様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月 １１ 日現在

機関番号： ３２６８９
研究種目： 若手研究(B)
研究期間： 2017～2018
課題番号： １７Ｋ１４６４７

研究課題名（和文）短時間先の電圧変動推定に基づくモデル予測型電圧管理手法の開発

研究課題名（英文）Development of Predictive Voltage Control Scheme based on Estimation of Short-time Ahead Voltage Fluctuation in Distribution System

研究代表者
芳澤　信哉（Yoshizawa, Shinya）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：９０７７８１８５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,300,000円

研究成果の概要（和文）： 太陽光発電の大量導入による電圧上昇や電圧変動に起因する配電系統の電圧逸脱問題への対策として、センサ計測器で得られる電圧値から短時間先の電圧変動分布を推定し、適正範囲からの電圧逸脱リスクを最小化するように配電系統電圧を管理するモデル予測型の電圧管理手法を開発した。また、数千軒の需要家が接続した配電系統モデルを用いて開発した電圧管理手法を検証し、その有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
　配電系統にて過去に計測された電圧値から電圧変動解析を実施し、配電系統の各地点の電圧変動量を確率密度関数として表現することで電圧制御に必要なデータ量の削減を可能にし、既存技術と同等の電圧制御性能を保ちながら大幅なコスト削減を可能とする点に特色がある。また、従来の電圧制御手法での課題を解消するためにモデル予測制御の枠組みを適用した独創的な手法であり、地域特性を反映させた大規模な実配電系統モデルにて開発手法の有用性を確認していることから、開発手法の検証結果は極めて現実的な結果であり、研究成果の価値は非常に高い。

研究成果の概要（英文）： A predictive voltage control scheme based on short-time ahead voltage fluctuation estimation was developed for achieving a mass penetration of photovoltaic generation in a distribution system. In the developed scheme, the short-term ahead voltage fluctuation was estimated from the past sensor measurement voltage, and the voltage regulator operated in order to minimize the voltage violation risk in the whole distribution system. The voltage control performance of the developed scheme was tested on a large-scale distribution system model to which thousands of customers connected, and the effectiveness was confirmed.

研究分野： 電力系統工学

キーワード： 配電系統　電圧管理　太陽光発電　再生可能エネルギー　モデル予測制御

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９、ＣＫ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

配電系統の電圧管理は需要家の電圧品質を確保する上で重要な役割を担っている。近年、再生可能エネルギーの固定買取価格制度などの政策によって太陽光発電が配電系統に急速に導入され始め、電力潮流が複雑化することで系統状況の把握が難しくなり、これに伴う電圧逸脱問題が懸念されている。このような電圧逸脱問題は、太陽光発電からの逆潮流によって生じる配電線電圧上昇や太陽光発電出力が天候に依存して発生する電圧変動が主な原因である。このような問題への対策として、配電線路の電圧等を計測するセンサ計測器が導入され始め、これらの計測情報を活用して集中的に電圧管理を行う集中型電圧制御手法がこれまで国内外で検証されてきた。集中型電圧制御手法はセンサ計測値を活用して動的に電圧制御を行うため太陽光発電の導入量のさらなる拡大に期待できる一方で、計測した時間断面での電圧値に基づいて逐次的なタップ制御を行うため、電圧制御性能がセンサ計測地点と計測周期に依存し、通信・制御遅れなどを原因とする短時間の電圧逸脱が発生する可能性がある。また、リアルタイムでの通信インフラを必要とするなど、電圧制御手法自体の課題だけではなく、通信インフラ整備などの実用化に向けた課題が存在している。一方、太陽光発電出力を予測し、予測結果に基づいて電圧管理を行うことで太陽光発電の導入量の拡大は可能だと考えられるが、太陽光発電出力の正確な予測は難しく、短周期の電圧変動に起因する電圧逸脱の解決は困難である。また、電圧管理に直接的に必要な情報は太陽光発電出力変動ではなく実際に起こり得る電圧変動値であり、配電系統電圧は需要家の負荷変動や電圧制御機器のタップ動作によっても変化することから、計測電圧値の変動自体を正確に見積もれないという問題も存在している。そのため、今後の太陽光発電の普及拡大のためには、センサ計測情報を活用して様々な要因にて発生する電圧変動量を推定し、配電系統電圧を適正に維持できる電圧管理手法の開発が必要不可欠である。

