

蓄電池を遠隔制御するVPPシステムの構築と実証

Construction and Demonstration of VPP System for Controlling Storage Batteries

松田 喜勝* 原田 忠克* 今野 良太郎* 堂下 貴弘** 及川 智文**
Yoshikatsu MATSUDA Tadakatsu HARADA Ryotaro KONNO Takahiro DOSHITA Tomofumi OIKAWA

要 旨

近年、地球温暖化や気候変動の対策の一つとして再生可能エネルギーの導入が進められている。しかし、再生可能エネルギーの多くは太陽光や風力による自然変動電源であるため、その普及拡大に伴い、電力の安定利用に対する影響が懸念されている。電力市場取引においては、発電余剰になる場合は市場価格が下がり、発電不足になる場合は市場価格が上がる。筆者らは、小売電気事業者の電力市場調達コストを最小化することは、再生可能エネルギーの安定利用に繋がると考えた。そのため、特別高圧の電力需要施設に設置された蓄電池をクラウド側から遠隔制御するVPP (Virtual Power Plant) システムを構築した。その施設の受電電力を目標値以下に抑えながら、30分ごとの市場価格の予測値を基に充放電制御を行い、市場調達コストを最小化する仕組みである。このシステムを14日間連続稼働させる実証を行ったところ、このシステムを使用しなかった場合と比較して市場調達コストを計156,204円削減できることを確認した。この結果は、計算上の最大削減金額（仮に市場価格の実績値を基に充放電制御を行っていた場合の削減金額）に対して約84%の達成率であり、妥当な結果であると言える。

ABSTRACT

Renewable energy sources have been increasingly introduced to counter the impacts of climate change. Since power generation from renewable sources, such as wind and solar energy, depends on inconsistent weather conditions, methods for stable supply of the renewable power are being explored through various experimentations. In power market transactions, market prices decrease when there is a surplus in power generation and increase when there is a shortage. We assumed that minimizing the market procurement costs for retail electricity providers would contribute to the stable supply of renewable energy. Therefore, we built a Virtual Power Plant (VPP) system that remotely controls batteries installed at extra-high-voltage power consumption facilities. This system aims to minimize market power procurement costs by controlling charging and discharging of the batteries based on the price forecasts. Experimental verification with 14 days of system operation demonstrated that the system reduced electricity procurement costs by 156 K JPY compared to a scenario without the system. This result corresponds to approximately 84% of the theoretical maximum reduction calculated under ideal charge/discharge control based on actual market prices, indicating that the outcome is feasible.

* リコーデジタルサービスBU 環境・エネルギー事業センター
Environment & Energy Business Center, Ricoh Digital Services BU

** リコーITソリューションズ株式会社 デジタルサービス&プロダクツ事業本部 東日本開発センター
East Japan Development Center, Digital Service & Products Business Group, Ricoh IT Solutions Co., Ltd.

1. 背景と目的

1-1 再生可能エネルギーの普及と電力安定化の課題

近年、地球温暖化や気候変動リスクが社会問題となり、脱炭素化に向けた取り組みが社会全体で進められている。電力分野においては、脱炭素化の手段の一つとして再生可能エネルギーの導入が拡大している。しかし、再生可能エネルギーの多くは太陽光や風力による自然変動電源であるため、その普及拡大に伴い、電力の安定利用に対する影響が懸念されている¹⁾。

