

# 研究終了報告書

## 「電気料金設計のためのマルチスケールモデリング」

研究期間：2021年10月～2024年3月

研究者：星野光

### 1. 研究のねらい

近年、太陽光発電や蓄電池などの分散型エネルギー資源(Distributed Energy Resources; DER)の普及に伴う次世代電力システムへの移行が進められている。その中で、需要家側におけるDERへの投資を促すと同時に公共の電力ネットワーク設備を維持するための費用回収を行うための電気料金設計が課題となっている。需要家のDERへの投資行動とその下での送配電事業者の料金収入は、DERへの初期投資に係る費用とDERの運用費(あるいは収益)の総和を最小化するような需要家視点での最適化問題を解くことで分析でき、これまで様々な電気料金やDERの価格などの設定下での分析を行った研究が報告されている。しかし、最適化問題の解は上記の設定や入力データとして与えられる需要家の電力消費の時系列データなどに強く依存しており、また、扱う時系列データが長期間となるほど最適化問題を解くのにかかる時間が増加して手軽に再計算することが難しくなるため、得られた試算結果から直ちに料金設計に関する指針を得ることが難しい。

本研究では、従来のように需要家側における最適化問題を直接解くのではなく、パラメータや入力データに対する最適解の変動特性の分析(大域的な意味での感度分析)が実施しやすくなるように問題を変換して解くような最適化モデルを提案する。DERの短期的な運用計画と長期的な設備計画が影響しあうマルチスケールの最適化問題の数理的構造を活用することで、高速に最適解を得るとともに直観的な感度分析が可能となるような解法の開発をねらいとしている。

ACT-Xの期間では、電力エネルギー分野における電源構成最適化モデルとして知られるスクリーニングカーブ法(Screening Curve Method)に着目し、その適用範囲の拡張によって上記の需要家側におけるマルチスケールの最適化問題を効率よく解く方法を開発するとともに、SCMとトポロジー最適化との類似性に基づくSCMの数理的体系化を目指す研究を行った。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本課題では、太陽光発電や蓄電池などの分散型エネルギー資源(DER)の普及促進と電力ネットワーク設備の費用回収を両立する電気料金の設計に資するため、需要家側におけるDERへの投資計画とその運用計画の統合最適化モデルを検討した。具体的には、スクリーニングカーブ法(SCM)と呼ばれ、ヒューリスティクスに基づいて特定の最適化問題を部分問題に分割して高速かつ直観的に解くアプローチに着目し、上記の需要家側のDERの統合最適化問題に対するSCMの開発に取り組んだ。

SCMは、元の最適化問題を需要カーブの負荷レベル毎に分解し、各負荷レベルで電源の短期の運用費と長期の固定費のトレードオフを分析するような問題へと変換することで、負荷レベル毎で電源投資の経済性を判断して高速に近似最適解を導出する最適化モデルである。各負荷レベルでの設備設計に対する限界価格(シャドウプライス)を可視化することで直観的

な感度分析が可能になるという特長がある。これまで主に大規模電力システムの電源構成最適化の初期段階における分析(スクリーニング分析)に用いられてきたが、導入容量に対して発電出力が時々刻々変化する太陽光発電など再生可能エネルギー源を扱うことができなかった。本研究では、負荷レベルが時変の場合への拡張により、太陽光発電とその蓄電池利用を含む需要家側の最適化の問題に適用可能な方法を開発した。

また、提案 SCM を利用した経済分析として、需要家側での DER への投資と電力市場における料金価格の相互作用についての分析を行った。SCM を用いることで、電力市場における価格変化が需要家に与える影響を可視化した分析が可能であることを示したほか、電力会社による高可変費の電源への積極的な投資が DER 導入促進のみならず電力市場の長期的な効率性に有効であることを示唆する結果を得た。

SCM とトポロジー最適化の類似性に関しては、問題の分割可能な条件が自明でなく期間内には SCM の数理的体系化に至らなかったが、SCM の動的計画法に基づく定式化の試みにより上記 SCM 開発の指針が得られたほか、シンプルな問題設定である制御システムの安定化における最適性(最適レギュレータ問題の拡張)を考え、制御性能(運用計画に対応)と制御対象(投資計画・設備計画に対応)の統合最適化問題の検討を行った。具体的には、統合最適化問題をトポロジー最適化と類似した偏微分方程式制約付き最適化問題として定式化し、トポロジー最適化における感度計算の方法を参考にして、上記統合最適化問題の新たな数値解法を開発した。

(2)詳細

研究テーマ A 「需要家の DER 投資問題に対する SCM の開発」

太陽光発電や蓄電池への投資によって日々の電気料金を含めた長期の総電力コストを最小化する需要家の最適化問題に対する SCM を開発した。ACT-X 研究開始時までの予備検討では、DER の運用に関する評価期間を1日に限定して蓄電池の運用を単純化した(24 時間毎の運用の周期性を仮定した)場合について適用可能な方法を開発済みだったが、それでは電力需要や太陽光発電の天候や季節による変動を考慮できず、長期間での蓄電池の充放電挙動を扱うことができるような方法の開発が必要だった。