２．研究の目的

本研究では、太陽光発電の大量導入による電圧上昇や電圧変動に起因する配電系統の電圧逸脱問題を解決するため、過去に蓄積されたセンサ計測電圧値を活用し、短時間先の電圧変動推定に基づいて配電系統電圧を適切に管理するモデル予測型の電圧管理手法の開発を目的とした。さらに、実配電系統モデルを用いた数値計算を通じて、開発手法を実システムに適用する際の課題や対策を明らかにすることを目指した。

３．研究の方法

モデル予測型電圧管理手法の開発のため、本研究では以下に掲げる3つの研究項目を実施する。

(1) 電圧変動解析に基づくセンサ計測器設置地点の決定

太陽光発電・負荷電力の時間粒度の細かいデータを実配電系統モデルに展開し、電圧制御機器の設置地点電圧と配電系統の各地点電圧との電圧偏差を混合ガウスモデルにて近似する。このとき、太陽光発電は衛星日射量データに基づいて地点ごとの発電出力を算出し、消費電力は実配電系統モデルでの実測電力値と需要家にて計測された消費電力値を活用して算出することで、配電線ごとの地域特性を反映させた電圧変動解析を実施する。そして、電圧偏差が大きくなる地点や電圧分布の分散が大きくなる地点を割り出し、センサ計測器設置地点を決定する。なお、太陽光発電の導入分布・量に依存した結果とならないように、太陽光発電・負荷電力の導入パターンを変化させた電圧変動解析を実施する。

(2) 電圧逸脱リスクの最小化を目的としたモデル予測型電圧管理手法の開発

(1)にて決定したセンサ計測地点の電圧変動値に基づき、短時間先の電圧逸脱発生リスクを削減する電圧管理手法を開発する。具体的には、過去に蓄積されたセンサ計測電圧値と電圧制御機器の2次側電圧との電圧偏差から短時間に発生する電圧偏差変化量を混合ガウスモデルにて近似し、適正電圧範囲からの電圧逸脱リスクが最小となるようにタップ制御を行うものである。

(3) 実配電系統モデルを用いた開発手法の有用性評価と課題抽出

太陽光発電が大量導入された実配電系統モデルに開発手法を実装し、数値シミュレーションを通じてその有用性を評価する。また、電圧変動の推定区間を変化させて電圧逸脱量、および、タップ動作回数をそれぞれ算出し、開発手法における電圧変動の推定区間と電圧管理性能を定量的に評価することで電圧制約を満たすための条件や実システムへの適用する際の課題を抽出する。

４．研究成果

(1) 電圧変動解析に基づくセンサ計測器設置地点の決定

図１に対象とした実配電系統モデルを示す。配電系統モデルは配電用変電所から低圧需要家までの6配電線を模擬しており、高圧需要家112軒、低圧需要家6057軒が接続している。また、合計55個の自動区分開閉器により配線線が分割管理され、配電用変電所に設置される負荷時タップ切換変圧器（LRT：load ratio control transformer）のタップ制御によって電圧管理が行われている。本研究では太陽光発電の導入率を低圧需要家の軒数比で50%（3023軒の低圧需要家に太陽光発電を導入）に設定し、ランダムに決定した50通りの太陽光発電の導入ケースにて

電圧変動解析を実施した。さらに、全964地点のセンサ計測地点候補の中から電圧変動が最大・最小となる地点を総合的に判断し、図1の赤印（三角）に示す計12地点をセンサ計測地点として選出した。一般的に、配電線路末端は配電用変電所からの距離が長くインピーダンス値が大きくなるため、太陽光発電や負荷電力の変動によって電圧変動量が大きくなる傾向がある。この傾向は本研究における電圧変動解析結果とも一致し、適切な電圧管理を行うためには各配電線の末端地点において電圧計測を行う必要があると判断できる。一方、電力会社にて導入が検討されているセンサ内蔵開閉器は、既設の自動区分開閉器を交換する形での導入が検討されているため、図中の緑印（四角）がセンサ計測候補になる。自動区分開閉器は配電線の分割管理や系統構成切替などの系統運用を目的としており、電圧管理のために設置されたものではないが、電圧変動解析によって選定したセンサ計測地点と既設の自動区分開閉器地点とが一致する箇所は少ないことから、太陽光発電の導入拡大時には電圧管理に必要な計測地点の選定が必要になることを示唆している。