電力を安定利用するには、電気をつくる量（供給）と電気の消費量（需要）が、同じ時に同じ量である必要がある。これを、同時同量と言う²⁾。日本の電力系統（発電所でつくられた電気を、変電所、送電線、配電線を通して電力需要家に届けるための一連のシステム）では、東日本で50Hz、西日本で60Hzという一定の電気の周波数が維持されており、多くの電気製品はそれら周波数での使用を前提として設計されている（例えば、モーターの回転速度、電子機器のクロック回路など）。電力系統の電気の周波数は、発電所の発電機の回転速度によって決まり、もし供給>需要の状態であれば負荷が小さいため発電機の回転数が上がり周波数は上昇し、逆に需要>供給の状態であれば負荷が大きいため発電機の回転数が下がり周波数は低下する。つまり、電力需給の同時同量を維持できない場合には、電気の周波数が乱れてしまい、安定利用が難しくなる。そのため、予測される電力需要に合わせて発電計画が決められる。小売電気事業者は需要計画値と需要実績値の同時同量が求められ、発電事業者は発電計画値と発電実績値の同時同量が求められており、これらによって電力需給バランスが成立している。しかし、前述の通り、太陽光や風力による自然変動電源の普及拡大が発電側の同時同量の達成を今後難しくしていくと考えられている³⁾。

1-2 小売電気事業

1-2-1 電力の小売自由化

電力分野では、2000年3月に特別高圧の区分の小売自由化が始まって以降、高圧や低圧の区分にも拡大し、また、日本卸電力取引所（JEPX）における電力取引が開始された。2016年4月に全面的に小売自由化となった。小売自由化により、電気料金の引き下げやサービスの多様化などの競争が活性化し、電力需要家が自身の価値観に合わせて小売契約先や電気料金メニューを自由に選択できるようになった。現在、小売電気事業者の登録数は700社を超えるまでに増大した。

1-2-2 需給調整業務

小売電気事業者は電力需要家に供給する電力の調達を行う。発電事業者との相対取引やベースロード市場での取引など複数の調達手段を組み合わせる中長期的な電力調達を行っている小売電気事業者も多い。Fig. 1に示す通り、小売電気事業者は、翌日の需要を予測して需要計画を作成し、中長期的に調達した電力では需要計画から不足する分をJEPXのスポット市場での取引により調達するのが一般的である。スポット市場では、翌日の一日分を30分ごとに分けた計48コマの取引が行われ、入札が10時に締め切られる。コマごとにブラインド・シングルプライスオークション方式で落札量と共にスポット市場価格が決まる⁴⁾。スポット市場価格は一日分で計48個が存在するが、時間帯ごとの電力需給バランスが影響するため、価格がそれぞれ異なる。太陽光発電の発電量が増加する昼間のコマの市場価格が下落したり、あるいは天候不順と電力需要の増大が重なった朝夕のコマの市場価格が高騰することもある。高騰するコマでの調達が必要な場合、小売電気事業者にとっては電力調達コストが増加し、経営負担が増大する恐れがある⁵⁾。

そこで、電力需給バランスの良し悪しを表すシグナルの一つであるスポット市場価格に連動して需要側の消費パターンを意図的に変えるDR（Demand

Response) への注目が高まっている⁶⁾。筆者らは、DRで電力の安定利用に寄与することが、ひいては、再生可能エネルギーの導入拡大の土台作りにも繋がると考える。

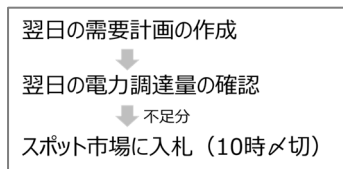


Fig. 1 Flow of electricity procurement.

1-3 従来研究

小売電気事業者が電力需要家の蓄電池を活用し、自社の電力調達コストを改善することが検討されている。家庭用蓄電池の遠隔制御により、スポット市場で安価なコマでは上げDR（蓄電池の場合は充電）で多く電力調達を行い、高価なコマでは下げDR（蓄電池の場合は放電）で需要を減らすことにより、全体的な電力調達コストの削減を図る検討が進んでいる⁷⁾。検討対象の蓄電池が家庭用蓄電池に限定されているのは、DRに対する社会の注目が高まり、資源エネルギー庁等により家庭用蓄電池のDRreadyの検討が推進されているためだと考えられる⁸⁾。DRreadyとは、通信ネットワーク経由で機器のDRを行う遠隔制御が可能なる状態のことを言う。家庭用蓄電池のDRの遠隔制御の支援サービスを提供している事業者が近年出現し始めている⁹⁾。

