

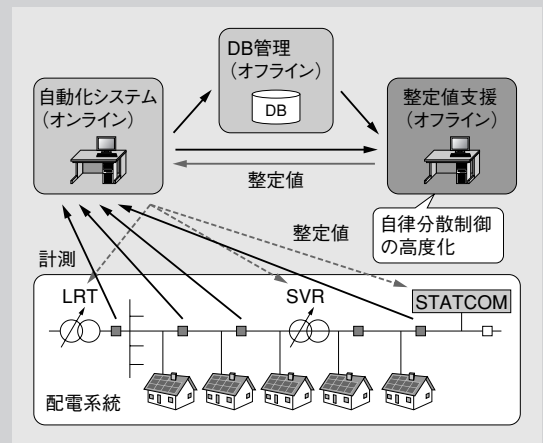
配電系統の自律分散型電圧制御技術の開発に向けた取り組み（次世代送配電系統最適制御技術実証事業）

🔗 配電系統, 電圧制御, 自律分散, 最適化, シミュレーション

* 田邊隆之 Takayuki Tanabe ** 中島廣則 Hironori Nakashima *** 林 孝則 Takanori Hayashi

概要

当社は、2010年度から2012年度の計画で経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として進められている「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」に参画し、配電系統の電圧制御技術の高度化に向けた技術開発を行っている。現状の配電系統の電圧制御は、各種電圧制御機器の自端情報に基づく制御機能により運用されている。これらの制御機能は基本的に電力潮流が需要側に向かうことを前提としており、太陽光発電システムが需要側に大量に普及した場合には、電圧管理が困難化する可能性があることが指摘されている。このような問題に対して、当社は上記自律分散制御の基本的な機能をベースとして、電圧を適正値に維持することを可能とする制御パラメータの最適化などに関する技術開発を進めている。



次世代送配電系統最適制御技術実証事業における配電系統の電圧制御技術高度化の概要

1. ま え が き

温室効果ガスの排出削減に対する要求が高まる中、2009年4月に太陽光発電システムの導入目標として、2020年に2,800万kWという非常に高い政府目標が掲げられた¹⁾。また、我が国は2011年3月に未曾有の被害をもたらした東日本大震災に見舞われ、温室効果ガス排出削減効果の高い原子力発電所が、安全性を精査するため次々と利用できない状況となった。さらに原子力発電所の長期間の停止は、電力需給ひっ迫という状況をもたらすことになった。このような状況の下で、省エネルギーに対する意識の高まりとともに、再生可能エネルギー電源の利用拡大に対する期待がますます高まっている。

太陽光発電システムは、発電時に二酸化炭素を排出しない点で非常に優れた電源であるが、気象

条件によって発電出力が左右されるなど、安定的なエネルギー供給源としては期待できない側面がある。また、日射変動により発電出力が大きく変動する特性を有することから、電力系統の安定的な運用に悪影響を及ぼすことが懸念されている。近年では、太陽光発電システムなどの再生可能エネルギー電源の導入拡大に伴う電力系統上の諸課題に対して解決策を与え、さらには同電源の導入許容量を拡大できるとの期待から、スマートグリッドと総称される技術が注目を集めている。

このような状況の下、2010年度から2012年度の計画で経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として、電力会社9社を含む28法人が参加する「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」が進められている²⁾。本実証事業では、系統側と需要側の両面から電気エネルギーの最適利用を図ることを目標として、4つのサブWGに分かれて日本版スマート

*新規事業推進室 **製品開発部 ***システム技術研究所

グリッドの基礎技術の確立に向けた技術開発が進められている。当社は同実証事業に参画し、系統側の対策技術の一つである配電システムの電圧制御技術の高度化に向けた技術開発に取り組んでいる。本稿では、太陽光発電システムが大量に普及した際に問題となる配電系統上の課題と、上記実証事業で開発を進めている対策技術の概要及び検証結果の一例について紹介する。

2. 配電システムの電圧管理に関する諸課題

太陽光発電システム導入の政府目標である2,800万kW（2020年）のうち、約7割は住宅用であるとされている⁹⁾。太陽光発電システムの大量導入により懸念される種々の課題のうち、ここでは住宅など一般の需要家が接続される配電系統で発生が懸念される課題について述べる。

2.1 電圧上昇の問題

配電系統に太陽光発電システムが大量に連系されると、逆潮流による電圧上昇が発生する。電気事業法では需要家の受電端電圧を $101 \pm 6V$ の範囲内に収めることを求めている。太陽光発電システムが大量に接続されていない状況では、12Vの電圧管理裕度に対して電圧低下のみを考慮した運用を行えば良いが、大量接続された場合には逆潮流による電圧上昇が発生し、電圧管理裕度が相対的に大きく低下することとなる。第1図に配電系統