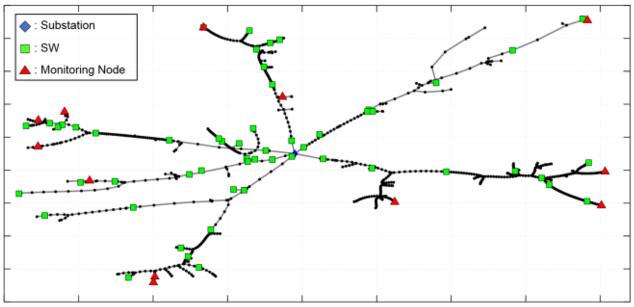


図1　配電系統モデルとセンサ計測器設置地点

(2)　電圧逸脱リスクの最小化を目的としたモデル予測型電圧管理手法の開発

開発したモデル予測型電圧管理手法の概要を図2に示す。開発手法では、過去の計測電圧を活用して短時間に発生する電圧変動量を確率密度関数にて近似を行うオフライン処理と、電圧制御機器にてリアルタイムで得られている電圧値から短時間先の電圧逸脱リスクを算出し、電圧逸脱リスクを最小化し、かつ、適正電圧維持可能量を最大化するようにタップ制御を行うオンライン処理からなる。以下、開発手法におけるオフライン処理とオンライン処理の2つの手続きを詳細に述べる。

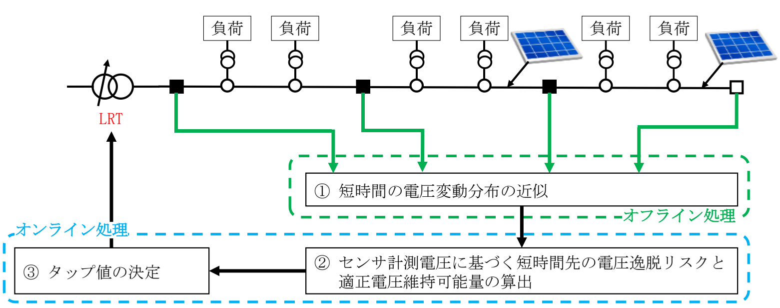
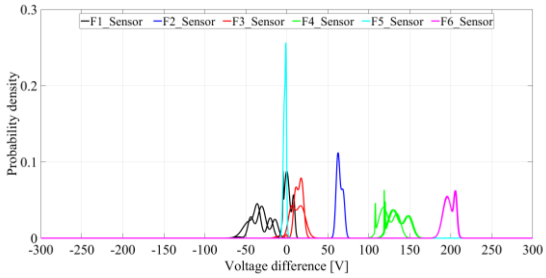


図2　開発手法の概要図

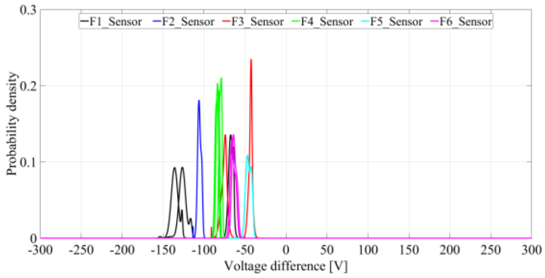
①　オフライン処理：短時間の電圧変動分布の近似

太陽光発電の出力変動や電圧制御機器のタップ動作などの実際の配電系統にて発生する電圧変化を考慮するため、本研究では電圧制御機器の2次側電圧とセンサ計測電圧との電圧偏差に着目し、短時間に発生する電圧偏差の変動量を確率密度関数である混合ガウス分布にて近似する。混合ガウス分布は複数のガウス分布を重ね合わせた分布であり、その形状はパラメータである各ガウス分布の平均、分散、混合係数にて決定されるため、本研究ではEMアルゴリズムにて各パラメータを決定し、また、赤池情報量規準が最小となるようにモデル数を決定した。ただし、(1)にて決定したセンサ計測地点ごとに最適なモデル数、パラメータ値を決定している。

図3に、(1)にて決定した12地点のセンサ計測地点における電圧変動量の近似結果を示す。図3(a)、(b)はそれぞれ6時と14時における電圧変動量を示しており、電圧制御機器を基準として、短時間において電圧降下した場合には正値、電圧上昇した場合には負値になる。これらの近似結果から、時間帯ごとに各配電線にて発生する電圧偏差の変化量が異なることが明らかである。図3(b)のように太陽光発電による発電量が多い日中の時間帯では、配電線ごとの電圧変動量（大きさ）は異なるものの、短時間に電圧上昇が発生する可能性が高いことがわかる一方で、図3(a)の朝方の時間帯には、配電線ごとに電圧変動量の振る舞いが異なることがわかる。具体的には、配電線1（黒線）では電圧上昇の発生が、配電線6（紫線）では電圧降下の発生が想定され、これらの要因は配電線ごとに連系している需要家種別や力率調整用コンデンサなどの設備容量による差だと考えられる。これらの電圧変動量の推定結果から、各配電線での電圧値の振る舞いを正確に把握することは難しく、配電用変電所の通過電流のみでタップ制御を行う従来の電圧管理手法では、適切な電圧管理が行えない可能性があることを確認した。