電気は、電圧の大きさによって、低圧、高圧、特別高圧に分類されており、家庭用蓄電池は低圧で利用される。一方、高圧や特別高圧においては小売電気事業者が電力需要家の蓄電池を活用し自社の電力調達コストを改善する取り組みの報告の例が少ない。高圧や特別高圧では、低圧におけるECHONET Liteのような広く使われる通信規格がないことが取り組み難い要因の一つと考えられる¹⁰⁾。また、区分により託送料金や電気料金の決め方に違いがあることも要因の一つとして考えられる。小売電気事業者が一般送配電事業者を支払う託送料金や、それに応じて

電力需要家が小売電気事業者に支払う電気料金は、基本料金（契約容量に応じた固定費）と電力量料金（使用量に応じた変動費）で主に構成される。高圧や特別高圧の基本料金は、直近12ヵ月に電力需要家が使用したピーク電力（受電電力の30分平均の最大値）を基に決定される¹¹⁾。そのため、高圧や特別高圧では、ピーク電力の削減と電力調達コスト削減の複数目的を考慮する必要があるため、蓄電池の充放電量の決め方が難しいと言える。

そのような状況下でも、高圧の電力需要家のピーク電力削減用蓄電池をスポット市場価格に連動させて、ピーク電力の削減と小売電気事業者の電力調達コストの削減を両立させる検討の事例がある¹²⁾。四季ごとに定めた4パターンの固定的な充放電計画を用いた検討がなされている。

また、DRの概念を広げ、各電力需要家のDRの可能性を束ねて仮想的な発電所として運用するVPP (Virtual Power Plant) の取り組みがある^{13,14)}。スポット市場を含む卸電力市場以外に、取引最小単位が大きくかつ制御に対する要件レベルが高い需給調整市場や容量市場でも取引を行うことが検討されている。複数の電力需要家の電力需要や、それら電力需要家の蓄電池の蓄電残量を統合的に考慮した充放電計画を生成し、個々の蓄電池を遠隔制御していくVPPシステムが今後求められると考えられる。

そこで筆者らは、はじめに、高圧や特別高圧の電力需要家の蓄電池をクラウド側から遠隔制御するVPPシステムを構築した。ピーク電力を目標値以下に抑え、かつスポット市場価格に連動した充放電の制御を行う仕組みである。次に、構築したVPPシステムを用い、特別高圧の電力需要家の蓄電池を遠隔制御する実証を行い、動作の妥当性を検証した。最後に、小売電気事業者の電力調達コスト削減の効果金額の試算を行った。

2. VPPシステムの構築

2-1 VPPシステムが連携する対象業務

Fig. 1に示す通り、小売電気事業者は10時までにスポット市場での翌日分の電力調達量を決めて入札する必要がある。そのため、10時以前に、VPPシステムが、蓄電池の翌日の充放電計画を生成し、かつ小売電気事業者が充放電計画を考慮し調達量を定めて入札する必要がある。それに先立ち、VPPシステムが翌日の充放電計画を生成するために、電力需要家の翌日の需要予測・発電予測、翌日のスポット市場価格の予測を行う必要がある。

2-2 システム構成と各機能

筆者らは、電力需要家の翌日の需要予測・発電予測、翌日のスポット市場価格予測、翌日の充放電計画の生成および小売電気事業者への計画連携、当日の制御指示を行うクラウドベースのVPPシステムを構築した。VPPシステムと周辺機器の各機能をTable 1に、構成図をFig. 2に示す。

通信ネットワークを介し、VPPシステムからの制御指示の受信や、VPPシステムへの制御実績の送信を行うため、ゲートウェイを蓄電池に設置した。

実制御時に、需要や発電の予測と実績の誤差が大きく、充放電計画に従う充放電制御では受電電力目標値超過や逆潮流電力が発生する可能性がある場合に、それらの回避制御を行うローカルEMS (Energy Management System) を蓄電池に設置した。

