

配電システムの電圧制御シミュレーション ～蓄電池を活用した電圧適正化に関する検討～

■ 山下 裕輔

Yusuke Yamashita

■ 茂木 規行

Noriyuki Motegi

1 はじめに

地球温暖化の原因の一つとして挙げられている二酸化炭素 (CO₂) の排出量を削減するため、気候変動枠組条約第 22 回締約国会議 (COP22) にて世界各国が CO₂ 排出削減目標を掲げ、日本においても政府主導のもと温暖化対策の取り組みが進められている。その取り組みの一つとして、再生可能エネルギーの導入が促進されており、固定価格買取制度^{注1)} 導入以降、特に太陽光発電 (以下 PV) の導入が加速している。PV は発電時に CO₂ を排出しないメリットがある一方、発電量が天候に左右されるため、PV の導入拡大に伴い、電力系統での余剰電力発生や周波数変動増大、電圧変動増大といった、電力の安定供給・電力の品質に及ぼす影響が問題視されている。特に、電圧変動に関する課題は、配電系統において PV が局所的に接続された場合に顕在化しやすい。PV 導入の拡大途上である現段階でも、すでに法定の電圧維持範囲から逸脱のおそれがあり、電圧変動を抑制するための追加対策を実施しなければならない箇所が増えつつある。

従来から実施されている電圧変動を抑制する対策として、変圧器のタップを変更することで変圧器二次側電圧を調整する負荷時タップ切換変圧器 (LRT: Load Ratio control Transformer)・ステップ式電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator) や、無効電力を調整することで電圧を安定化させる静止型無効電力補償装置 (SVC: Static Voltage Compensator) といった、電圧調整機器の設置がなされている。これらの対策は通常、一般送配電事業者側で実施するものであり、将来、さらに多くの分散型電源導入が進むと、より高度な電圧制御のための方法が求められると考えられる。この高度化を実現するための手法の一つとして、PV とともに今後普及が見込まれる蓄電池システムの活用がある。蓄電池を有効活用することにより、需要家内のエネルギーマネジメント用途以外にも、電力系統の安定化への寄与が可能となる。最近では、分散配置されている需要家側機器を束ねて統合制御し、あたかも一つの発電所のように制御することで、系統制御の高度化に寄与できるバーチャルパワープラント (VPP) に関連する複数の実証事業が行われており、蓄電池をはじめとする需要家側機器の制御は、よりいっそう期待されている。

東光高岳では、分散型電源の大量導入を見据えた電圧

適正化のための技術開発・製品開発に取り組んでおり、筆者らは、配電システムのシミュレーション解析および配電ネットワーク実証試験場 (以下試験場) で行う試験の双方により、電圧適正化技術の研究開発を行っている。試験場には、PV や蓄電池、模擬負荷装置などを備えており、これらの設備を用いてさまざまな系統状況での検証を行うことができる。現在、PV ならびに蓄電池が普及した次世代の配電システムを想定し、蓄電池の活用による電圧適正化効果に関して検討を進めている。

本稿では、配電系統における蓄電池の運用を検討するための新たなモデル環境を構築して、動作検証のために行ったシミュレーションに関して紹介する。

2 蓄電池導入評価モデル構築

従来の試験場シミュレーションモデル⁽¹⁾ では、主に LRT や SVR, PV, 負荷などのモデルが構築されている。このモデルをベースに、蓄電池システムを活用した評価が可能な環境を構築するため、新たに蓄電池モデルを作成した。

2.1 蓄電池モデルの概要

蓄電池システムは、パワーコンディショナを介して指令に応じた電力の充放電を行う。SOC^{注2)} が上限または下限に達した場合、それ以上の充放電はできなくなる。このような SOC に応じた充放電電力管理のための蓄電池モデルを、**図 1** に示す。構築したモデルは、蓄電池の SOC を計算し、容量を超える充放電指令を受け取った場合に充放電が制限される動作とした。

