

2024年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】

強化学習による蓄電池の遠隔充放電制御

Remote Charge and Discharge Control of Batteries Using Reinforcement Learning

【整理番号】 24-筑波大9

【代表機関】 筑波大学

【調査研究代表者（氏名）】 小平 大輔

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 東京大学生産技術研究所：馬場 博幸

【TIA 外連携機関】

【報告書作成者】 小平 大輔 **【報告書作成年月日】** 2025/3/31

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

筑波大学の学生1名が蓄電池の遠隔充放電制御のシステム構築と遠隔操作アルゴリズム開発の支援を受けた。特に、通信方式（ECONET Lite）に合わせた信号を生成しPC端末からクラウドを介して操作する一連のシステムの構築と操作について、連携研究者（馬場博幸先生）の支援を受けた。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

[背景と課題]

VPP（Virtual Power Plant）における最適な蓄電池の運用方法について多くの研究が行われている。Wu氏の研究では、線形計画法を利用して最適な蓄電池の充放電計画を策定した[1]。また本研究室でも塚崎氏、後藤氏が蓄電池制御手法を提案した[2][3]。しかし、複数実機を遠隔で制御する技術には、多様な機器の通信方式や信号プロトコルの差異を吸収し、単一の制御センターから複数の機器を管理する必要があるが、その実現は困難であり、検証事例は限られている[4]。こうした背景を踏まえ、本研究では、後藤氏らが提案した蓄電池の SoC（State of Charge）計画[3]を多様な機器の通信方式、信号プロトコルに対応する蓄電池遠隔システムで実現することを試みる。その上で、提案された蓄電池制御スケジュールを実現する過程で生じる課題を明らかにし、その改善点を提案することを目的とする。

[課題解決の内容]

本研究における遠隔制御システムのネットワーク構成は図1の通りで、PCはIoT-hubサービス[4]を通じてIoTルータや蓄電池ゲートウェイと通信することで、充放電モードの切り替えや瞬時充放電電力等の指令の送信、蓄電池からの応答値の受信を可能にし

ている。

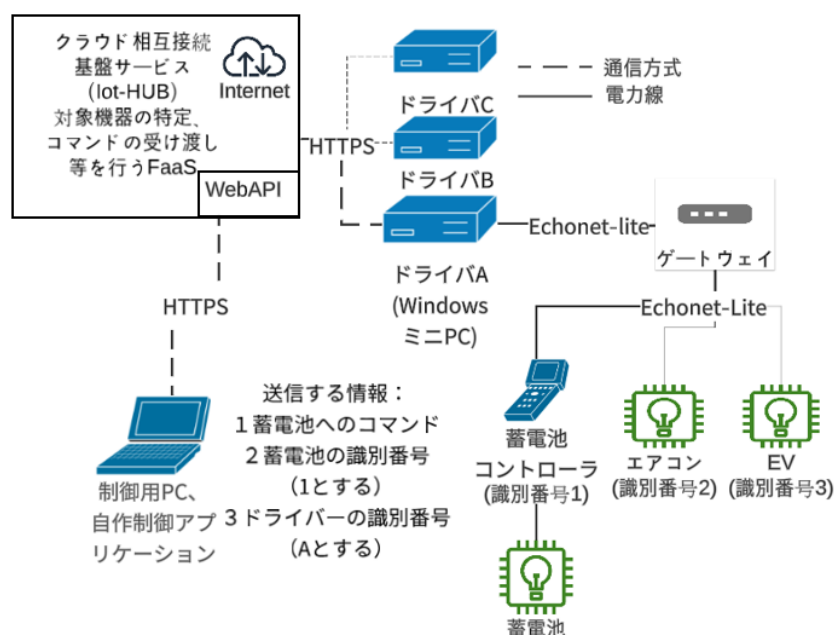


図1 蓄電池遠隔制御システムネットワーク図

● 遠隔制御システム構築の難点

本遠隔制御システムは複数メーカーの蓄電池に対応し、簡易な環境構築で利用できる利点がある一方、充放電計画の再現には、蓄電池から受信する SoC 値が 10%刻みで精度に不足があること、通信が不安定で応答時間が一定しないこと、内部抵抗や効率の影響で充放電時のエネルギー積算値に差が生じること、さらに高 SoC 領域では充電電力が大幅に低下することなどの課題があった。