VPPシステムは、Fig. 3に示す各制約条件を満たすことを前提とし、その上で、翌日の各予測情報を用いてスポット市場での電力調達コスト削減の効果金額を最大化することを目的に最適化演算を行い、翌日の充放電計画を生成する。日ごとコマごとに電力需要やスポット価格は異なるため、従来の固定的な充放電計画では前述した効果金額の最大化を見込むことは難しい。VPPシステムのコア技術である各予測と充放電計画生成のタイミングを2-1の対象業務と同期させることで、毎日、最適な充放電計画を

生成することを可能とし、効果金額の最大化を図った。

Table 1 Functions of VPP system and devices.

構成機器	主な機能（他社機能の活用含む）
VPPシステム (クラウド)	<ul style="list-style-type: none"> ・翌日の需要予測、発電予測 ・翌日のスポット市場価格予測 ・翌日の充放電計画生成 ・外部システムとのデータ連携 ・当日の充放電制御指示
ゲートウェイ	VPPシステムと蓄電池の間の通信
ローカルEMS	<ul style="list-style-type: none"> ・受電電力の目標値超過の回避制御 ・逆潮流防止の制御

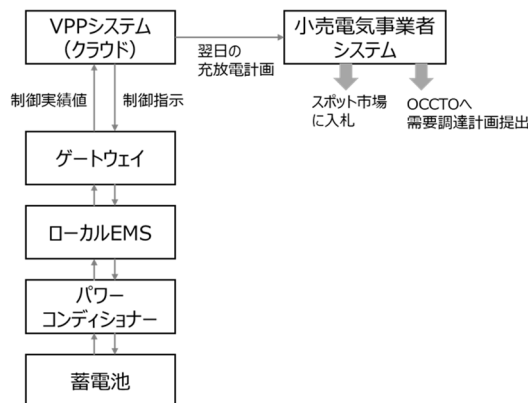


Fig. 2 Configuration of VPP system and devices.

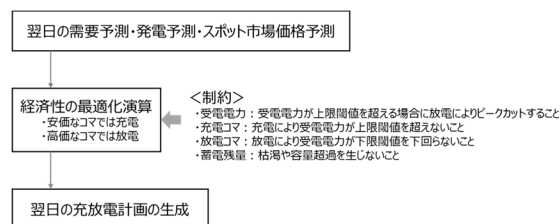


Fig. 3 Logic for creating charge/discharge plan.

3. 実証方法

3-1 実証条件

各機器の指定条件や仕様をTable 2に示す。

VPPシステムには、充放電計画生成時に必要な受電電力上下限閾値、充電電力・放電電力、充放電効

率の指定条件を与えている。各電力の概念図をFig. 4に示す。

また、ローカルEMSには、実制御時に必要な受電電力目標値超過回避制御または逆潮流防止制御が作動する受電電力の指定条件を与えている。

なお、受電電力の目標値は2000kW以下かつ逆潮流なしであり、計画生成時に最も厳しい第一段の閾値を指定し、実制御時に第二弾の閾値を指定している。

Table 2 Verification conditions.

対象機器	指定条件または仕様	適用 タイミング
VPPシステム	<ul style="list-style-type: none"> 受電電力上限閾値 1710kW 受電電力下限閾値 300kW 最大充電電力 600kW 最大放電電力 400kW 最小充電電力 150kW 最小放電電力 30kW 充放電効率 78% 	計画生成
ローカルEMS	<ul style="list-style-type: none"> 受電電力目標値超過回避制御が作動する受電電力 1900kW 逆潮流防止制御が作動する受電電力 100kW 	実制御
蓄電池・ パワーコン ディショ ナー	<ul style="list-style-type: none"> AC定格充電電力 600kW AC定格放電電力 600kW AC定格容量 3600kWh 	実制御
太陽光発電	なし	—