の電圧上昇問題を示す。

分散型電源の系統連系規程では、逆潮流を発生する分散型電源に対して、電圧が規定値を超えて上昇した場合に無効電力及び有効電力の制御により発電出力を絞る機能（電圧上昇抑制機能）の具備を求めており⁴⁾、電圧上昇によって保安上の深刻な問題が発生することはない。しかし、環境負荷の低減に有益な太陽光発電システムの有効活用を考えれば、このような発電機会の逸失は好ましい状況とは言い難い。

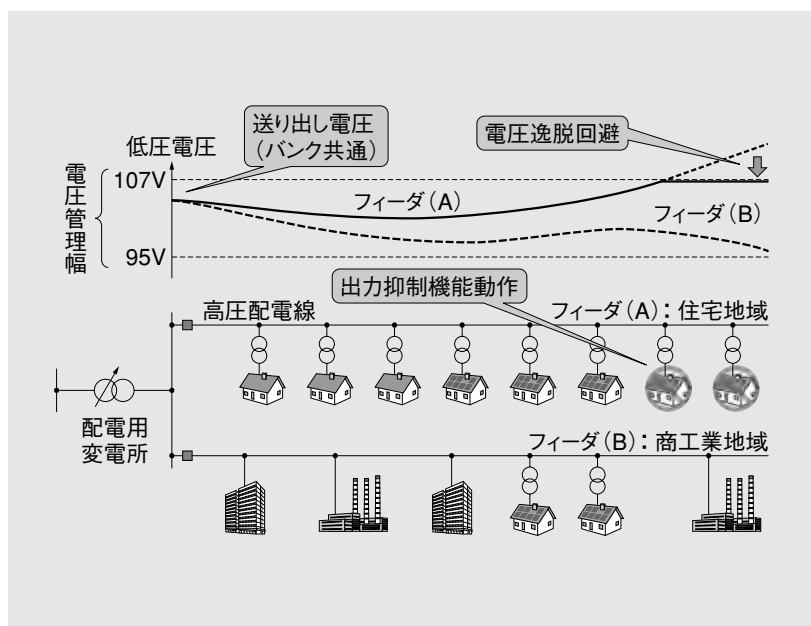
2.2 潮流偏差拡大の問題

ヒートポンプの普及が進み、更に将来に向けて電気自動車の普及が進んでいくと、これら新たな電力需要は時間帯別料金制を活用し、夜間に発生すると想定される。太陽光発電システムの大量普及と電化の進展は昼夜の潮流偏差の拡大を招き、電圧管理が更に困難化することが想定される。また、配電系統は同一の変圧器バンクから、複数のフィーダに電力を供給しており、需要特性の異なる地域が同一の変圧器バンクに接続された場合には、フィーダ間の潮流偏差が拡大し、変電所の電圧制御のみでは電圧管理が困難な状況となることが想定される。電気エネルギーの供給・利用形態が多様化することで、電力系統全体の負荷平準化効果が期待される一方で、局所的な配電系統規模では電圧管理が困難化することが課題となる。こ

のような状況に対応するためには、配電線の潮流状況を適切に把握することと、電圧をきめ細やかに制御するための制御機器の配置や制御手法の確立が求められる。

2.3 電圧変動の問題

太陽光発電システムは、日射変動によって発電出力が大きく変動する。発電出力の変動は電力系統全体の需給バランスを考えれば、ならし効果により高頻度の変動はある程度緩和されることが想定されるが、局所的な配電系統規模では発電出力の変動の影響を受け、高頻度な電圧変動を招くおそれがある。



第1図 配電系統の電圧上昇問題

太陽光発電システムなどが大量導入された場合に懸念されている配電系統上の諸課題を示す。

3. 配電システム電圧制御技術の高度化

3.1 現状の制御技術の概要

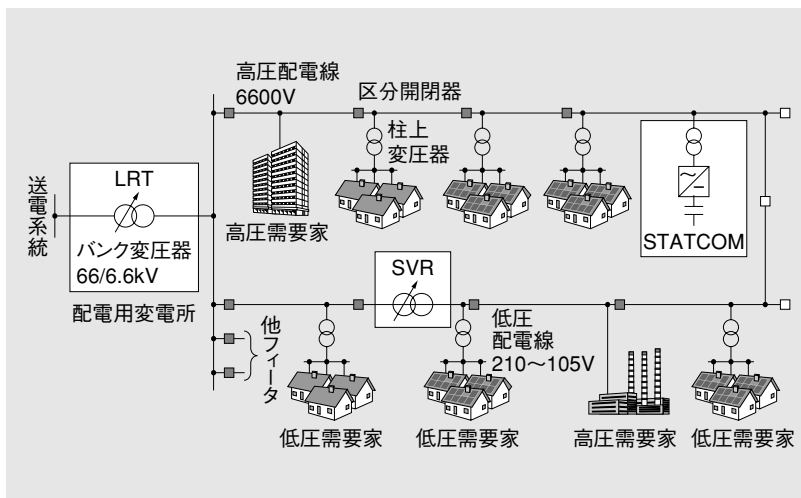
配電システムの主たる電圧制御器としては、第2図に示すとおり配電用変電所に設けられる負荷時タップ切替変圧器（LRT：Load Ratio control Transformer）、線路の途中に設置される電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）、自励式無効電力補償装置（STATCOM：STATic synchronous COMPensator）などがある⁶⁾。