本研究では、太陽光発電の時々刻々の発電量に合わせた時変の負荷レベル毎に問題を分割し、その際の蓄電池の充放電挙動を電力余剰の24時間毎の降順に並べ替えることで蓄電池の運用による経済メリットを計算することを提案した(図1)。これによって、天候や季節による発電量および需要量の変動がある長期間のデータを扱う場合においても近似最適解を導出可能な SCM を開発した。提案 SCM の計算結果を汎用の数理最適化ソルバー(線形計画法)により導出した最適解と比較した結果、太陽光発電や蓄電池の最適導入量のみでなく、時々刻々の充放電量および電力系統を介した売買電量

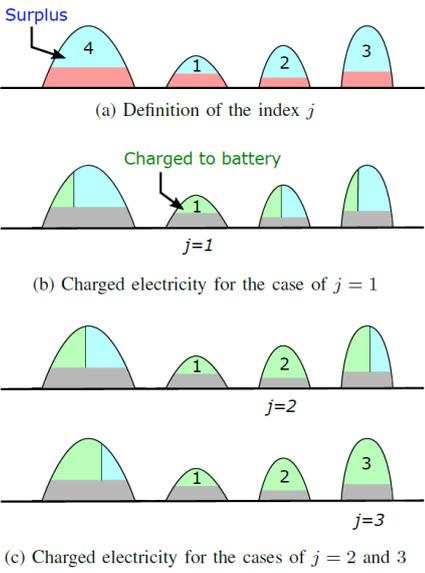


図1 充放電の分析

を SCM により精度良く表せることが確認できた(図2)。また、電気料金や DER の価格などの設定が変化する場合においても、蓄電池の導入量が著しく大きくなるような場合を除いて広い範囲で SCM による近似計算が有効であることが確かめられた。さらに、線形計画法に比べて計算時間を大幅に短縮でき、扱うデータが長期間となるほどその有効性が大きいことが確認できた(図3)。

以上の検討により、需要家の DER への投資問題に関して各負荷レベルで電源の短期の運用費と長期の固定費のトレードオフを直観的かつ高速に分析可能な SCM が開発できた。

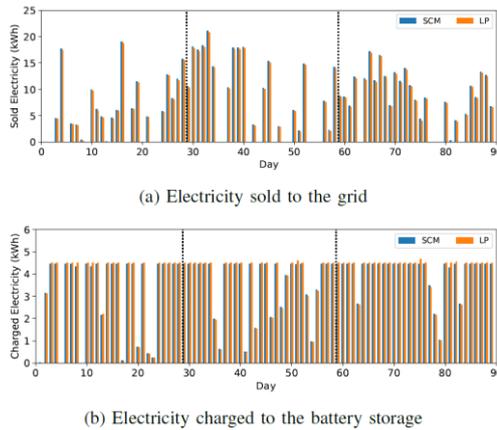


図2 充放電挙動の計算例

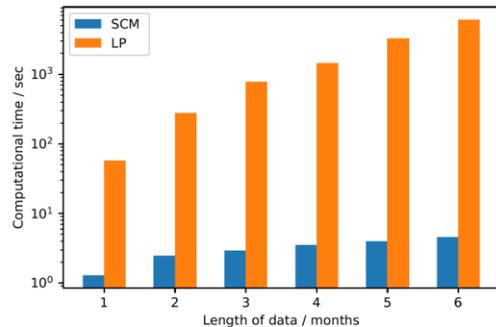


図3 計算時間の比較

### 研究テーマ B 「SCM を用いた DER 普及と電力市場価格の経済分析」

提案する SCM を利用した経済分析として、需要家側での DER への投資と電力市場における料金価格の相互作用についての分析を行った。具体的には、需要家の DER への投資により太陽光発電および蓄電池の普及が進むものとし、初期の電力市場価格の下での DER の経済性を提案手法により分析して DER の普及率を見積もった。これに基づき電力会社が電源投資を最適化することを想定して電力市場価格を再計算し、DER の経済性を再度評価することで、需要家自身の DER への投資行動と電力会社の電源投資が電力市場価格を介して相互に影響し合う様子の分析を行った(図4)。SCM を用いることで、電力市場における価格変化が需要家に与える影響を可視化することができ、直観的な分析が可能であることを示したほか、電力会社による高可変費の電源への積極的な投資が DER 導入促進のみならず電力市場の長期的な効率性に有効であることを示唆する結果を得た。