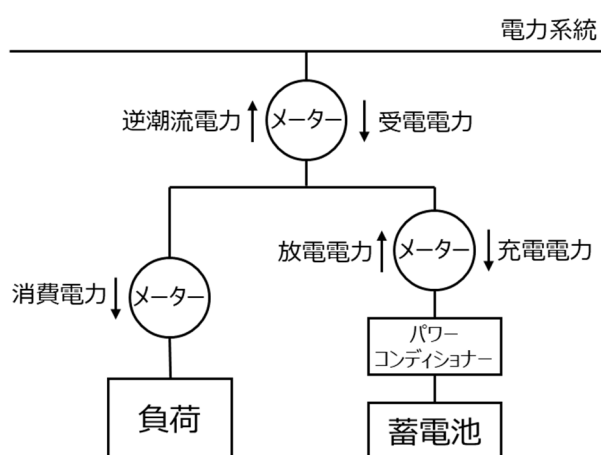


Fig. 4 Electricity flow at demand facilities.

3-2 実証内容

2025年8月28日～2025年9月10日の14日間、VPPシステムが生成した充放電計画に従って蓄電池の遠隔制御を行う。

得られた各予測値・計画値・実績値を用いて次の内容を検証する。

- 生成した充放電計画の妥当性の確認
- 充放電計画に対する充放電実績の確認
- 受電電力予測に対する受電電力実績の確認

次に、スポット市場からの電力調達コスト削減の効果金額を試算する。これは、蓄電池なしで全てスポット価格で電力調達した場合に対する効果金額である。なお、その算出においては、放電量とスポット市場の約定価格の積を効果、充電量とスポット市場の約定価格の積を損失として取り扱う。各コマにおける効果と損失を対象期間で積算したものを効果金額とする。

4. 実証結果

4-1 各予測値・計画値・実績値による検証

4-1-1 充放電計画の妥当性の確認

2025年9月2日10:00AM以前にVPPシステムが生成した2025年9月3日の充放電計画をFig. 5に示す。充電が正の値、放電が負の値となる。計画生成時における制約である受電電力の上限閾値を充電計画により超えていないこと、および受電電力の下限閾値を放電計画により下回っていないことを確認した。また、スポット市場価格予測の安価なコマに充電が割り当てられ、高価なコマに放電が割り当てられていることを確認した。また、Fig. 6に蓄電残量の計画を示しており、枯渇や容量超過がないことを確認した。なお、2025年9月3日以外の日付の充放電計画についても同様であることを確認した。

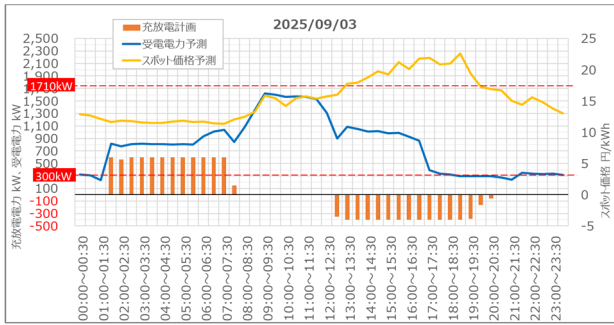


Fig. 5 Charging and discharging plan created by VPP system.

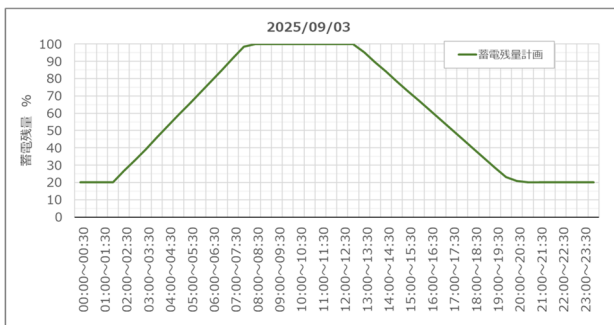


Fig. 6 Planned remaining power storage capacity.