LRTは配電用変圧器の二次側電圧をタップ位置により段階的に制御することが可能で、制御方式として目標とする電圧を負荷電流に応じて調整するLDC方式（Line Drop Compensation）と、あらかじめ決められた時間帯ごとのパターンに応じて制御されるプログラムコントロール方式、両方式を組み合わせた方式などがある。SVRは設置点より下流の配電線路の電圧を段階的に制御することが可能であり、制御にはLDC方式が採用されている。STATCOMは自励式の電力変換装置によって、高速かつ連続的に無効電力を制御することが可能な装置で、遅相・進相両方向の動作により、電圧下げ動作・上げ動作両方向の制御が可能である。

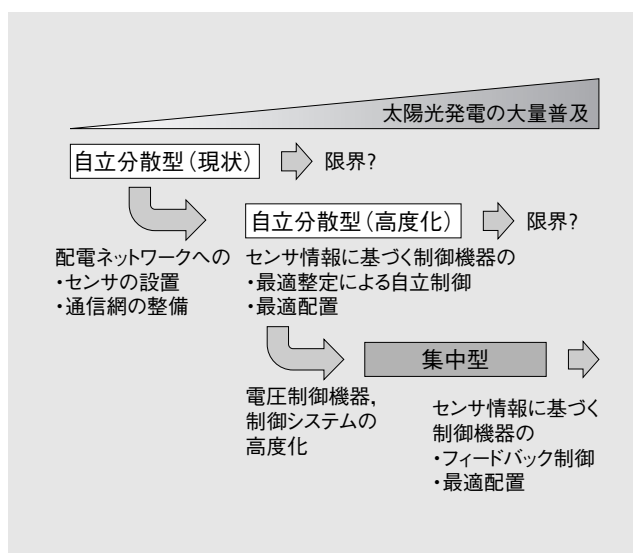
3.2 電圧制御技術の高度化に向けた取り組み

本実証事業では、今後の太陽光発電システムの普及に対応するため、配電システムの電圧制御技術を現状の自律分散型制御方式から適宜、高度化を図っていくシナリオを想定し、制御方式の開発及び検証・評価を分担して進めている。第3図に実証事業におけるシナリオを示す。

現状の電圧制御では、電圧制御機器を自端情報に基づいた自律分散制御で、かつ固定的な制御整定値により運用している。また現状ではほとんどの配電システムが、配電用変電所の送り出し点のみの計測情報しか収集していないが、現在各所で配電線路上にセンサを設置して計測情報を常時収集するシステムが構築され始めている。本実証事業では、配電線路上のセンサ情報が取得可能であることを前提としている。高度化の初期の段階では、電圧制御機器の最適な配置、自律分散制御による



第2図 配電システムの構成と電圧制御機器
配電システムで一般的に用いられる電圧制御機器を示す。



第3図 実証事業におけるシナリオ

実証事業のうち、配電システムの電圧制御技術に関する検討課題を扱っているサブWGへの参加者全体で設定している研究グループでのシナリオを示す。

電圧制御機器の制御パラメータを最適に整定することで運用することを想定している。さらに将来的には自律分散制御から、直接電圧制御機器を遠隔から操作する集中制御へと移行していくとのシナリオを想定している。当社は、自律分散型制御方式の高度化を担当している。

3.3 自律分散制御技術の高度化

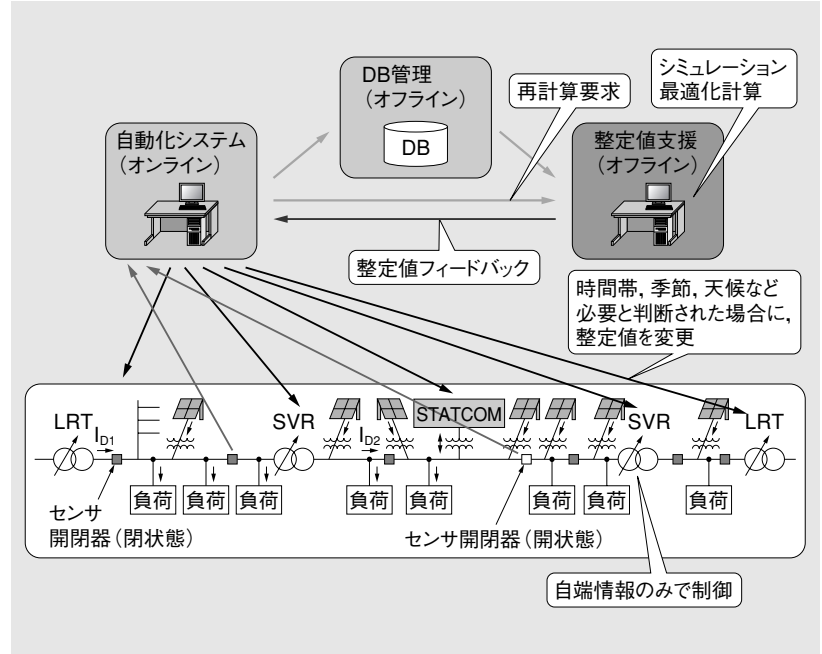
太陽光発電システムの普及の初期段階では、電圧制御機器の新・増設により対応可能であるが、やがて現実的な機器数を考慮すると、従来の自律分散型制御だけでは対応が困難となることが想定される。これに対して、自律分散制御機器の制御パラメータを状況に合わせ、遠隔から容易に変更

