

博士論文審査報告書

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 7 月

東日本大震災以降の需給構造の変革に伴い、環境負荷低減や供給力確保といった課題解決の一環として、太陽光発電(PV: Photovoltaic)の普及拡大や、供給力と等価な価値としての需要家側の負荷削減を誘導するデマンドレスポンス(DR: Demand Response)の普及が国主導で進められている。しかし、配電系統にPVやDRが急速に普及拡大するとPVの出力変動やDRによる負荷の急変に伴う電圧変動が生じ、既設の電圧制御装置である負荷時タップ切替装置(LRT: Load Ratio control Transformer)や自動電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator)では、適正電圧($101 \pm 6V$)維持が困難になる。対策の一つとして、蓄電池を配電系統に設置して電圧制御を行うことが考えられるが、設備コストの抑制や保守・運用の観点から蓄電池の小型・小出力化(蓄電池容量の最小化)は不可欠である。また、PVからの逆流や天候による出力の急変による電圧変動とDRの発動・解除時の負荷の急変に伴う電圧変動は、勾配や変化幅といった様相が異なるため、それぞれの電圧変動に対応した電圧制御手法の開発が必要となるが、未だ手法は確立されていない。

そこで、本論文では、PVの大量導入とDRの普及拡大に伴う多様で複雑な電圧変動にそれぞれ対応できるように、蓄電池容量の最小化を図りつつ、既設の電圧制御機器(LRT、SVR)との制御分担を考慮した協調型の新たな電圧制御手法を提案している。具体的には、PVの大量導入の電圧変動に対しては、蓄電池容量の最小化を目的として、制御分担が蓄電池に偏らないよう蓄電池の出力積算値が閾値を超えた際に強制的にSVRのタップ制御を行うことで、緩やかな電圧変動はSVRのタップ制御で分担し、急峻な電圧変動のみ蓄電池の無効電力出力で補償する能動的協調電圧制御手法を提案している。

一方、DRの普及拡大に伴う電圧変動に対しては、蓄電池設置地点の電圧計測値とその移動平均(長周期電圧変動成分)との偏差(短周期電圧変動成分)を用いて、電圧変動成分の長周期成分をSVRに分担し、短周期成分を蓄電池で補償して機能分担を行うことで蓄電池容量を最小化可能な機能分担型の協調電圧制御手法を提案している。さらに、数値シミュレーション及び配電系統シミュレータを用いた実験を通して、PV大量導入による電圧変動に対応した能動的協調電圧制御手法、並びにDR普及拡大による電圧変動に対応した機能分担型協調電圧制御手法の有効性をそれぞれ検証している。

本論文は一連の成果を取りまとめたものであり、全5章で構成されている。以下に、各章における研究成果の概要とその評価結果について示す。

第1章は序論であり、東日本大震災以降のわが国のエネルギー需給形態の変遷や新たな情勢変化としてPVの大量導入やDR(需要家側の需給調整)が普及拡大した際の電圧面の課題を示すとともに、本論文の位置づけを説明している。

第2章では、配電系統に蓄電池を設置して電圧制御を行う際の効果的な蓄電池出力・配置評価手法を提案している。電圧改善効果は、配電系統モデル

の形態及び負荷プロファイルにより変わるため、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（平均亘長、長亘長）を用いた配電系統標準解析モデルを構築し、それぞれのモデルにおいて全低圧需要家にPVを設置した際に適正電圧逸脱が発生しないような対策について検証している。蓄電池は有効・無効電力の入出力制御が可能で、配電系統に設置する際に検討すべきパラメータは多岐に亘るため、これまで統合的に評価する手法は確立されておらず、従来手法では電圧問題発生箇所への対処療法的な設置が前提となっていた。提案手法は、全ての検討すべきパラメータを勘案した上で、蓄電池の単位出力あたりの電圧改善効果が最大となる出力方式及び配置を選定し、蓄電池の容量選定が可能になるなど配電系統の運用者が選定しやすく、設備コスト削減にも繋がる実用的な手法となっており評価できる。