4-1-2 充放電計画に対する充放電実績の確認

2025年9月3日の充放電実績と充放電計画の比較をFig. 7に示す。後述する一部の時間帯を除き、充放電実績が充放電計画と一致していることを確認した。そのRMSE（二乗平均平方根誤差）は0.63kWであり、誤差率としては0.1%程度と言える。

7:03～7:30では、充電実績が計画よりも低い出力であった。これは蓄電残量が満充電に近づき蓄電池が持つ保護機能の作動により充電出力が抑制されたためである。

18:29～19:30では、放電実績が計画よりも低い出力であった。これはローカルEMSによる逆流防止機能の作動により放電出力が抑制されたためである。

2025年9月3日以外の日付の充放電の予実績の比較についても同様であることを確認した。

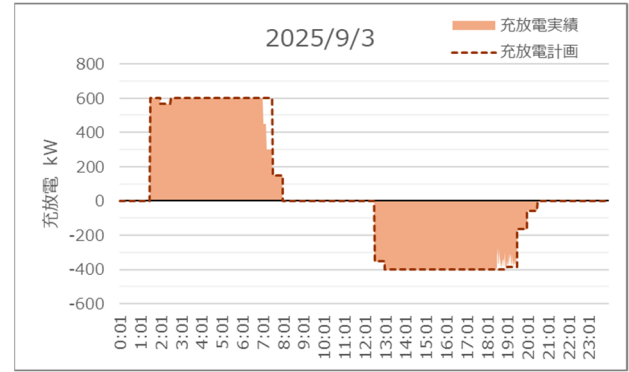


Fig. 7 Plan and actual result of charge/discharge, Sep. 3, 2025.

4-1-3 受電電力の予実績の比較

2025年9月3日の受電電力実績と受電電力予測の比較をFig. 8に示す。

17:05～20:03では、受電電力予測に対して受電電力実績が低い電力であった。その中でも4-1-2で述べた18:29～19:30では、受電電力実績が100kW（ローカルEMSの逆流防止制御の作動値）の下回りとなり100kWへの復帰を繰り返している。このことから、受電電力実績が指定値を下回った場合に放電出力を計画よりも抑制する逆流防止制御が正常に作動したことを確認した。

2025年9月3日以外の日付の受電電力の予実績の比較についても同様であることを確認した。なお、本実証期間では、受電電力が1900kWを超えることはなかったため、受電電力目標値超過の回避制御の作動機会はなかった。

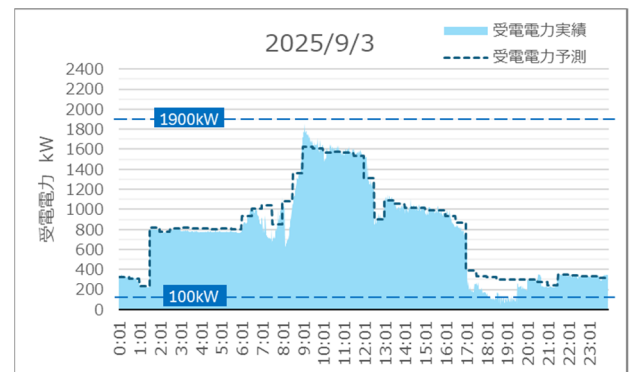


Fig. 8 Plan and actual result received power, Sep. 3, 2025.