可能な環境を整え、季節や時間帯、天候に合わせて制御パラメータを適宜変更する方策が一つの有効な手段であると考えられる。本高度化手法(A)では、配電線の電圧プロファイルの履歴をデータベースから参照し、LRT及びSVRの制御パラメータをオフライン支援ツールで最適化する。第4図に自律分散制御の高度化手法(A)を示す。配電線路上のセンサ情報を活用して制御パラメータを最適化することで、自端情報に基づく制御ロジックではあるが、配電線路全体の電圧プロファイルが考慮された制御性能を得ることが可能となる。また、得られた制御パラメータを系統の状況に応じて遠隔から変更可能とすることで、太陽光発電システムの普及状況や季節ごとの電力潮流の変化に柔軟に対応することが可能となる。高度化手法(A)ではフィードバック制御ループに、配電自動化システムを含まない構成をとるため、情報通信網の高速化や高度な冗長性を必須としない設備構成を取り得るメリットがあると考えている。

さらに太陽光発電の普及が進むと、自端情報だけでは電圧のプロファイルを的確に捉えられない状況が発生すると想定される。このような場合には、電圧制御機器の自端情報に加えて、他点の計測情報を活用する手法が有効であると考えられる。本高度化手法(B)においても常時の電圧制御は自律分散制御を基本として、過去の電圧プロファイルからの制御パラメータの最適化を図り、配電自動化システムをフィードバック制御ループに含まない構成とすることを想定している。第5図に自律分散制御の高度化手法(B)を示す。

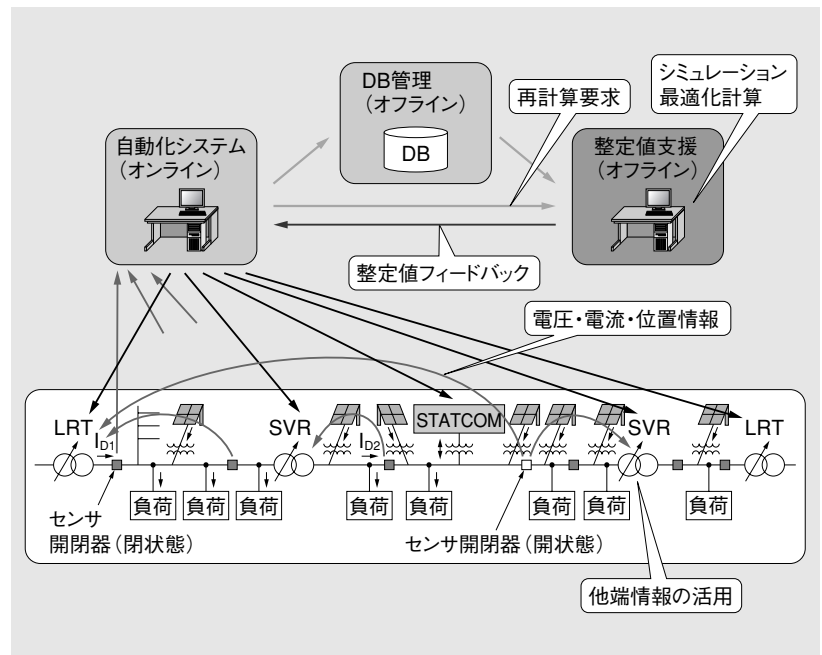
3.4 制御パラメータの最適化手法

現状のLRT及びSVRに採用されているLDC制御では、自端で計測可能な電圧・電流から、下流の負荷中心点を想定して負荷中心点までの線路イン



第4図 自律分散制御の高度化手法(A)

自律分散電圧制御を高度化した手法(A)の全体システム概念図を示す。電圧制御機器は現状と同等の自律分散制御のままとして、制御パラメータのみを最適化して、適宜変更可能とすることを想定する。



第5図 自律分散制御の高度化手法(B)

自律分散電圧制御を高度化した手法(B)の全体システム概念図を示す。電圧制御機器は自律分散制御であるが、自端のみでなく線路上の他の点も計測値として利用可能な状況を想定する。運用管理手法は高度化手法(A)と同等である。