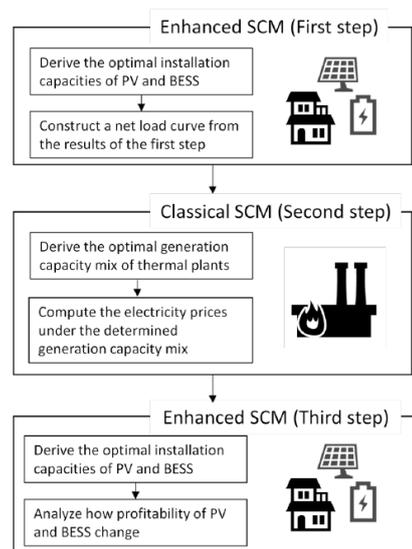


図4 分析の枠組み

### 研究テーマ C 「SCM とトポロジー最適化との類似性に基づく統合最適化法の開発」

SCM とトポロジー最適化の関連について数理的な観点から検討を行った。まず、SCM にお

ける負荷レベル毎への問題の分割を前提とした場合について、SCM のアルゴリズムに基づいて全体の問題の最適解を導出する過程を動的計画法に基づき定式化し、SCM のマクロスケールでの支配方程式を導出することができた。ただ、問題の分割可能な条件が必ずしも自明でなく ACT-X 期間内には SCM の数理的体系化には至らなかった(しかし、本検討によって研究テーマ A で説明した SCM の開発の指針が得られた)。

そこで本研究では、SCM における運用計画の部分最適化問題を捉え、よりシンプルな問題設定として基本的な制御システムに対する最適制御問題(最適レギュレータ)を考えることで制御性能(運用計画に対応)と制御対象(投資計画・設備計画に対応)の統合最適化問題の検討を行った。具体的には、最適制御問題の最適性条件を表すハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式(Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式; HJB 方程式)を用いることで、統合最適化問題をトポロジー最適化と類似した偏微分方程式制約付き最適化問題として定式化し、トポロジー最適化における感度計算の方法を参考にして、上記統合最適化問題の新たな数値解法を開発した。具体的には、HJB 方程式をガラーキンスペクトル法による復法を用いて解きつつ(運用計画を最適化しつつ)、これと同時に制御対象のパラメータを更新する(設備計画を最適化する)方法を提案した(図5)。この方法について、運用最適化を設備計画の最適化の子問題として扱うのではなく、運用計画と設備計画の両方のパラメータを同時に更新できるため、通常の HJB 方程式と同等の計算コストでの統合最適化が可能となることを、最適レギュレータ問題を統合最適化問題へと拡張した例題を用いて示した。

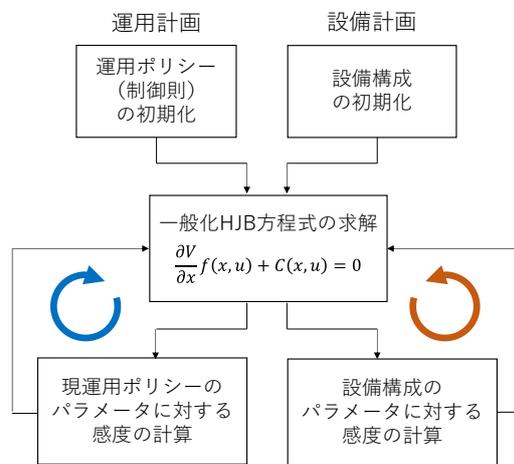


図5 運用計画と設備計画の同時最適化

### 3. 今後の展開

- ・ 本研究で開発した需要家の DER 投資問題に対する SCM を用いた分析例として DER 普及と電力市場価格の相互作用の分析を行ったが、需要家毎の電力需給のばらつきなどについて単純化した設定での分析に留まっており、今後より現実に即した分析を進めていきたい。また、太陽光発電の普及政策として近年議論が進んでいる集团的自家消費体系と呼ばれる需要家群における DER 投資問題に対して提案 SCM を適用した新たな経済分析も進めていきたい。
- ・ 本研究で開発した HJB 方程式に基づく統合最適化問題の解法は、現状最適レギュレータ問題に対してのみ適用可能である。今後、この統合最適化の枠組みを電力エネルギー供給系の問題に適用できるように拡張したい。また、近年、機械学習技術を用いた偏微分方程式の効率的な数値解法の研究が積極的に進められており、同技術を活用した効率的な統合最適化法の開発を進めたい。
- ・ 本研究で検討した HJB 方程式に基づく統合最適化問題の解法と SCM との関係について検討を推し進め、SCM の数理的体系化を行うことで直感的な感度分析が可能な統合最適化問題の解法の開発へと研究を展開したい。

#### 4. 自己評価

研究目的の達成状況:

