきている。今後、技術開発の進展と設備価格の低廉化により、その導入量はますます増加するものと予想される。ところで DG は、技術的・経済的・効率的な理由から、単独で全需要を賄うのではなく、通常、既存の電力系統と連系して運用される。しかしながら、既存の配電系統は DG の大量連系を想定して設計・運用されてはおらず、DG 出力の変動や系統への逆潮流は、周波数変動や配電線の電圧上昇などを引き起こすことが予想される。

一般に配電系統には、需要家電圧を規定範囲内に維持するために、多種多様な電圧調整器が用いられている。その中でも負荷時タップ切替変圧器 (Under Load Tap Changer, 以下 ULTC) は最も広い調整範囲と大きな負荷を担っており、需要家電圧の維持に効果的な電圧調整器として広く用いられている。また、高圧配電線路の電圧降下が 5% を超過する長距離線路には、線路電圧調整装置 (Step Voltage Regulator, 以下 SVR) が設置されている。本論文では、まず ULTC と SVR の最適電圧調整方策を提示し、両者を適切に協調して運用することの有効性を検証した。次に、既存の電圧調整方式に基づき、DG 導入を考慮した ULTC の制御手法を検討し、さらに既存の方式の限界を越える新しい電圧調整方式を開発した。本論文は以下の構成からなっている。

(1) ULTC と SVR の最適電圧調整方策

配電系統の電力品質に対する要求が増大してきている中、簡単で、信頼性が高く、経済的に電圧品質を維持することができる線路電圧調整装置 (SVR, PVR) が導入されている。これらの線路電圧調整装置は変電所の ULTC と適切に協調がなされ、合理的に電圧補償を分担することができなければ、電圧調整の効果を十分に發揮させることができない。そこで本論文ではまず、DG が導入されている状況下で、ULTC と SVR の受電端電圧が標準電圧に近づくような最適協調方策を提示し、二つの評価指標-全体対象ノードの需要家電圧と標準電圧との偏差の二乗和、tap 動作回数-に基づき協調運用を行うことの有効性を確認する。

(2) 既存 ULTC の電圧調整方式と最大導入可能な分散型電源の容量

配電系統では、受電端電圧が常に適正範囲内に収まるよう、配電用変電所の送出電圧を ULTC により調整している。ULTC の電圧調整のために従来から最も一般的に用いられている方法が LDC (Load Drop Compensation) 方式である。この手法は負荷変動に対する電圧降下分を償って送出し電圧を変える方式である。このとき、ULTC の動作は、負荷中心点電圧と等価インピーダンスの二つの

LDC パラメータ(整定値)と、オンラインで測定される送出電流に基づいているが、従来この整定値は経験的に設定されていたため、その最適性は保証されていない。また、DG の導入を考慮した設定とはなっておらず、DG 導入に伴う電圧上昇に対応することができない。すなわち、負荷変動と多様な DG の出力変動に柔軟に対応することができる整定値が必要であり、本論文ではまず、その具体的な整定値を決定するアルゴリズムを提案している。さらに本論文では、配電系統に適用可能な整定値が存在するまで DG を導入できるものと考えることで、現在の配電系統に導入可能な DG の最大容量を算定する手法を新たに開発している。提案された手法は三相不平衡形 IEEE13-ノードと多數のフィーダを持つたモデル系統に適用され、その有効性が確認された。また、多様な DG の分布(シングルノード、マルチノード)に提案手法を適用し、その有効性を検証すると共に、他の電圧調整器にも適用できることを確認した。

(3) 新しい ULTC の電圧調整方策と最大導入可能な分散型電源の容量の評価

近年、配電系統を適切にマネジメントするために、高度な自動化・通信設備が配電系統内に設置されてきている。前述のごとく、LDC 方式による従来の電圧調整方式は、変電所の送出し電流のみをリアルタイムで測定し、望ましい送出し電圧を決定するものであるが、単一の測定量だけでは DG の導入増加に対応することが難しくなると予想される。本論文では、フィーダの電圧プロファイルをオンラインで測定することを前提として、この情報に基づいて適切な ULTC の送出し電圧を決定する新しい電圧調整方式を提案している。具体的には、各フィーダにおける 4箇所の変圧器 2次側電圧をオンラインで測定し、その測定値に基づいて「利用可能な ULTC のタップ位置の範囲」を推定する。この推定された利用可能タップ範囲から適当なタップ位置を選ぶことによって、すべての需要家電圧を許容範囲内に収めることができる。この方式では、DG の導入容量が増加すると、上記の「利用可能な ULTC のタップ位置の範囲」が存在しなくなる。言い換れば、この点までであれば DG を導入しても安定に配電系統を運用できることを意味しており、これにより DG の最大導入容量を評価することができる。モデル系統を用いたシミュレーションにより、提案手法による最大導入可能な DG の容量は、従来の LDC 方式のそれと比べて優れていることが明らかとなった。

以上より、本論文では、DG 導入を考慮した配電系統の電圧調整方策について検討することを目的として、既存の LDC 方式に基づく ULTC 制御手法とオンライン測定値を用いた新しい ULTC 制御手法を開発すると共に、配電系統の電圧品質面での最大導入可能な DG の容量について算定・比較を行った。