4-2 電力調達コスト削減の効果金額の試算

電力調達コスト削減の効果金額を日単位で算出した結果とその積算をFig. 9に示す。効果が正の値、損失が負の値である。また、効果金額の算出に使用した東京電力エリアで約定したスポット市場価格をFig. 10に、蓄電池の動作実績（30分値）として、充放電量実績（30分値）をFig. 11に、蓄電残量実績（30分値）をFig. 12に示す。充電が正の値、放電が負の値である。

2025年8月28日～2025年9月10日の14日間全体での効果金額の試算結果は計156,204円であった。筆者らは、比較のため、各予測誤差および充放電制御誤差が全くない理想的なケースとして、事後に、同期間の需要実績とスポット市場価格実績を用いて最適化した充放電計画を作成しその効果金額をシミュレーションしたところ、試算結果は計185,950円であった。実証効果金額は理想ケースに対して約84%であり、各予測精度に改善の予知はあるものの、妥当な水準であると言える。

なお、効果金額はスポット市場価格に依存し、スポット市場価格は年度や季節によって異なるため、実証時期が異なれば前述の効果金額の限りではない。そのため、今回の効果金額に単純な日数の掛け算をすることで長期間の効果金額を推定することは適切ではない。しかし、長期間の需要実績とスポット市場価格実績を用いて理想ケースでの効果金額をシミュレーションし、これに前述した約84%を掛け算して長期間の実証効果金額を推定することは妥当であると言える。そこで、2020年度～2024年度の需要実績とスポット市場価格実績を用いて前述の方法で実証効果金額を推定したところ、年間258万円～919万円であった。今後のスポット市場価格の動向によっては、大きな効果を生む可能性があると言える。

また、Fig. 9で日単位では損失となる日があるが、その翌日の高値コマでの放電に向けて充電が多く計画される日もあるため、日単位だけではなく期間全体での効果金額を評価することが妥当である。

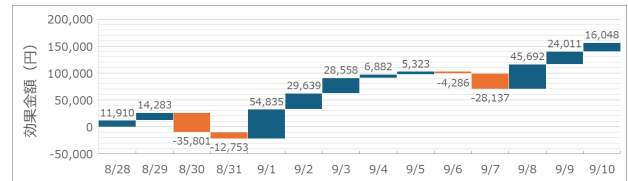


Fig. 9 Effect amount of verification.

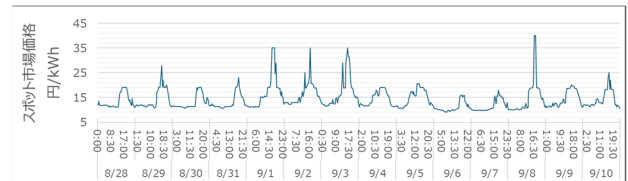


Fig. 10 Spot market price in TEPCO area.

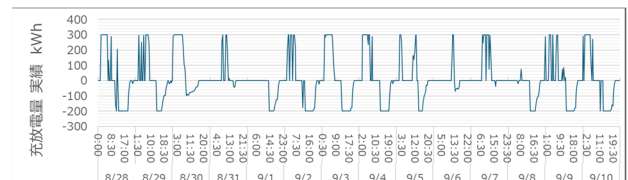


Fig. 11 Actual result of charge/discharge amount.

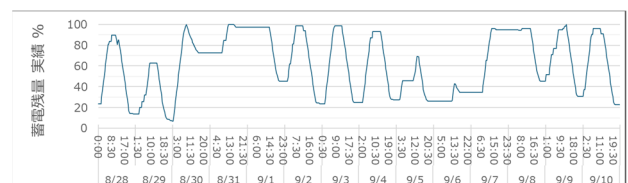


Fig. 12 Actual result of remaining power storage capacity.

5. まとめ

5-1 結論

筆者らは、高圧や特別高圧の区分の電力需要家の蓄電池をクラウド側から遠隔制御するVPPシステムを構築した。受電電力を目標値以下に抑え、かつ逆流発生を防止し、加えてスポット市場価格に連動した充放電制御を行う仕組みである。

小売電気事業者がスポット市場に入札可能な期限までに、このVPPシステムが需要予測およびスポット市場価格予測を行い、充放電計画を生成できることを実証により確認した。

次に、2025年8月28日～2025年9月10日の14日間、VPPシステムが各日で生成した充放電計画に従って蓄電池の充放電制御を行い、受電電力実績が目標値を超えていないこと、かつ逆潮流発生を防止していることを、実証により確認した。