ピーダンスを制御整定値として設定し、負荷中心点における電圧推定値を管理値内に収めるよう動作する。これらの制御整定値には物理的な意味があることから、一般的には一定の決定ロジックに従って決定される。最適整定ではこれらの決定ロジックとは異なり、制御整定値の物理的な意味合

いを無視して、種々の潮流パターンでシミュレーションを行った結果得られる、電圧管理誤差の積算値が最小となるような最適パラメータを求めて整定値とする。最適化とは、パラメータの組み合わせで決まる評価値（目的関数）を最小（あるいは最大）にする最適なパラメータを求めることである。

最適化の手法としては目的関数を解析的に解く厳密解法と、様々なパラメータの組み合わせについて評価値を求め、より良い組み合わせを見いだす近似解法がある。現実の多くの最適化問題は目的関数が複雑で厳密解を求めることが困難なため、何らかの近似解法が適用される。本稿で扱うパラメータ最適化問題では、制御パラメータに応じて決まる電圧分布の時間プロファイルの評価値とすることから、評価値を求めるために、配電システムの時間応答シミュレーションを実行する必要がある。時間応答シミュレーションにはある程度の計算時間を要するため、現実的な計算時間で最適解（近似解）を求めるためには、試行できるパラメータの組み合わせは全組み合わせの中のごく一部に限定される。したがって、どのパラメータの組み合わせに対してシミュレーションを実施するかを選択することが最適化手法の重要な要素となる。パラメータの組み合わせを選定する手法としては、種々のメタ・ヒューリスティクス手法が考案されている。第6図にシミュレーションとメタ・ヒューリスティクス手法を使った最適化の演算フ

ローを示す。最適化演算では、はじめに適当なパラメータの組み合わせを幾つか用意してシミュレーションを実行し評価値を得る。これらを基に新たなパラメータ組み合わせを決定し、シミュレーションを実行し新たな評価値を得る。これらを適切な回数だけ繰り返した後、評価値が最も良好なパラメータの組み合わせを最適解として算出し、演算を終了する。

本稿の最適化問題では、上記演算フローのうち、最適化演算には、PSO（Particle Swarm Optimization：粒子群最適化）アルゴリズムを適用して、早稲田大学が開発した演算ロジック⁶⁾を採用している。またシミュレーション演算にはBFS法を適用して当社が開発した時間応答潮流計算プログラム⁷⁾を用いている。

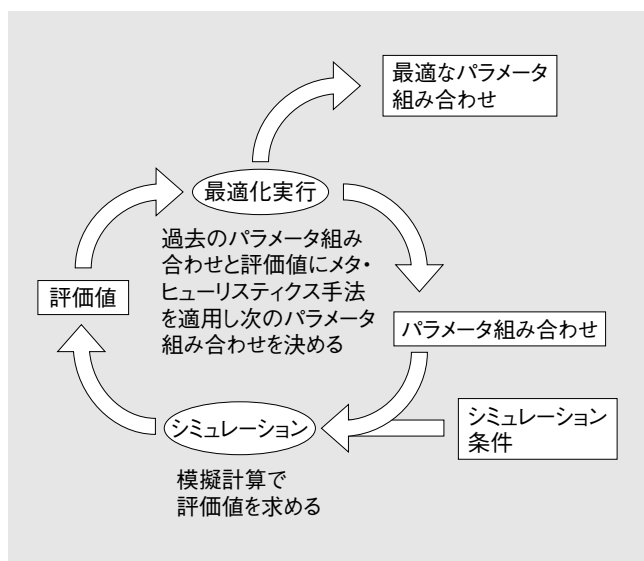
自律分散制御の制御パラメータを最適化する際には、用いる負荷や発電パターンを選定することが重要である。様々な需給パターンを用いて最適化を行えば、得られる制御パラメータは適用可能な範囲が広いものとなるが、最適化演算に要する時間が過大となり、有限回数の演算では最適解が得られない場合も起こり得る。したがって、できる限り少ないデータ量で種々の需給パターンを考慮に含められるようなパターンを選定することで、最適化演算の可解性の向上と演算時間の短縮を図ることが重要である。

4. 自律分散型電圧制御の評価

電圧制御技術の高度化に関するシナリオの評価を行うことを目的として、所定の制御技術を適用した場合に、どの程度の太陽光発電システムの導入に耐えうるかの検証を進めている。以下では、当社が担当する自律分散制御（現状手法）と自律分散制御（高度化手法(A)）の検証結果について述べる。

4.1 評価方法

検証を行うにあたり、配電システムモデルとして第4図に示すモデルを用いた。本モデルは、昼間の電力需要が大きい「繁華街地区」、線路亘長が短く住宅が密集した地域への配電を想定した「住宅地区」、線路亘長が長く住宅が散在する地域への配電を想定した「農山村地区」と、3つの異なる需要地域を1つの変圧器バンクでカバーする系統構成を