2.2 蓄電池モデルの動作

2.1 で示したモデルについて、簡単な充放電指令波形を与えたときの動作確認に関して述べる。蓄電池容量と最大入出力のそれぞれで充放電制限が現れることを確認

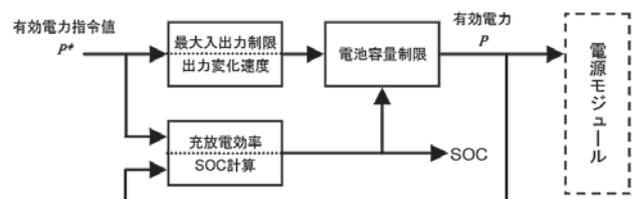


図 1 蓄電池モデルの簡易ブロック図

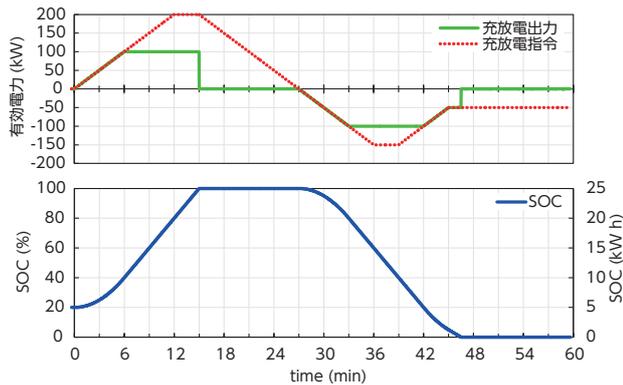


図2 蓄電池モデルの動作確認波形

するため、下記条件にて蓄電池モデルを動作させたときの入出力波形を図2に示す。

(条件) 最大入出力: ± 100 kW 初期SOC: 20% (5 kWh)
蓄電池容量: 25 kWh 充放電損失: 0 kW

図2では、充電側と放電側の両方の挙動を示している。充放電出力は、最大入出力 ± 100 kW の範囲内で変化し、SOCが0%に達すると放電停止、100%に達すると充電停止となる。

3 シミュレーションによる蓄電池制御効果の基礎検討

構築した蓄電池モデルを含めて、シミュレーションにより、蓄電池の制御が配電系統電圧適正化に及ぼす影響・効果を検討する。本稿では一検討として、蓄電池の充電が要請される時間帯を想定し、制御対象となる配電線内の蓄電池の分布が異なるときに電圧変動へ与える影響を比較する。

3.1 シミュレーションモデルおよび条件

(1) シミュレーションモデル

図3はシミュレーション評価用の配電系統モデルであり、1配電線あたり10個所の需要家ノードと配電線インピーダンス ($r + jx$) から構成されている。このモデルは、シミュレーションと試験場との比較検証を考慮したものである。試験場設備においては、蓄電池および負荷がそれぞれ配電線上の異なる位置に接続切替が可能

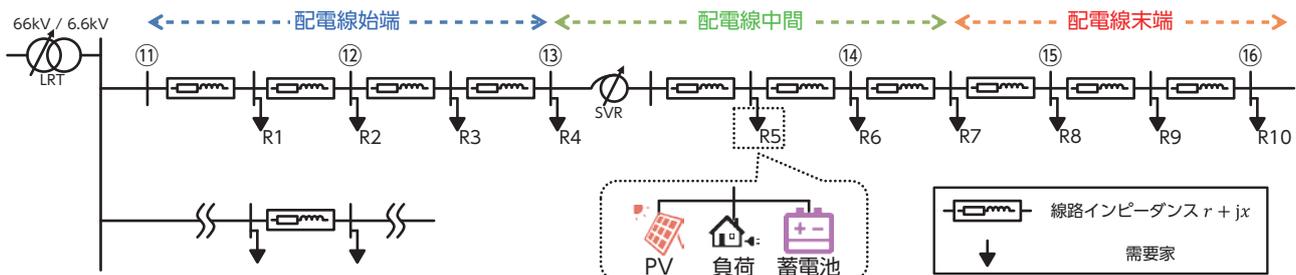


図3 シミュレーション評価用配電系統モデル

で、この構成を反映したシミュレーション評価モデルとした。需要家ノードを配電線上の位置に応じて、始端・中間・末端の3グループに分類し、後述する負荷・PV・蓄電池の接続分布条件により、各需要家ノードに負荷電力と発電電力を配分する。

(2) 需要家の負荷電力およびPV出力データ

全需要家の受電端合計電力として、図4のデータを利用する。電力値は、有効電力の消費が正、遅れの無効電力が正である。この電力値を、負荷・PV・蓄電池それぞれについて設定する始端・中間・末端の分布条件に応じて、各需要家ノードに割り当てる形とした。

