

博士論文概要

論文題目

PV 大量導入とデマンドレスポンスに対応した
系統制御機器と蓄電池の協調電圧制御に関する研究

Study on Cooperative Voltage Control
with Battery Energy Storage and Voltage Regulator
for Penetration of PV and Demand Response

申請者

吉永	淳
Jun	YOSHINAGA

電気・情報生命専攻 先進電気エネルギーシステム研究

2016年3月

配電系統は変電所から需要側に電気を供給する電力ネットワークであり，適正電圧維持や供給信頼度確保といった観点から総合的に設備構築・運用・制御が行われなければならない。2011年の東日本大震災以降，環境負荷の軽減や供給力拡大を目的として太陽光発電（PV: Photovoltaic）などの再生可能エネルギーの導入拡大や，電気事業者からの価格情報やインセンティブなどに基づき需要家の負荷抑制を誘導し，電力のピークカット，ピークシフトを実現するデマンドレスポンス（DR: Demand Response）の導入が国主導で進められている。しかしながら，再生可能エネルギーによる逆潮流や，デマンドレスポンスの発動・解除に伴う急激な負荷変動が拡大すると，配電系統の潮流に大きな変化をもたらし，既設の電圧制御機器である負荷時タップ切替変圧器（LRT: Load Ratio control Transformer）や自動電圧調整装置（SVR: Step Voltage Regulator）では補償しきれず，電気事業法で定められた適正電圧維持が困難になる恐れがある。この対策の1つとして蓄電池を配電系統に設置して電圧補償を行うことが有効であるが，出力方式（有効電力または無効電力），設置電圧階級（高圧系統または低圧系統），配置（集中または分散）や配電線路の形態など評価するパラメータが多岐に亘るため，出力方式，設置電圧階級や配置についてこれまで統合的に評価する手法はない。また，配電系統に蓄電池を設置して電圧制御を行う際，従来のように対策機器を対処療法的に電圧逸脱発生箇所に設置すると，応答速度の速い蓄電池の出力で系統電圧が改善されてしまうため，LRTやSVRは動作せずに，蓄電池が出力を継続して適正電圧維持することとなり，電圧制御に必要な蓄電池容量や設備コストが増大するという課題が存在する。蓄電池はコスト・運用の観点から小型・小出力化が望ましく，これを実現するには既設の電圧制御装置と協調して制御の役割分担を行う必要があるが，これらの協調電圧制御手法はいまだ確立されていない。一方，デマンドレスポンスの発動時は，複数の需要家の負荷抑制および抑制解除が一斉に行われるため，配電線単位で見ると系統電圧が急変し，分オーダーの動作時限を持つ電圧制御装置では補償遅れが生じ，負荷削減量や配電系統の形態（線路互長，電線の太さなど）によっては適正電圧を逸脱し，太陽光発電の出力抑制や一斉解列が懸念されるなど配電系統の電圧変動に関する問題提起がされているものの，LRTやSVRや蓄電池の電圧制御分担を考慮した具体的な対策の提案までは至っていない。

本論文では上述した課題を解決するため，太陽光発電の大量連系やデマンドレスポンスが普及拡大した配電系統の電圧対策機器として蓄電池を設置した場合に，単位出力あたりの電圧改善効果が最大となる蓄電池の出力方式と配置に関する評価手法（①蓄電池出力・配置評価手法）を提案し，その手法を基盤として，蓄電池の電圧制御出力に応じてLRTやSVRを強制的に制御する能動的協調電圧制御手法（②能動的協調電圧制御手法）並びに電圧変動の短周期成分と長周期成分を

分離して蓄電池と LRT や SVR で制御分担する分担型協調電圧制御手法（③機能分担型協調電圧制御手法）を提案した。さらに，太陽光発電が大量連系された配電システムやデマンドレスポンスが普及して電圧逸脱が生じている配電システムにおいて，数値シミュレーションや配電システムシミュレータ実験を通して提案手法の有効性を検証した。

本論文は全 5 章で構成され，第 1 章は「序論」として，本論文の背景と目的および論文の構成について説明し，3 つの提案する手法および有効性の検証結果についてそれぞれ第 2 章～第 4 章に記載する。

第 2 章では，①蓄電池出力・配置評価手法として 4 つの地区区分（工業，住宅，繁華街，農山村）と 2 種類の線路亘長（平均，長亘長）を用いた配電システム標準解析モデルを構築し，蓄電池の単位出力あたりの電圧改善効果が最大となるような出力方式（有効電力または無効電力），設置電圧階級（高圧または低圧）および配置（集中または分散）を潮流解析に基づき選定する手法を提案した。提案手法を用いたシミュレーション結果より，蓄電池の単位出力あたりの電圧改善効果が最も高いのは無効電力出力方式で，設置個所は高圧配電システムの末端に集中配置する場合であり，蓄電池無効電力の単位出力（Mvar）あたりの電圧改善効果としては，適正電圧 $\pm 6\%$ に対して 1Mvar あたり 1%～8%の効果があることを明らかにした。