第6図 最適化の演算フロー図
制御パラメータの最適化を行う際の演算フロー図を示す。

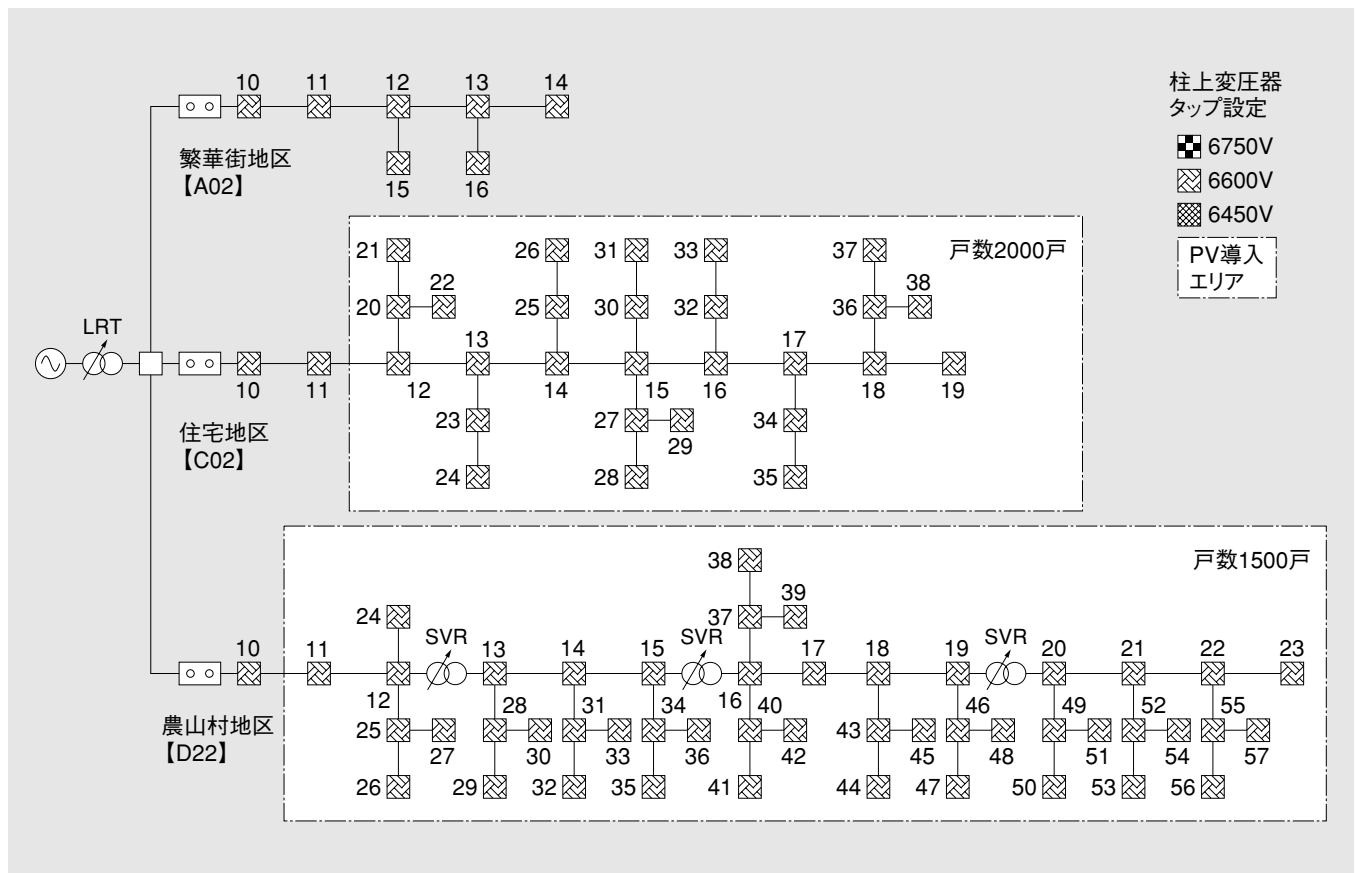
想定したものである。「繁華街地区」は昼の需要が大きく、夜間の需要が小さい。一方の「住宅地区」と「農山村地区」は昼の需要が小さい上に太陽光発電システムからの逆潮流が発生し、夜間の需要が大きい。したがって、本モデルはフィード間の電圧プロファイルが著しく不均一であり、線路亘長の長いフィードを含むことから、電圧制御の観点からは非常に過酷な条件を想定したものである。なお、本モデルは電気協同研究の報告書⁽⁸⁾に記載された配電線路モデルを組み合わせたものである。第7図に検証用配電システムモデルを示す。

「繁華街地区」では、日中の電力需要が大きな負荷パターンを想定した。「住宅地区」及び「農山村地区」の負荷パターンと太陽光発電システムの発電パターンには、群馬県太田市で実施された(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の実証事業⁽⁹⁾で得られた平均的な住宅負荷パターンと日射量計測値を用いた。住宅軒数は「住宅地区」を2000軒、「農山村地区」を1500軒として、配電線の距離按分により各ノードに割り当てる住宅軒数を設定する等分布モデルとした。さらに1軒あたり