(a) 6 時（6 a.m.-7 a.m.）



(b) 14 時（2 p.m.-3 p.m.）

図 3　混合ガウスモデルを用いた電圧変動量の近似結果

② オンライン処理：センサ計測電圧に基づく短時間先の電圧逸脱リスクと適正電圧維持可能量の算出とタップ値の決定

①において算出した短時間に発生する電圧変動分布の近似結果と現在時刻における電圧制御機器の2次側電圧から、図4に示すように、センサ計測地点の短時間先の電圧分布を推定する。そして、短時間先のセンサ計測地点電圧が適正電圧範囲内に含まれる確率（図4の斜線部の面積）を適正電圧維持可能量（VSL：Voltage safety level）として算出する。言い換えれば、適正電圧範囲に含まれない面積を電圧逸脱リスクとして捉えることができ、本研究では、(1)において選定した計 12 地点のセンサ計測地点のVSL の総和を最大化するように電圧制御機器のタップ制御を実施することで、配電系統全体の電圧逸脱リスクの最小化を図る。

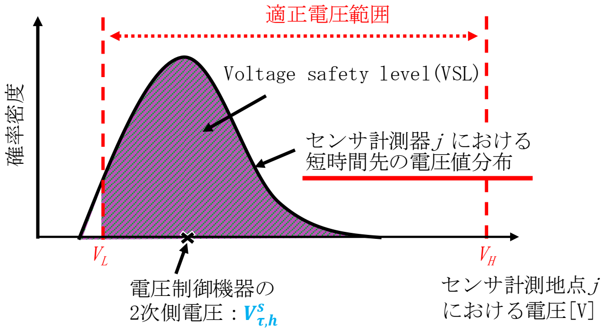


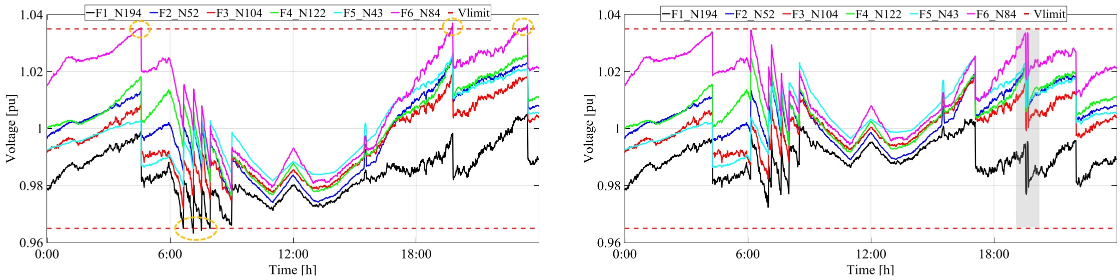
図 4　短時間先のセンサ計測地点の推定電圧分布

しかしながら、推定した電圧変動分布は過去に発生した短時間での電圧変化量を近似した確率密度関数と、現時刻での電圧制御機器の 2 次側電圧に基づいて算出しているため、実際の電圧値と推定電圧値とで誤差が生じ、不適切なタップ動作やそれに伴うタップ動作回数の増加につながる可能性ある。タップ動作回数の増加は電圧制御機器の摩耗劣化に関係するため、防止する必要がある。そこで本研究では、現行の電圧制御手法と同じくタップ制御に動作時限を設定し、連続して一定時間以上にタップ制御を行う必要性があると判断した場合のみにタップ制御を行うものとした。