第 3 章では，電圧逸脱が生じている太陽光発電が連系した配電システムに，第 2 章の提案手法（①蓄電池出力・配置評価手法）で得られた蓄電池の出力方式と配置を用いて，蓄電池容量を最小化する「蓄電池と LRT と SVR との協調電圧制御手法（②能動的協調電圧制御手法）」を提案した。これまで蓄電池や静止型無効電力補償装置（SVC: Static Var Compensator）など無効電力補償装置を配電システムに用いて電圧制御を行う手法としては，既設の電圧制御機器との不感帯幅を変えて協調を図る制御方法などが提案されているが，電圧変動の大きさや変化率によっては LRT と SVR の動作が限定され，結果として蓄電池出力のみで電圧制御が行われ，必要となる蓄電池の高出力・大容量化が懸念される。そこで配電システムに電圧変動が生じた場合，応答速度の速い蓄電池が即応して電圧改善を行い，蓄電池出力が継続した場合の出力積算量を管理し，基準値を超えた際は瞬時的な電圧変動ではなく長周期的な電圧変動と判断して LRT と SVR にタップ動作指令を与える能動的な協調電圧制御手法を提案した。この制御手法では，協調制御なしのケースにおいて蓄電池が全補償していた電圧制御のうち，長周期的な電圧変動の補償を LRT と SVR に分担させている。提案手法の妥当性については，晴天日（1 パターン），曇天日（2 パターン）の 3 パターンの気象条件の下，シミュレーションおよび配電システムシミュレータを用いて，蓄電池が非設置のケースと協調制御を行わな

いケース（非協調制御）との比較・検証を行い，提案手法では全ての気象条件下で電圧逸脱を解消できるとともに，LRTとSVRのタップ動作回数を蓄電池非設置のケースと比較して増やすことなく，蓄電池容量を非協調制御のケースと比較して79～92%削減できることを明らかにした。

第4章では，ピーク電力抑制や環境負荷低減の新たな対策として今後普及が見込まれるデマンドレスポンスに着目し，デマンドレスポンスの発動・解除時に「電圧変動の短周期成分と長周期成分を分離して蓄電池とLRTとSVRとの制御分担する機能分担型協調電圧制御手法(③機能分担型協調電圧制御手法)」を提案した。提案手法は既設のLRTとSVRのみで電圧制御を行う手法ならびに蓄電池とLRTとSVRで機能分担を行う協調電圧制御手法の2つの手法で構成されている。

既設のLRTとSVRのみで電圧制御を行う手法は，線路長が短くデマンドレスポンスによる電圧変動が小さい配電システムでの対策として提案している。デマンドレスポンスによる負荷削減量は，予め契約等で決められた削減量を要請することから事前に把握できることに着目し，デマンドレスポンスによる削減量と配電線に設置されたセンサ内蔵開閉器からの現地情報に基づきデマンドレスポンスの発動後の配電システム電圧を推定し，デマンドレスポンスの発動や解除時に適切なタップ制御指令を与える電圧予測制御手法である。この手法は従来の自律制御手法において，デマンドレスポンスの発動後にLRTやSVRが電圧逸脱を検出してタップ動作する制御遅れにより生じていた電圧逸脱に対し，電圧予測により制御遅れを解消することで，配電システムシミュレータを用いた検証により，LRTとSVRタップ動作回数の合計値が従来手法と比較して6回から8回(130%増)に増えるものの，従来手法で発生していた電圧逸脱を解消できることを確認し，提案手法の有効性を検証した。

一方，蓄電池とLRTとSVRによる協調電圧制御手法は，線路長が長くデマンドレスポンスによる電圧変動が大きいため，蓄電池が必要となる配電システムでの対策として提案している。提案手法は電圧制御目標点の計測電圧の移動平均および計測電圧との偏差を用いて，急激な変化の成分(偏差分)のみ蓄電池で出力を行い，それ以外の緩やかな変動(移動平均)はLRTとSVRで電圧制御を行う電圧変動の短周期成分と長周期成分を分離して制御分担する機能分担型協調電圧制御手法である。従来手法との比較・検証を行い，従来の電圧手法で発生していたデマンドレスポンスの開始時及び解除時の電圧逸脱を解消できるとともに，LRTとSVRタップ動作回数は従来手法より増やすことなく，適正電圧維持に必要な蓄電池容量を非協調制御の場合と比較して95～99%削減できることを明らかにした。