の太陽光発電システムの容量は3.5kWを想定し、末端の住宅から順次導入されることを想定した。

以上、本モデルは現実的に考えられる範囲内で、非常に過酷な系統条件を想定した構成としている。また、LRTの制御方式にはLDC方式を、SVRの制御方式には分散型電源対応型のLDC方式を想定した。SVRは「農山村地区」に3台が設置されていることを想定した。

現状の方式を想定した自律分散制御では、太陽光(PV)導入率0%の時に配電線路上の電圧を適正值に維持可能な最適整定値を設定し、整定値を固定したまま対応可能なPV導入率を算定することとした。高度化手法(A)を想定した自律分散制御では、PV導入率の変化に伴い、季節ごとに制御パラメータを適宜最適化し、対応可能なPV導入率を算定することとした。いずれも全ノード電圧の30分間平均値が適正範囲に収まれば可、収まらなければ不可との判定を行う。ここで、電圧の適正範囲は、高圧配電線の電圧を低圧換算した値として103~107Vと設定した。高度化手法(A)の最適化を行う際には、太陽光発電システムの発電パターンとし



第7図 検証用配電システムモデル

提案する制御手法の性能検証を行うために構築した検証用配電システムモデルの説明図である。

第1表 評価結果

シミュレーションにより得られた、現状手法の自律分散制御と高度化手法(A)のそれぞれが耐えうる太陽光発電システムの導入量の評価結果をまとめたものである。

| PV導入率 (%) | 現状手法 [固定整定方式] | | 高度化手法(A) [動的整定方式] | |
|-----------|---------------|-----|-------------------|-----|
| | 夏期 | 中間期 | 夏期 | 中間期 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 12 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 13 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 14 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 15 | 0 | 2 | 未評価 | 未評価 |
| 16 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 17 | 0 | 0 | 未評価 | 未評価 |
| 18 | 0 | 4 | 未評価 | 未評価 |
| 19 | 1 | 13 | 未評価 | 未評価 |
| 20 | 8 | 18 | 0 | 0 |
| 30 | 未評価 | 未評価 | 0 | 1 |
| 40 | 未評価 | 未評価 | 1 | 16 |

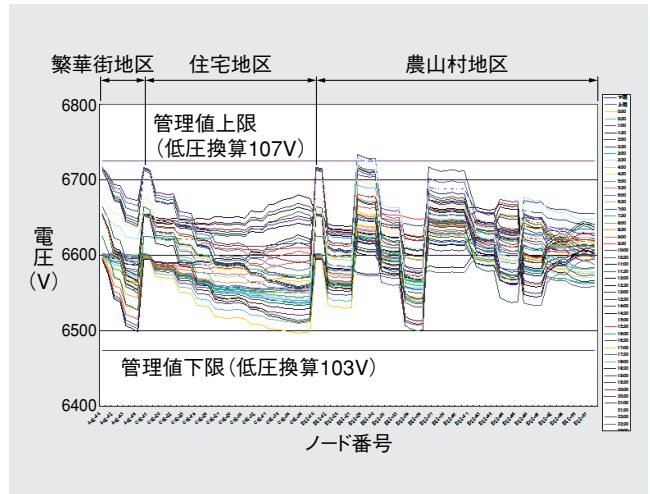
注. 表中の数字は、1か月間で電圧逸脱が発生した日数を示す。
 : 導入量限界, : 逸脱発生, : 未評価

て、快晴日・曇天日・変動日（2種類）の4種類のパターンを選定して用いることとした。一方、評価を行う際には、夏季の1か月間、中間期の1か月間の実計測データに基づく負荷・発電パターンによる評価を行うこととした。

4.2 評価結果

以下では、4.1項で述べた系統条件及び評価方法の下、デジタルシミュレーションにより得られた評価結果について示す。現状の自律分散制御方式と高度化手法(A)のPV導入率の限界はそれぞれ、14%と20%との結果が得られた。第1表に評価結果を示す。また第8図は現状方式の自律分散制御でPV導入率20%とした場合の結果で、一部電圧が管理値の上限を逸脱している。一方、第9図は第8図と同一条件で、高度化手法(A)の自律分散制御を適用した場合の結果で、電圧逸脱が解消している。

本実証事業では一つの目安として、2020年度時点で2,800万kW、2030年度時点で5,300万kWの太陽光発電システムが普及した場合に、一般住宅へのPV導入率を第2表に示した値と想定している。この目安は、PV導入目標に対する住宅の割合を70%、全国の住宅軒数を3,000万軒、住宅一軒あたりの平均的なPV容量3.5kWとして設定したもので