● 充放電計画再現アルゴリズム

制御の難点を克服し、充放電計画を蓄電池遠隔制御システムで再現するため、図2のような制御アルゴリズムを構築した。後藤氏の充放電計画は1日単位で作成され、30分ごとに目標 SoC 値を設定されること、蓄電池との情報送受信1回に約20秒かかることから、1日、30分、約20秒の3層ループ構造で設計した。1日ごとの充放電計画取得ループでは、その日の30分ごとの充放電計画を受信するとともに、初期 SoC 値やその他の初期条件を読み込む。30分ごとの蓄電池操作決定ループでは、現在の SoC 値と目標 SoC 値との差から、目標 SoC 値を達成するために必要な瞬時充放電電力および充放電モードを算出し、蓄電池に送信する。約20秒ごとの蓄電池モニタリングループでは、蓄電池から返される現在の瞬時充放電電力および10%刻みの確定 SoC 値を監視し、瞬時充放電電力をループ開始から終了までの実時間で積算することで、0.1%程度の粒度を持つ予測 SoC 値を動的に算出する。予測 SoC 値は以下の式で求める：

$$\text{予測SoC値(\%)} = \sum P(t) \times \Delta t \times \frac{100}{C_{\max}} \quad (1)$$

ここで、 $P(t)$ は瞬時充放電電力（kW）、 Δt はサンプリング間隔（秒）、 $C_{\max}$ は最大充放電容量（kWh、充電時 4.4kWh、放電時 3.7kWh）を示し、約 20 秒のループごとに $P(t)$ と Δt の積で区間内の電力量を計算し、ある時点までそれを累積し、 $C_{\max}$ で割り、100 を掛けパーセントにすることで、その時点の SoC 値を求めている。予測 SoC 値が目標 SoC 値に達した場合、待機命令を蓄電池に送信し、充放電を停止させる。また、20 秒ループの実行時に蓄電池から返る確定 SoC 値が前ループから変更されていれば、予測 SoC 値を変更後の確定 SoC 値に更新することで、予測 SoC 値の誤差を是正する。

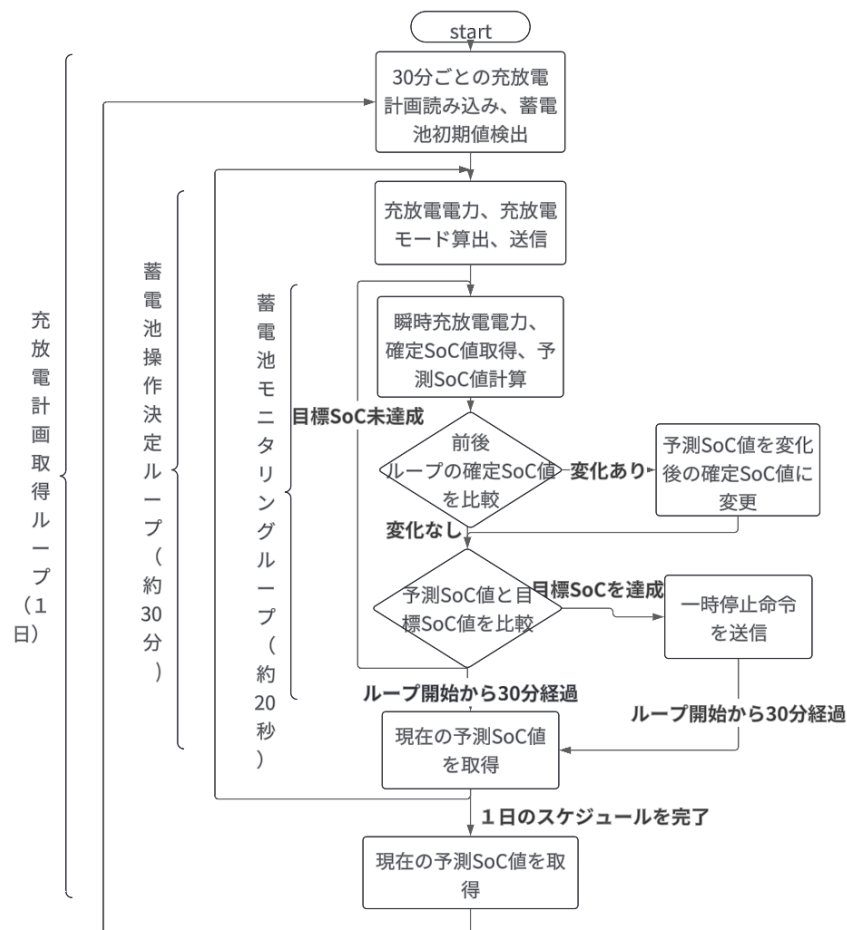


図 2 充放電計画再現アルゴリズム略図

[課題解決の結果]