使用する負荷電力およびPV出力の時系列データには、東光高岳小山事業所内の設備にて測定した1秒間隔の実測値を換算して用いた。評価対象のPVデータとして電圧上昇が発生しやすい快晴日の出力曲線、負荷として軽負荷期の類似データ数日間分を平均化した負荷曲線を選んだ。配電線の軽負荷期平均負荷電力⁽²⁾のピーク約1,500 kWに対して、その2倍である3,000 kW程度がPV出力のピークとなるデータに換算している。

(3) 条件

電力系統全体における需給バランス調整の面で、軽負荷時間帯かつPV出力が大きい期間に、PVの余剰出力を抑制するため蓄電池の充電が要請されるケースを想定する。このとき、配電系統内の複数蓄電池が充電を行う場合、各蓄電池の位置分布により、電圧変動の様相に差が生じる。需要家に対して蓄電池充電要請を与える管理

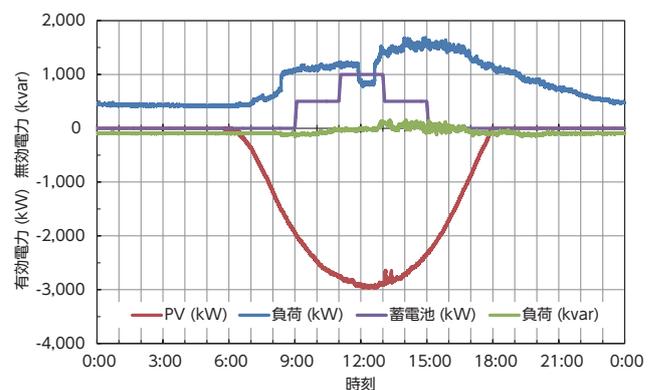


図4 PV出力と負荷電力および蓄電池充電電力波形 (全需要家の受電端電力総和)

者側の立場で考えると、蓄電池充電による逆潮流電力抑制と同時に、制御する蓄電池位置の選び方によっては電圧適正化が見込めると捉えることもできる。この電圧変動の違いを評価するため、表1に示す配電線上の蓄電池分布が異なるケースでシミュレーションを行った。表1では、全蓄電池を100%としたときの、始端・中間・末端の分布条件を示している。蓄電池充電制御を行わない case 0 を基準ケースとして、制御対象蓄電池が始端に偏っている case 1、均等に位置する case 2、末端に偏っている case 3 を比較する。図5に、各需要家に配置されている PV・負荷・蓄電池の分布条件を、ケース別一覧で示す。ここで、各需要家の PV・負荷・蓄電池の最大電力を合計すると、それぞれ 3,000 kW・1,500 kW・1,000 kW である。例えば、case 1 の場合、需要家全体で 1,000 kW の充電を行うとき、それぞれの需要家が充電する電力の配分は、始端グループの範囲で 1,000 kW の 80% である 800 kW が充電されることになる。なお、10 個所の需要家を 3 グループに等分しているため、需要家 R4 の電力は始端と中間を按分、R7 は中間と末端を按分した値としている。

そのほか、各ケースで共通の条件を表2に示す。今回の評価では、蓄電池の充電運用に対して容量に不足はないものとし、蓄電池の充放電に伴う電圧変動分を検証するため、LRT および SVR のタップは固定としている。

表1 評価パターン一覧

case No.	蓄電池の有無	制御実施蓄電池分布 (%)		
		始端	中間	末端
case 0	蓄電池なし (基準ケース)	—	—	—
case 1	蓄電池あり	80.0	10.0	10.0
case 2	蓄電池あり	33.3	33.3	33.3
case 3	蓄電池あり	10.0	10.0	80.0