(3) 実配電系統モデルを用いた開発手法の有用性評価と課題抽出

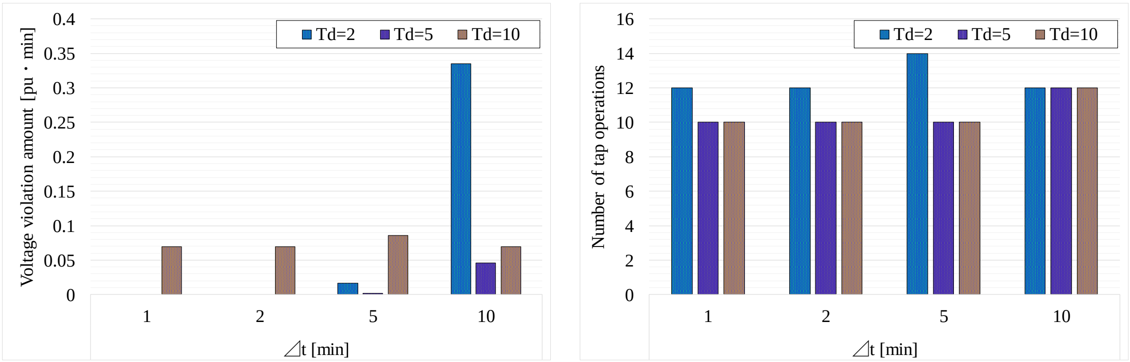
実配電系統モデルに開発手法を実装し、数値シミュレーションを通じて開発手法の有用性を検証した。図 5 に、開発手法による電圧制御結果と、比較手法として実装した集中型電圧制御手法による電圧制御結果を示す。集中型電圧制御手法は開発手法と同じく選定した 12 地点のリアルタイムのセンサ計測電圧値を活用し、配電系統全体の電圧逸脱量が最小になるように逐次的にタップ値を切り換える手法である。図 5 より、リアルタイムで配電系統電圧を取得できる集中型電圧制御手法を用いた場合においても、適正範囲からの電圧逸脱が発生している。これは、電圧制御性能がセンサ計測周期に依存し、タップ制御時に短時間の電圧変動を考慮できなかったことが原因である。一方、開発手法を用いた場合には電圧逸脱が発生しておらず、また、日中の時間帯においては適正範囲の上下限から一定の電圧裕度を保つことができていることから、その有用性が確認できる。しかしながら、図 5(b)の網掛け部に示すように、開発手法を用いた際には夕方の時間帯において不要なタップ動作が発生し、集中型電圧制御手法よりタップ動作回数が増加する結果となった。この原因としては、短時間先の電圧変動分布を近似する際に用いた過去の計測電圧値と実際のタップ制御時の電圧値との乖離が考えられ、開発手法を実運用に用いる際の課題を確認した。

また、図 6 に、開発手法において電圧変動量の推定区間（⊿t）とタップ制御の動作時限（*Td*）を変化させた際の電圧逸脱量、タップ動作回数をそれぞれ示す。図 6 から、電圧変動量の推定区間（⊿t）を 5 分以上、タップ制御の動作時限（*Td*）を 10 分以上に設定すると電圧逸脱量が増加する一方で、タップ動作回数に関しては設定値にあまり関係なく、電圧制御機器の摩耗劣化にすぐに影響する程の大幅な増加は見られないことを確認した。このことから、開発手法を実運用に適用する際には、電圧変動量の推定区間（⊿t）タップ制御の動作時限（*Td*）を 2 分程度に設定することで十分な電圧制御効果が得られると言える。



（a）集中型電圧制御手法　　　　　　　　（b）開発手法

図 5　電圧制御結果



（a）電圧逸脱量　　　　　　　　（b）タップ動作回数

図 6　電圧変動量の推定区間（⊿t）と動作時限（T_d）を変化させた際の電圧制御結果

５．主な発表論文等

〔学会発表〕（計　4 件）

① 芳澤信哉、 林泰弘、 “モデル予測型電圧制御手法における電圧変動推定区間と電圧制御性能に関する評価、” 平成 31 年電気学会全国大会、 2019 年 3 月.

② 芳澤信哉、 林泰弘、 “電圧変動推定に基づくモデル予測型電圧制御手法に関する検討、” 電気学会電力系統技術研究会、 2019 年 1 月.

③ 芳澤信哉、 林泰弘、 “電圧逸脱リスク最小化を目的とした電圧管理手法の基礎検討、” 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会、 2019 年 9 月.

④ 芳澤信哉、林泰弘、 “不確実な太陽光発電の導入分布における配電系統の電圧逸脱リスク評価に関する基礎検討、” 平成 29 年 電気学会 全国大会、 2018 年 3 月.

〔その他〕
ホームページ等
http://researchers.waseda.jp/profile/ja.b131ae3146d2cacc0c51d96346e64db6.html

６．研究組織

(1)研究代表者
研究代表者氏名：芳澤信哉

ローマ字氏名：YOSHIZAWA SHINYA

所属研究機関名：早稲田大学

部局名：理工学術院

職名：講師（任期付）
研究者番号（8 桁）：90778185

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。