学位論文審査の要旨

主　査　教　授　北　　裕　幸
副　査　教　授　五十嵐　一
副　査　教　授　小笠原　悟　司
副　査　准教授　原　　亮　一

学　位　論　文　題　名

ULTC Voltage Regulation in Distribution Systems with Distributed Generations

(分散型電源を考慮した配電系統での ULTC 電圧調整に関する研究)

近年、風力発電や太陽光発電などの新エネルギー、燃料電池やマイクロガスタービンなどのコーポレーションシステムを含む多種多様な分散型電源 (Distributed Generator:DG) が導入されてきている。DG は、技術的・経済的・効率的な理由から、単独で全需要を賄うのではなく、通常、既存の電力系統と連系して運用される。しかしながら、既存の配電系統は DG の大量連系を想定して設計・運用されることはおらず、DG 出力の変動や系統への逆潮流は、周波数変動や配電線の電圧上昇などを引き起こすことが予想される。本論文では、DG の大量導入を想定した配電系統の電圧調整方策について検討を行ったものである。以下に各項目について審査の結果を要約する。

(1) ULTC と SVR の最適電圧調整方策

本論文では、配電系統の電圧制御装置として広く用いられている負荷時タップ切り替え変圧器 (ULTC) と線路電圧調整装置 (SVR) に着目し、需要家電圧と標準電圧との偏差の二乗和を評価関数とした、両制御装置の最適協調方策が提案されている。シミュレーションの結果、ULTC と SVR を協調して運用することにより、両制御器が適度に補完し合い、個別最適化に基づく従来手法に比べ、評価指標の値のみならずタップ動作回数も向上することが示された。今後、配電系統は長距離化が予想されていることから、SVR の設置が不可欠となる。その意味で、ULTC との協調方策について、ひとつの指針を示したこととは極めて大きな意義がある。また、本提案手法は DG が導入されている場合においても有効であることが示されており、有用な手法と評価できる。

(2) 既存 ULTC の電圧調整方式と最大導入可能な分散型電源の容量

ULTC の電圧調整のために従来から最も一般的に用いられている方法は LDC (Lind Drop Compensation) 方式である。LDC 方式では、負荷中心点電圧と等価インピーダンスの二つのパラメータ (整定値) と、オンラインで測定される送出電流に基づいて ULTC のタップ位置が決定されるが、従来この整定値は経験的に設定されていたため、その最適性は保証されていなかった。また、DG の導入を考慮した設定とはなっておらず、DG 導入に伴う電圧上昇に対応することができないという問題があった。本論文ではまず、DG 導入を考慮した具体的な整定値を決定するアルゴリズムが提案されている。さらに本論文では、配電系統に適用可能な整定値が存在するまで DG を導入でき

るものと考えることで、現在の配電系統に導入可能な DG の最大容量を算定する手法も新たに開発されている。提案された手法は実規模に近いモデル系統に適用され、その有効性が確認されている。また、多様な DG の分布に提案手法を適用し、その有効性を検証すると共に、他の電圧調整器にも適用できることが確認されている。ULTC を制御する際に用いられる LDC 方式に対して、DG が導入されている将来の配電系統においても共通に適用できるような整定値を見出す手法は世界的にも全く新しい方法であり、極めて価値のある研究である。また、提案手法を用いて、現在の配電系統にどの程度まで DG が導入できるかを算定する方法も今後ますます導入が拡大すると予想される配電系統の運用計画において極めて有益な情報を与えるものと評価できる。

(3) 新しい ULTC の電圧調整方策と最大導入可能な分散型電源の容量の評価

近年、配電系統を適切にマネジメントするために、高度な自動化・通信設備が配電系統内に設置されてきている。本論文では、フィーダの電圧プロファイルをオンラインで測定することを前提として、この情報に基づいて適切な ULTC の送出し電圧を決定する新しい電圧調整方式が提案されている。また、オンライン制御においては、電圧を適正範囲内に維持するための ULTC の「利用可能なタップ位置の範囲」を計算し、この範囲内で ULTC の運用を行えばよいことを示している。また、この方式では、DG の導入容量が増加すると、上記の「利用可能な ULTC のタップ位置の範囲」が存在しなくなる。言い換れば、この点までであれば DG を導入しても安定に配電系統を運用できることを意味しており、これにより DG の最大導入容量を評価することができる。モデル系統を用いたシミュレーションにより、提案手法による最大導入可能な DG の容量は、従来の LDC 方式のそれと比べて優れていることが明らかにされている。オンライン通信情報を用いた配電系統の電圧制御については、様々な研究がなされているが、DG の導入を考慮した手法の提案は未だ少ない。さらに、オンライン情報を用いることで DG の導入可能容量がどの程度増加するかと言う研究もほとんど見られない。この意味で極めて独創的な研究と評価できる。

これを要するに、著者は、分散電源の導入を考慮した配電系統の電圧調整方策の開発および分散電源導入可能容量の評価について検討を行ったものであり、電力系統工学の発展に寄与するものの大なるものがある。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。