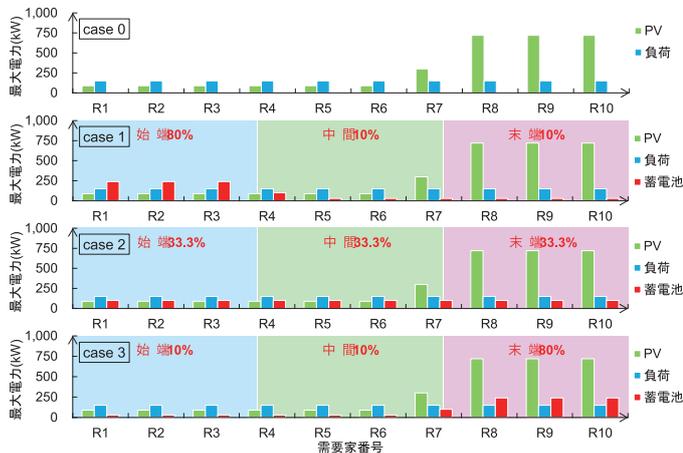


図5 各需要家の PV・負荷・蓄電池分布内訳

3.2 結果

表2の各 case について電圧変動の違いを評価する。図6は、電圧上昇が最も大きい配電線末端地点(図3の⑯)の LRT 二次側を基準とした電圧変動である。case 0 の曲線が蓄電池制御のない基準ケースの電圧変動であり、それ以外の蓄電池制御を実施した3ケースでは、すべての場合において蓄電池の充電が行われている時間帯に電圧上昇が軽減されていることが確認できる。

配電線各地点間の電圧変動比較のため、電圧偏差を評価時間(15h)すべてにわたって積算した結果を図7に示す。横軸の数字は、図3内に記す数字に対応した配電線地点を表しており数字が大きくなるほど配電線末端に近い。縦軸は、LRT 二次側電圧からの電圧上昇幅または降下幅の絶対値を積算した量で、この値が大きいほど電圧変動の発生頻度が高いことを表す。すべてのケースに共通して、配電線末端に近いほど電圧上昇が大きくなっているのは、末端付近に集中して接続されている PV によるものである。case 0 (蓄電池制御なし) と case 1~3 (蓄電池制御実施の3ケース) とを比較すると、配電

表2 シミュレーション条件

シミュレーション時間	15 h (6:00 ~ 21:00)		
線路インピーダンス $r+jx$ (Ω)	0.12 + j0.31		
LRT 一次側電圧	66 kV 一定		
LRT 変圧比	66 kV : 6.6 kV 固定		
SVR 変圧比	1 : 1 固定		
負荷配電線分布 (%)	始端	中間	末端
	33.3	33.3	33.3
PV 配電線分布 (%) (電圧上昇が過酷な末端集中分布)	始端	中間	末端
	10.0	10.0	80.0
蓄電池合計充電指令	9:00~11:00	11:00~13:00	13:00~15:00
	500 kW	1,000 kW	500 kW

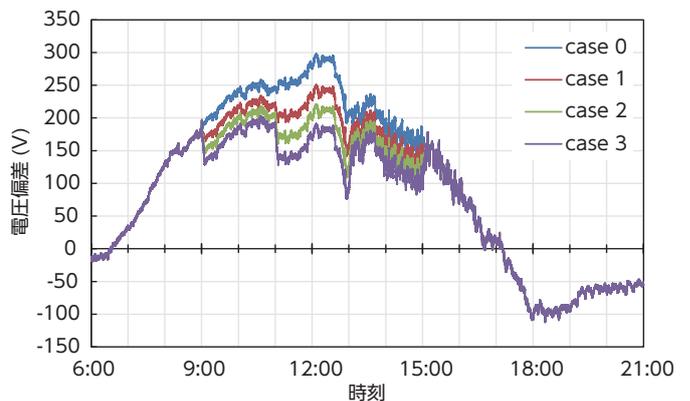


図6 各 case の配電線末端電圧変動

線すべての個所で蓄電池制御実施により電圧上昇が軽減されている。蓄電池制御実施の case 1, case 2, case 3 を比べると、末端付近ではケース間で電圧偏差積算量に差があるが、始端付近では末端に比べて大きな違いが見られない。これは、電圧変動が線路インピーダンスと線路電流のベクトル積で決まるため、LRT からの距離が近い始端では電圧変動が小さくなることに関係している。

図 8 は、配電線の始端から末端まですべての個所の電圧変動を総合評価した結果で、ケース間で電圧上昇抑制効果を比較している。グラフの縦軸は、図 7 の電圧偏差積算量を各配電線地点で合計した値で、蓄電池制御なしの case 0 を 100% として表記した。この結果より、制御する蓄電池の配置が、始端→均等→末端の順に電圧上昇抑制効果が大きいことが確認できる。