第5章は結論であり，本論文の総括，今後の課題及び展望について言及する。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 吉永 淳 印

(2016年 2月 現在)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
論文	<p>○ 1. 吉永淳, 赤木覚, 伊藤雅一, 林泰弘, 石橋一成, 高橋尚之「デマンドレスポンス発動時の配電系統電圧変動問題と蓄電池と SVR の協調電圧制御手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.4, 2016年4月 pp1-10. (掲載決定)</p> <p>○ 2. 吉永淳, 赤木覚, 伊藤雅一, 林泰弘, 石橋一成, 「PV 導入量拡大を目的とした LRT および SVR と蓄電池による協調電圧制御手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.3, 2016年3月 pp291-301. (掲載決定)</p>
講演 国際会議 全件査読 あり	<p>○ 1. <u>J. Yoshinaga</u>, W. Hirohashi, H. Ishii, and Y. Hayashi, “Demonstrations of Communication Standards for Automated Demand Response and Smart Grid,” CIGRE Session 46, Aug. 2016. (採択決定)</p> <p>2. <u>J. Yoshinaga</u>, W. Hirohashi, Y. Hayashi, Y. Isoe, J. Miyake, and S. Tsuchiya, “Demonstrations of Communication Standards for Demand Response and Smart House,” The 6th International Conference on Renewable and Distributed Energy Resources (IREN 2014), Nov. 2014.</p> <p>3. <u>J. Yoshinaga</u>, W. Hirohashi, Y. Hayashi, M. Wada, and, Y. Isoe, “Multi-objective Control Method of Battery Energy Storage System for Distribution System,” CIRED Workshop - Rome, Paper 0029, June. 2014.</p>
国内会議	<p>1. 吉永淳, 赤木覚, 林泰弘, 石橋一成, 「PV 導入拡大に対応した SVR と蓄電池との協調電圧制御手法の検討」, 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, PE-4-2, No.193, 2015.</p> <p>2. 吉永淳, 林泰弘, 石橋一成, 「PV 導入限界量拡大を目的とした蓄電池による有効・無効電力制御」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, PE-3-3, No.6, (論文 I), 2014.</p> <p>3. 吉永淳, 赤木覚, 林泰弘, 「PV 導入限界量拡大を目的とした蓄電池による有効・無効電力制御法の検討」, 平成 26 年電気学会全国大会, PE-6-221, 2014.</p> <p>4. 三好龍之介・吉永淳・林泰弘: 「地区区分を考慮した配電系統モデルにおける柱上変圧器細分化と配電線太線化による PV 導入限界量の評価」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, P21, 2013.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
その他 （講演） 1., 2. は 査読あり	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="288 371 1455 555">1. <u>J. Yoshinaga</u>, W. Hirohashi, Y. Hayashi, Y. Isoe, J. Miyake, S. Tsuchiya, and M. Wada, “Islanding Operation Methods Integrated with Multiple Power Supplies and HEMS,” 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST 2015) CIGRE SC C6 Colloquim Vienna, IEEE Explore pp.436-441, Sep. 2015. <li data-bbox="288 600 1455 745">2. <u>J. Yoshinaga</u>, W. Hirohashi, Y. Hayashi, M. Wada, and, Y. Isoe, “Islanding Operation Technology Integrated with Multiple Power Supplies,” 23th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 23rd International Conference & Exhibition) - Lyon, Paper 0294, June. 2015. <li data-bbox="288 790 1455 936">3. Y. Yamamoto, S. Yoshizawa, <u>J. Yoshinaga</u>, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigetou, and, H. Nomura, “Verification of efficiency of searching methods determining optimal control parameters of advanced SVRs,” Proc. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), pp.1076-1082, May. 2014. <li data-bbox="288 981 1455 1126">4. S. Yoshizawa, Y. Yamamoto, <u>J. Yoshinaga</u>, Y. Hayashi, S. Sasaki, T. Shigetou, and, H. Nomura, “Novel voltage control of multiple step voltage regulators in a distribution system,” Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp.1-5, Feb. 2014. <li data-bbox="288 1171 1455 1283">5. 山本祐也, 芳澤信哉, <u>吉永淳</u>, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「次世代 SVR の多段設置を想定した PV 連系系統の最適整定値決定手法」, 平成 25 年電気学会 電力・エネルギー部門大会, pp.13-14, 2013. <li data-bbox="288 1328 1455 1440">6. 芳澤信哉, 山本祐也, <u>吉永淳</u>, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, 「多段設置された SVR の最適整定値決定手法の評価」, 平成 25 年電気学会 全国大会講演論文集, pp.410-411, 2013.