夏季晴天時の蓄電池充放電計画[3]を用いた実証実験の結果を図 3 に示す。確定 SoC 値と予測 SoC 値が概ね一致し、予測 SoC 値が 30 分ごとに目標 SoC 値に正確に追従していることが確認された。また、図 4 のように、瞬時充放電電力が目標瞬時充放電電力に追従し、急速な充放電と細かい制御の両方に対応できていることが確認できる。これ

により、後藤氏の充放電計画が本研究の制御システムで実現可能であることが確認された。

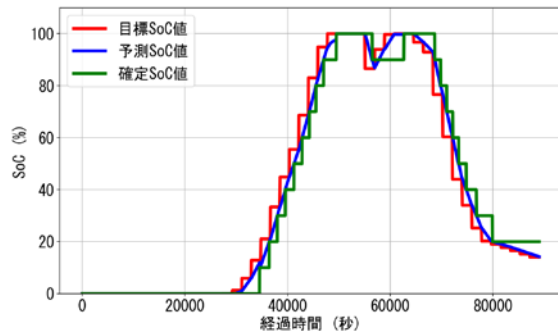


図3 充放電計画再現 SoC グラフ

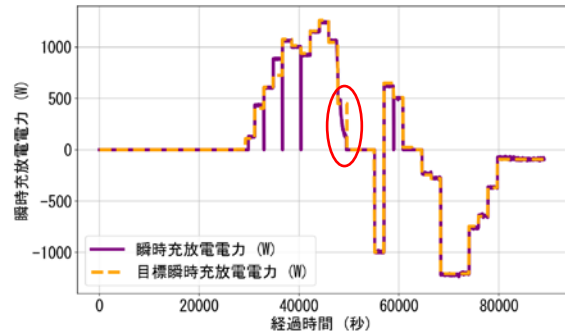


図4 充放電計画再現充放電電力グラフ

一方、実証実験中において、図4にて赤色の円で強調した領域では SoC 値が 100 に近く、目標電力に達していないことから、高 SoC 領域での高速充電は蓄電池保護機能のため不可能であった。また、制御アルゴリズムの作成では、正確な充放電計画の再現にはメーカーや通信サービスごとの SoC 粒度や遅延への対応が課題であることが判明した。さらに、長期運用を想定すると、ネットワーク遮断時の蓄電池の対応や蓄電池の経年劣化による容量変化への考慮が必要であることも示唆された。

- [1] Wu Z. et al.: "Real-Time Scheduling Method Based on Deep Reinforcement Learning for a Hybrid Wind-Solar-Storage Energy Generation System", The 10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021), Vol. 2021, pp. 409-413 (2021)
- [2] 塚崎紀貴・小平大輔・近藤順次：「深層強化学習を使用した蓄電池の最適運用手法」，2022 年 8 月 24 日-2022 年 8 月 25 日電力技術/電力系統技術合同研究会-1, pp. 19-24 (2022)
- [3] T. Goto and D. Kodaira, "Optimal Control of Battery System by Reinforcement Learning Considering Profitability", 2023 International Conference on Power and Renewable Energy Engineering (PREE), pp. 12-16 (2023)
- [4] 馬場博幸，野城智也：「相互接続基盤としての IoT-HUB の活用方策」，生産研究：東京大学生産技術研究所所報，Vol.74，No.2，pp.175-179 (2022)

【今後の活動予定】

本研究では、強化学習と実証の両面での課題を明らかにした。強化学習側では、高 SoC 領域における充電挙動、経年劣化による容量の変化および充放電時における実効容量の差を反映した強化学習の再実施が求められる。これにより現実の運用を想定した、精度の高い制御が実現できると考える。実証側では、長期的な運用を試行することでアルゴリズムの実効性や安定性を評価することが重要である。また、複数のメーカーや IoT サービスに対応可能な共通アルゴリズムの開発を進めることで、より実用性の高いシステムの構築を目指す。電気自動車にも同様の制御を適用するための研究すすめるため、2025 年度の科研費基盤 B へ本研究チームで応募をしたが不採択であった。来年度についても同様に応募を予定している。