

論文の内容の要旨

論文題目 エネルギーフレキシブルな建築システムの最適制御手法
の開発と機器容量選定への適用

氏 名 松浪 佑宜

本論文は、エネルギーフレキシブルな建築システムの最適制御手法の開発と、その機器容量選定に関する検討についてまとめたものである。

日本における再生可能エネルギー（再エネ）の導入量増加に伴い、日中の電力系統の容量が不足して再エネの出力抑制や新規接続が制限される事態が発生している。よって再エネのさらなる普及を図るには、需要家も再エネに加えエネルギー貯蔵を導入する重要性が高まっている。さらに日本では自然災害の増加と燃料価格の高騰が重なっていることから、需要家はエネルギー貯蔵によりエネルギー自給率を向上することも求められている。

太陽光発電（PV）を代表とする再エネは変動する電力で供給されるため、エネルギー貯蔵として蓄電池システム（BESS: Battery Energy Storage System）の活用が今後ますます重要になる。しかし、様々な機器仕様や電気料金プランのもとで、BESSで電力コストの最適化或いはエネルギー自給率の向上を図ることは容易ではない。このようにあらゆる目的や制約条件に対し、BESS等を総合的に制御することは従来のPID制御のみでは難しいが、近年注目されているモデル予測制御（MPC）を適用することで、昨今の発展がめざましい機械学習や最適化アルゴリズムを活用して建物内のエネルギー需給量を予測し、BESSを最適に制御できる可能性がある。建物のエネルギー貯蔵にMPCを適用した先行研究では、再エネを含まないシステムを対象とした検討や、メタヒューリスティクスや動的計画法（DP）等の計算コストが比較的高い最適化手法を用いた検討が多い。また、建物のエネルギー貯蔵として従来研究されてきた蓄熱システムでは、約1時間の間隔で最適化すれば十分であった一方、再エネやBESSを含む電力システムの場合、電気料金やDemand Responseが30分単位の電力平均値で判定されるため、数秒単位で変化するエネルギー需給量を踏まえた最適化が求められる。BESSによるエネルギー需給量の最適化に関する先行研究は、大規模な電力系統に接続されたBESSの制御や従来のPID制御を適用した検討が多く、特に業務用途の建築システムを対象にMPCを適用した

研究は十分に行われていない。

また建物に対してBESSの導入検討を行う際は、イニシャルコストの低減或いは投資対効果が必ず求められる。しかし建物のエネルギー負荷や再エネの容量、さらには導入目的が多種多様であるため、エネルギー貯蔵における体系的な容量の選定指針が存在しないのが現状である。よってイニシャルコストや投資対効果を踏まえ、適切なBESS容量を定量的に選定することができれば再エネ及びBESSの導入が促進され、延いては電力システムの容量不足が軽減される可能性がある。

第1章では、以上のような背景を記述するとともに、再エネ及びBESSを有する建築システムに対し、逐次二次計画法 (SQP: Sequential Quadratic Programming) でBESSの充放電を最適化するMPCの定式化手法の開発と、MPCを前提とした機器の適切な容量選定という本論文の目的を明確にした。またその手段として、実際にPVとBESSが設置された業務用施設の電力システムを対象としたシミュレーションプログラムを構築し、様々な制御手法や機器容量を踏まえたシミュレーションを実施する手法を用いた点について述べた。なお、本研究ではMPCの定式化手法を主な論点とするため、予測値は完全予見できる仮定で検討を進めた。ただし、予測の誤差に対して制御性能が著しく低下しないことを確認するために、MPCの入力に誤差を有する予測値を与えた検討も実施した。

第2章では、物理的な関係式と推定パラメータを組み合わせたBESS及びPVの計算モデルについて述べ、実システムを高精度に模倣できることを示した。またBESSの従来制御として、受電電力が閾値を超過しないように放電を行うピークカット制御と、受電電力を目標値に極力抑える受電電力抑制制御について述べ、それぞれを前提とした年間シミュレーションの結果を示した。

ピークカット制御は閾値を適切に設定しなければ受電電力が契約電力を超過する課題と、受電電力が閾値に達しない限りBESSが放電されないため満充電状態が続き、頻繁に逆潮流が発生する2つの課題を示した。

受電電力抑制制御も受電電力の目標値を適切に設定しなければ契約電力を超過する課題はあるものの、ピークカット制御に比べて大きな受電電力の平準化効果が示された。ただしこの場合、ピークカット制御同様に大量の逆潮流が発生する課題を示した。

以上を踏まえ、建物の電力需給を常に予測して適切にBESSを制御するためにMPCが有効であると述べた。

第3章では、まずMPCの概要と本研究で着目した数理計画法の一種であるSQPについて記述した。そのなかでは、SQPを用いれば非線形関数を二次関数に近似し、制約付きの最適化問題を効率的に解けるため、大規模で複雑な問題を探索的アプローチで解くメタヒューリスティクスやDPに比べ、実用に適う速さでBESSの制御を最適化できる可能

性が高いと述べた。また、一般的に予測の対象とする時間が予測を行う時間から遠いほど予測誤差が拡大するため、その影響を分析するために用いた仮想的な予測値についても述べた。続けて従来の固定料金制を前提として、建物の潮流電力を平準化することを目的としたMPCの定式化手法を示した。また、電力負荷及び日射量の予測期間を変化させたケーススタディを予測誤差の有無それぞれの場合で実施し、定式化したMPCによって期待通りにBESSが充放電され、潮流電力が平準化されることを示した。また予測誤差を考慮しても、予測期間が長いほどコストメリットが増加し、予測期間がおよそ72時間で一定値に収束することを示した。なおこの場合、従来制御を適用した場合に比べて約27 %のコスト削減効果が示された。

第4章では、卸電力市場 (JEPX) の電力単価と連動した電力料金制を変動料金制と称し、その概要について述べた。また、時間帯毎の単価に応じて電力コストを最小限に抑えることを目的としたMPCの定式化手法を示した。また第3章同様、電力負荷及び日射量の予測期間を変化させたケーススタディを予測誤差の有無それぞれの場合で実施し、定式化したMPCによって期待通りにBESSが充放電され、電力コストが最小化されることが示された。また予測誤差を考慮しても、予測期間が長いほどコストメリットが増加し、予測期間がおよそ72時間で一定値に収束することが確認された。なおこの場合、従来制御を適用した場合に比べて約30 %のコスト削減効果が示された。

第5章では、固定料金制及び変動料金制それぞれの場合において、BESSの導入効果が最も得られる蓄電容量 (BESS容量) の選定について記述した。まずシミュレーションプログラムを用いてBESS容量を変化させた年間シミュレーションを実施し、電力コストやエネルギー自給率の計算結果を示した。また、BESSを最適に制御することによって得られるコストメリットとイニシャルコストから投資回収年数を計算し、想定されるBESSの単価毎に整理した結果を示した。その結果、固定料金制及び変動料金いずれの場合もBESS容量が約800 kWhで電力コストが一定に収束し、かつその場合に最も投資回収年数が低くなる試算結果が示された。また、BESSの単価が6万円/kWhと仮定した場合、固定料金制で約15年、変動料金制で約8年の投資回収年数が示されたことから、変動料金制の方がBESS導入におけるコストメリットが得られやすいことが示唆された。

最後に第6章では、本論の総括を示し、今後の課題について述べた。