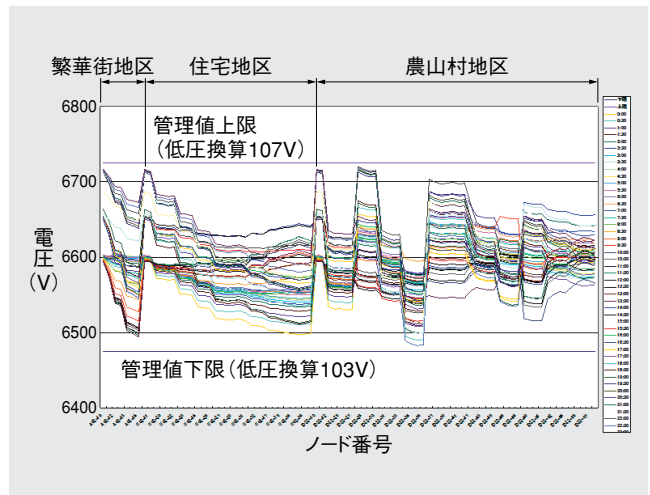
第8図 自律分散制御（現状手法）の検証結果

現状方式自律分散制御のシミュレーションで得られた時刻ごとの電圧分布の一例を示す。

第2表 PV導入目標とPV普及割合の想定

実証事業で想定している将来の太陽光発電システムの導入量の目安をまとめたものである。

| | PV導入目標 | 一般住宅への普及割合(軒数) |
|-------|----------|----------------|
| 2020年 | 2,800万kW | 約1/5 (20%) |
| 2030年 | 5,300万kW | 約1/3 (33%) |



第9図 高度化手法(A)の検証結果

高度化手法(A)自律分散制御のシミュレーションで得られた時刻ごとの電圧分布の一例を示す。

ある。(2,800万kW × 0.7 / 3.5kW = 560万軒, 3,000万軒 / 560万軒 ≒ 5.36 ≒ 1/5)

このような想定を行った場合には、2020年時点では高度化手法(A)の適用限界を超えるケースが発生するおそれがあり、電圧制御機器の増設、自律分散制御の更なる高度化、集中制御の適用など、次のステップへの移行を図っていく必要があると言える。

4.3 今後の課題

今回の検討では、LRTの制御方式としてLDC方式を想定した。今後はプロコン方式に対しても適用可能な最適化手法の検討を進めたい。また、他端情報を参照可能な高度化手法(B)についても、適用限界となるPV導入率の算定を行っていく。さらに本実証事業では、早稲田大学が所有する配電系統アナログシミュレータ⁽¹⁰⁾により実証検証を進めていく計画である。デジタルシミュレーションでは理想的な条件で、比較的規模の大きなシステムモデルを扱うことが可能である一方、現実の電力システムで考慮が必要となる不確定性を表現することが難しい。今後はデジタルシミュレーションをベースに開発を進めた制御手法をアナログシミュレータ上で評価することで、新たな課題抽出と課題に対する対策手法の開発を進めたい。

5. む す び

本稿では、今後想定される太陽光発電システムの普及に伴って顕在化する可能性がある配電系統の電圧管理に関する課題と、課題解決に向けたシナリオを紹介し、シナリオの一過程で有効な対策手法になると考えられる、自律分散制御の高度化方式について、その概要と適用した場合のシミュレーション結果の一例を示した。これらの内容は経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として、早稲田大学 林教授のご指導の下、参加する電力各社の配電系統技術者の皆様の助言や協力を仰ぎ、検討を進めているものである。今後も実証事業での技術開発の一端を担い、関係各位と密な連携を図るとともに、参加各位の指導を賜りながら価値ある成果が得られるよう努力していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 「経済危機対策」に関する政府・与党会議，経済対策閣僚会議合同会議，2009年4月，2009
- (2) 横山明彦ほか：「次世代送配電系統最適制御技術実証」，電気評論，2011年10月号，2011

- (3) 経済産業省：「太陽光発電の導入シナリオ（試算）」，総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会，第36回配付資料，2009
- (4) 日本電気協会：「系統連系規程JEAC 9701-2010」，2010
- (5) 林泰弘：「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望」，電気学会B部門誌，Vol. 129, No. 4, 2009
- (6) 花井悠二ほか：「配電系統模擬実験設備ANSWERを用いたLRTとSVRの制御パラメータ決定手法の検証」，平成20年電気学会B部門大会，予稿集，24-13~24-14，2008
- (7) 田邊隆之ほか：「集中連系型太陽光発電システムにおける出力抑制回避技術の開発(2)-シミュレーションによる出力抑制量の推定-」，平成19年電気学会全国大会，予稿集，52-3~52-4，2005
- (8) 電気協同研究：「配電系統の高調波障害防止対策」，第37巻3号，1981
- (9) 株関電工：「集中連系型太陽光発電システム実証研究」，新エネルギー・産業技術総合開発機構，2008
- (10) 早稲田大学，林研究室ホームページ (<http://www.eb.waseda.ac.jp/hayashi/index2.html>)

《執筆者紹介》



田邊隆之 Takayuki Tanabe
電力システムの新規事業開発に従事



中島廣則 Hironori Nakashima
コンピュータシステムの設計・開発に従事



林 孝則 Takanori Hayashi
情報通信関連の開発に従事