最後に、実証期間中の充放電量の実績とスポット市場価格を用いて、電力調達コスト削減の効果金額を試算し、14日間の試算結果が計156,204円であることを確認した。

以上のことから、筆者らが構築したVPPシステムが、小売電気事業者の需給調整業務への導入やコスト削減にとって有効であると言える。

5-2 脱炭素社会への貢献に向けて

小売電気事業者の中で、自治体や地域企業等が出資や協定等で関与し、地域の再生可能エネルギーを地域内の電力需要家に供給するなど地域発展や地域脱炭素に取り組む事業者を地域新電力と言う¹⁵⁾。筆者らは、脱炭素社会の実現には、地域脱炭素の取り組みを活性化することが重要であり、各地域でその中核を担っていけるのが地域新電力であると考え。本報は、VPPシステムを用いてスポット市場からの電力調達コスト削減の効果に主眼を置いているが、上位目的は脱炭素化に貢献することである。筆者らが構築したVPPシステムは、太陽光発電設備を併設した電力需要家の蓄電池をスポット市場価格に連動して遠隔制御し、電力調達コスト削減と再生可能エネルギー利用を最大化させることを想定した仕組みである。地域の再生可能エネルギー拡大を促進する地域新電力の事業を支援できる仕組みであることを、今後実証していきたい。

参考文献

- 1) 中垣隆雄: 変動性再エネの導入増に伴うCO₂削減と電力安定供給の課題, 日本原子力学会誌, Vol. 62, No. 6, pp. 312-319 (2020).
- 2) 電気事業連合会: 周波数の安定化, <https://www.fepec.or.jp/supply/frequency/> (accessed 2025-12-01).
- 3) 山口頼央: 九州のエネルギーと電気の「同時同量」について, 電気設備学会誌, 39巻, 10号, pp. 661-662 (2019).
- 4) JEPX: 日本卸電力取引所取引ガイド (2019).
- 5) 古澤健: 電力市場の制度設計の現状と課題, 学会誌「システム/制御/情報」, Vol. 68, No. 12, pp. 462-467 (2024).
- 6) 浅野浩志: デマンドレスポンスによる需給安定化, 電気学会誌, 132巻, 10号, pp.688-691 (2012).
- 7) 中垣和歌ほか: 家庭用蓄電池を利用した市場価格連動型ディマンドレスポンスにおける予測誤差低減手法の研究, エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 46, No. 1, pp. 38-46 (2025).
- 8) 資源エネルギー庁: 家庭用蓄電池のDRready要件 (案), 第6回 DRready勉強会, 資料6 (2025).
- 9) 株式会社Shizen Connect: 機器制御型DR支援サービス, <https://se-digital.net/flexibility-for-retailers/> (accessed 2025-09-10).
- 10) エコーネットコンソーシアム: ECHONET Lite規格の概要, <https://echonet.jp/about/features/> (accessed 2025-12-01).
- 11) 眞田秀雄: 電力会社から見た特高受変電設備, 電気設備学会誌, 29巻, 10号, pp. 808-811 (2009).
- 12) 伊原裕貴, 三谷康範: 需要家の契約電力削減と小売電気事業者の需給調整コスト削減を両立させる蓄電池制御, 平成30年度電気・情報関係学会九州支部連合大会論文集, pp. 330-331 (2018).
- 13) 田中晃司: 国内外の電力需給調整サービスのあり方, 電気学会誌, 139巻, 4号, pp. 209-212 (2019).
- 14) 石井英雄, 林泰弘: カーボンニュートラルが求める電力システムと分散リソースへの期待 – VPPの歩み・到達点・展望 –, 学会誌「計測と制御」, 63巻, 第1号, pp. 4-8 (2024).
- 15) 環境省: 地域新電力の現状と課題 (一般社団法人ローカルグッド創成支援機構), 地域脱炭素政策の今後の在り方に関する検討会 (第4回), 資料4 (2024).