3.3 考察・まとめ

case 0 から case 3 の各結果より、PV が配電線末端付近に集中して接続された配電線において、PV 出力を蓄電池に充電する場合、充電制御する蓄電池が末端に集中するほど電圧上昇を軽減する効果が高いことを確認した。また、系統管理者側の視点で考えると、配電線各所に点在する蓄電池をすべて均等に制御するよりも、個別に制御するほうが電圧適正化に貢献できることがわかった。PV 出力に伴う逆潮流が及ぼす配電システムの安定性に

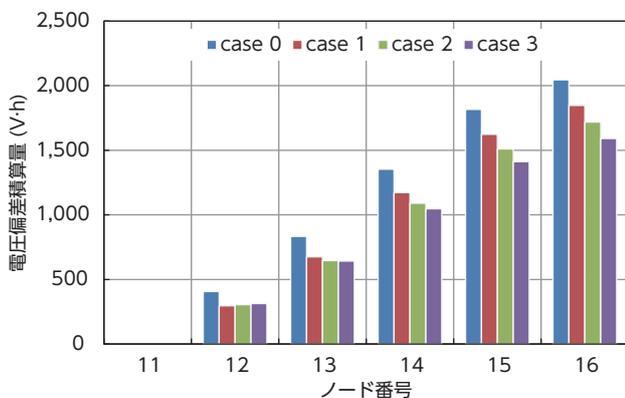


図 7 配電線各地点の電圧偏差積算量

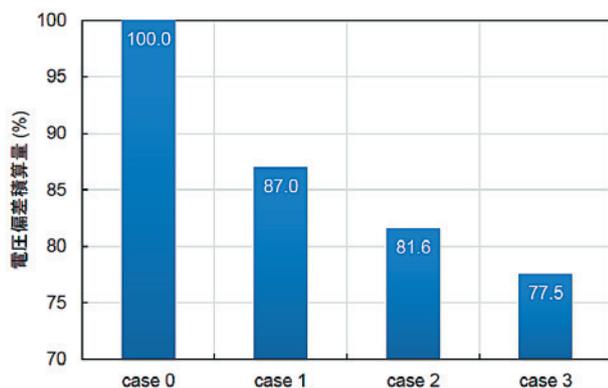


図 8 電圧偏差積算量の各 case 間比較

与える影響を解消するためには、PV で発電された電力はすべてその場で消費もしくは PV 併設の蓄電池で吸収する地産地消の考えが理想である。今回の結果においても、末端に集中した PV 出力をその場所に近い蓄電池で吸収することが電圧適正化に効果的であると言える。

本稿では、蓄電池を単純な充電パターンに絞って一般傾向を整理したが、蓄電池運用計画の経済性や利便性など複数条件を考慮すると、それぞれに最適なケースが異なる可能性がある。さまざまな配電システムの状況を想定した検証や、実用的な課題を明らかとするためには、本稿で紹介したシミュレーション技術と合わせた試験場の活用が重要である。

4 おわりに

将来の PV ならびに蓄電池の普及が拡大した配電システムを想定して、蓄電池の活用を検討するためのシミュレーション環境の構築とともに、蓄電池の制御が配電システムの電圧適正化に寄与できることを確認した。

今後は、蓄電池容量の制限やばらつきを配慮した制御、電圧調整機器の制御との協調など、さらに詳細な条件を考慮したシミュレーションを行うとともに、試験場で実施する試験とを組み合わせた検証により、実証環境の高度化や電圧制御ロジックの開発を進める。

参考文献

- (1) 尾崎卓也他：「配電システムの電圧制御シミュレーション」、東光高岳技報, No.3, pp.2-5 (2016)
- (2) 一般社団法人電気協同研究会：「配電システムにおける力率問題とその対応」、電気協同研究, Vol.66, No.1 (2011.1)

語句説明

注 1) 固定価格買取制度：再生可能エネルギーで発電した電気を、国が定める固定価格で一定期間電気事業者が買い取ることを約束する制度。

注 2) SOC：State of Charge の略で、蓄電池が電池容量に対して充電されているレベルを示す。満充電状態で 100% となる。



山下 裕輔

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
次世代配電ネットワークに関する研究・開発に従事



茂木 規行

技術開発本部
技術研究所 次世代システム技術グループ 所属
次世代配電ネットワークに関する研究・開発に従事