- ・ 当初の計画通り、需要家の DER 投資問題に対する SCM の開発とそれを用いた DER 普及と電力市場価格の相互作用を考慮した経済分析を実施するという目標が達成できた。
- ・ SCM とトポロジー最適化の関連について、SCM の数理的体系化は研究期間内には解決に至らなかったが、計画時には想定していなかった形で統合最適化問題を定式化することができ、新たな統合最適化法の提案へと研究を展開できた。

研究の進め方:

- ・ 研究実施体制については、研究代表者に加えて大学院生 1 名が実験用プログラムの実装やデータの収集・解析などを行う体制で研究を実施した。これは研究開始時の計画通りの研究実施体制である。
- ・ 研究費執行状況について総額としては概ね計画通りに研究費を執行した。アメリカのカーネギーメロン大学に研究滞在し、HJB 方程式による統合最適化に関する基礎的検討を進めるとともに、機械学習技術を利用した新たな数値計算法の着想を得ることができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果:

- ・ 本研究の成果として得られた SCM は様々な電気料金、DER 価格の設定下での需要家の DER 導入の経済性を評価する分析ツールとして有用であり、電気料金の設計や料金規制の議論に資する経済分析に大きく寄与すると考えられる。
- ・ 本研究を通じて得られた統合最適化法の研究を電力エネルギー供給系へと展開することで、電力エネルギー分野の様々な対象に対して運用時のデータを用いた効率的な設備設計を実現する最適化モデルが得られると期待される。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 4件

1. H. Hoshino, Screening curve method for optimal sizing of photovoltaic and battery storage systems for a household, in Proc. the 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp.462-465 (2022).

需要家側における DER への投資と運用の統合最適化問題に対するスクリーニングカーブ法(SCM)の開発について報告した。従来のように最適化問題を直接解くのではなく、需要カーブを負荷レベル毎に分解して扱うことで、太陽光発電および蓄電池の最適導入量のみでなく、各時刻における太陽光発電の発電電力量、蓄電池の最適充放電パターン、売買電力量を高速に導出するとともに、最適導入量の変化を直観的に分析可能な手法を提案した。

2. Y. Irie, H. Hoshino, K. Furusawa, K. Okada, E. Furutani, Profitability analysis of photovoltaics and battery storages using screening curve method: A study on the interaction between PV/battery share and prices of electricity spot market, in Proc. CIGRE 2022 Kyoto Symposium, C000108 (2022).

提案 SCM を利用した実経済分析に取り組んだ。需要家側での DER への投資と電力市場における料金価格の相互作用についての分析結果を報告した。SCM を用いることで、電力市

場における価格変化が需要家に与える影響を可視化した分析が可能であることを示したほか、電力会社による高可変費の電源への積極的な投資が DER 導入促進のみならず電力市場の長期的な効率性に有効であることを示唆する結果を得た。

3. H. Hoshino, An approach to integrated design of physical structure and controller based on Galerkin approximations of Hamilton–Jacobi equation, in Proc. the 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp.403–406 (2023).

制御の基本問題である確定系の安定化制御を対象として、制御対象の構造と制御性能の統合最適化する手法を提案した。運用計画を最適制御問題とみなし、その最適性条件を表すハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式を用いることで統合最適化問題が偏微分方程式制約付き最適化問題として定式化されることを示した。さらに偏微分方程式のガラーキン近似に基づく統合最適化問題の数値解法を提案した。

4. H. Hoshino, Y. Irie, E. Furutani, Screening curve method for economic analysis of household solar energy self-consumption, IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation (2024) in press.

需要家側における DER への投資と運用の統合最適化問題に対するスクリーニングカーブ法 (SCM) の開発について報告した。成果 1 の手法を拡張する形で、蓄電池の最適導入量の評価に関する解析的な表現を導出するとともに、手法の妥当性を体系的に問題設定を変更した際の数値計算によって検証した。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数： 0 件

## (3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[受賞] 電気学会 2022 年電子・情報・システム部門技術委員会奨励賞

[招待講演] 星野 光, 電力エネルギーシステムの統合最適化への制御理論的アプローチ, 電気関係学会関西連合大会, 2023 年 11 月 26 日.

[学会発表]

- ・ 入江 陽介, 星野 光, 古谷 栄光, スクリーニングカーブ法に基づく太陽光発電および蓄電池の最適容量の分析: 計算時間の検証, 令和 5 年電気学会全国大会, 6-196, 2023 年 3 月 15 日.
- ・ 星野 光, Hamilton–Jacobi 方程式の Galerkin 近似に基づく制御対象と制御性能の同時最適化に関する一検討, 第 10 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 1M8-2, 2023 年 3 月 9 日.
- ・ 星野 光, 入江 陽介, 古谷 栄光, 分散型エネルギー資源の最適導入量分析のためのスクリーニングカーブ法の動的計画法による定式化の一検討, スマートシステムと制御技術シンポジウム 2022, CT-22-003, 2022 年 1 月 8 日.