第3章では、PVの大量連系時の電圧変動に対し、第2章で選定した蓄電池の出力方式と配置を用いて、既設の電圧制御装置であるLRTやSVRと協調電圧制御を行うことにより蓄電池の出力・容量をできるだけ小さくできる「蓄電池とLRTとSVRとの能動的協調電圧制御手法」を提案している。配電系統に蓄電池を設置して電圧制御を行うと、蓄電池とLRTやSVRの応答速度の違いから蓄電池出力が継続して適正電圧維持が保たれることとなり、必要となる蓄電池の大容量化が懸念されている。また、先行研究では蓄電池とLRTやSVRとの不感帯幅を変えて協調を図る協調電圧制御手法が提案されているが、PV出力による電圧変動の勾配や変動幅によっては協調がうまく図れず、蓄電池の出力の拡大が懸念される。提案する協調電圧制御手法は、電圧変動に対する蓄電池の出力積算値を管理し、LRTや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であり、従来の受動的な協調電圧制御手法と比較して電圧変動の大きさや勾配に依存せず、LRTやSVRの確実な動作が期待できる。PV大量導入により電圧逸脱が生じていた試験ケースにおいて、提案手法を用いることで電圧逸脱を解消しつつ、電圧制御装置のみの場合のタップ動作回数より増やすことなく、協調制御なしの場合と比較して蓄電池の出力(kvar)及び容量(kVA)をそれぞれ最大で44%及び93%削減できることが数値シミュレーション及び試験環境の双方で検証され、提案手法の有効性が明らかにされたことは評価に値する。

第4章では、DRの普及拡大時の電圧変動に対する電圧制御手法について提案している。DRはピーク電力の抑制やシフトなど新たな技術として普及が期待される反面、普及拡大した際の負荷の一斉抑制・解除に伴う電圧変動などが問題提起されているが、これまでに具体的な対策は検討されていない。

本論文ではDR導入期及び普及期の2段階に分けて、電圧対策の規模や設備コストの観点から電圧変動制御手法をそれぞれ提案している。DRの導入期は電圧変動量も比較的小さいことから、センサ内蔵開閉器情報に基づく電圧予測結果に基づき既設の電圧制御装置の制御を行う集中制御手法であり、比較的簡易な手法である。一方、DRの普及期は電圧変動量も多いため、「蓄

電池を用いて既設の電圧制御装置と制御分担を行う「機能分担型協調電圧制御手法」を提案している。この手法は、蓄電池設置地点の計測電圧とその移動平均との偏差を取り、急激な変動成分（偏差分）を蓄電池で分担し、それ以外の緩やかな変動成分（移動平均）を LRT と SVR とで分担することで電圧制御に必要な蓄電池の出力及び容量の大幅な削減が可能となる。配電システムシミュレータを用いた検証の結果、従来手法で発生していた電圧逸脱が解消されるとともに、LRT と SVR タップ動作回数は従来手法より増やすことなく、蓄電池の出力及び容量を非協調時と比較してそれぞれ最大で 64% 及び 99% 削減できることを明らかにしており、DR の普及時の対策としての蓄電設備の大幅なコストダウンに寄与できるなど高く評価できる。

第 5 章は本論文の結論であり、研究成果全体をとりまとめている。今後の課題として蓄電池を実現場へ展開する際、数十年の運用に資する汎用的な電圧制御パラメータ決定手法の確立や、蓄電池に複数の機能を持たせることで蓄電池の設備利用率や付加価値が高まるなど、エネルギー管理システム (EMS: Energy Management System) 運用方法の深彫りの必要性が述べられており、本論文の提案手法が発展性に富むものであることが示されている。

以上を要約すると、本論文は、PV の大量導入や DR が普及拡大した際に生じる電圧変動課題に対して、新たな制御機器として注目を集めている蓄電池を活用し、PV 大量導入及び DR 普及拡大のそれぞれの事象により生じる電圧変動の勾配や変化幅に対し、蓄電池及び既設の電圧制御装置との機能分担を考慮した能動的協調電圧制御手法及び機能分担型協調電圧制御手法を新たに提案し、数値シミュレーション及び配電システムシミュレータでの検証を通じて提案手法の有効性を明らかにしたものである。本論文で得られた成果は、新たな EMS 制御機器としての蓄電池の効果的な運用手法の一端を担うことが期待され、再生可能エネルギーの導入拡大とデマンドレスポンスの普及拡大及び電力の安定供給に貢献するなど、電気エネルギーシステム工学の発展に寄与するものである。したがって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値があるものと認める。

2016 年 6 月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 林 泰弘

早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 岩本 伸一

早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 石山 敦士

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 若尾 真治