

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

需要の不確実性を考慮した  
家庭用エネルギー管理システムの  
運用計画に関する研究

Operational Planning Method for  
Home Energy Management System  
Considering Demand Uncertainty

申請者

吉田	彬
Akira	YOSHIDA

機械科学専攻 動力・エネルギー工学研究

2015年2月

家庭用エネルギー管理システム（Home Energy Management System: HEMS）は、次世代の家庭内エネルギー消費を最適化するためのコンセプトとして注目されている。それは、外部情報を取り入れ、複数の機器が協調して運用されることにより、家庭内でのエネルギー消費が全体最適化され、結果として省エネルギー化を推進するものと期待されている。HEMSが制御対象とする機器には、普及が進展している燃料電池・コージェネレーションシステム（FC-CGS）、太陽光発電装置（PV）、蓄電池（BT）、給湯用ヒートポンプ、空調機等が挙げられる。FC-CGSは、主機であるFCユニットの瞬時熱出力を大きく上回る給湯需要に対応するために貯湯槽を持ち、また、起動・停止にコストがかかるために、需要パターンに合致した適切な運用方策が省エネルギーとなることが知られている。一方で、自然エネルギーの積極的活用の観点からPVの大量導入が進んでいる。自然エネルギー源の出力は天候に強く依存し変動が大きいことから、大容量のPVを電力系統へ連系することによる電圧等の電力品質への悪影響が懸念されており、例えばPVと組み合わせてBTを家庭へ備え付けることでPV出力の変動を吸収する試みがなされている。HEMSの機能として、電力供給不足による需要家への節電要請であるデマンドレスポンス（DR）信号に応答し電力消費の抑制制御をすること、その際にはPV・BTを制御しピーク時間帯の消費電力を自動で削減することの実装が期待されている。しかし、DR信号に対する感度および応答性が不明確であり、また、家電毎に独立した運用・制御を実施しているため部分最適な運用に留まっている。さらに、HEMSが十分に普及していない理由として、HEMSに対応する通信規格を実装した家電機器が十分に普及していないこと、ならびにそもそもHEMSの役割・導入効果が未だ不透明であることが挙げられる。したがって、機器運用・制御の側面からのHEMS開発指針の提示およびHEMSによる省エネルギー性・経済性の定量評価を実施することで、HEMSの具体的な効果を提示し、その普及に貢献すると考えられる。

このような背景を踏まえ、本論文では、DR信号へ対応しつつ家庭用エネルギーシステムの全体最適運用を達成するために、翌日のエネルギー需要を予測し、予測に基づいたHEMS運用方策を計画し、その計画を評価するという枠組みを構築することを目的としている。さらに、構築した枠組みを用いたHEMS機能による省エネルギー性・経済性の定量評価を実施することにより、HEMS開発指針を提示することを目指している。

以下に本論文の構成を示す。

本論文は7章から構成される。

第1章は序論であり、上記の問題点を抽出し、従来研究の状況を述べている。また、課題を明確化することで、本論文の位置づけを説明している。

第2章では、FC-CGSの運用計画問題として定式化するための数理モデルの要件を提示している。すなわち、エネルギー・物質収支を制約条件とした複数の運転モードの切り替えで表現される数理モデルを提示し、様々な条件

下における実測データに基づき、各ユニットの入出力関係としてモデルのパラメータを実験により同定している。

第3章では、PV、BTおよびFC-CGSを構成要素とするシステムの運用計画問題を混合整数線形計画法により定式化し、分枝限定法・単体法等の解法を組み合わせ、最適運用方策を導出している。ここで、FC-CGSの主機には固体高分子形および固体酸化物型燃料電池を取り上げ、BTについても市販家庭用据置型と電気自動車相当の容量の2種を対象としている。目的関数はPV逆潮電力がシステムの一次エネルギー消費量に寄与する、あるいは、寄与しないケースを2通り設定することで、将来の家庭部門における機器の複数の普及シナリオを考慮して数値分析を実施している。その結果、各条件下におけるエネルギーシステムの最大の省エネルギー効果を明らかにし、FC-CGSの省エネルギー性に寄与する需要特徴の分析が、機器の運用成績を評価する上で重要であることを論じている。

第4章では、需要特徴の分析手法を提案し、その具体的応用例として需要特徴がエネルギーシステムへ与える影響分析手法へと拡張している。主機の熱電比の拘束が強いCGSにおいては、主機と需要との特徴が合致した際に省エネルギーとなることが知られているものの、家庭部門のエネルギー消費パターンの日・時刻毎の相対変動量は、産業部門のそれと比較して大きい。当然ながら、正確な翌日の需要パターンの予測がシステムの運用成績を向上させるものの、時々刻々変動する家庭のエネルギー需要を正確に予測することは本質的に困難である。本論文では、翌日のエネルギー需要パターンは、前日までに実現したパターンの何れかに類似しているという仮定を設定し、過去に実測した需要データ同士をクラスタリングするための非類似度を表現する測度を定めて、分類する方法を提案している。ここでは、まず、時系列のピーク需要発生時刻のずれを考慮するために、時系列を混合ガウス分布により近似している。次に、その分布間の非類似度の測度に一般化KL情報量(*generalized Kullback-Leibler divergence*)を採用し、1日単位の需要時系列同士の非類似度を定義し、その距離構造を学習させる。そして、この距離行列データベースに基づき階層的クラスタリングを実施することで、PEFC-CGSの省エネルギー性は、需要の1日の総量、熱電比および時系列パターンに影響されるものの、前者の2つが支配的要因であることを定量的に明らかにしている。

第5章では、不確実性下における運用計画問題を扱っている。古典的なエネルギーシステムの運用計画手法として、外生的に与えるエネルギー需要量を既知とする決定論的な最適運用計画問題が採用されてきた。しかし、家庭のエネルギー需要量は不確実性が高く、運用計画問題へ与えたエネルギー需要量が必ずしも実現せず、設計時のシステム効率を達成することは多くないという課題があった。そこで、本章では不確実な系の運用計画手法として、シナリオベースの確率計画法を用いた定式化を行っている。数値実験により、

不確実性を考慮した運用方策を用いると、将来の完全情報に基づく運用方策と比較して一次エネルギー消費量の変化傾向を求めている。また、その際には、事前の運用計画を要する PEFC の運転時間を短縮し、運用計画が不要であるガスボイラおよび系統電力からのエネルギー供給が増加するという保守的な運用方策が採用される傾向にあることを示している。さらに、不確実性が增大すると PEFC を使用しない保守的な運用方策が過度に採用されることとなり、PEFC-CGS を活用するには、予測する需要パターンの適切な数を提示し、予測精度を向上させる条件を数値実験により明らかにしている。

第 6 章では、2~5 章までに開発した技術を統合し、HEMS 運用計画手法を提案している。提案手法は予測ステップ、運用計画ステップ、およびその運用計画評価ステップから構成される。予測ステップにおいては、予め過去に実現した時系列データ同士の距離構造を学習し、前日の時系列および予測する翌日のデータをクエリとして、クエリに関連性の高い翌日のエネルギー需要・PV 出力の時系列を検索し、予測値として出力する。運用計画ステップにおいては、システムの確率的最適運用計画問題へ予測された時系列を外生変数として入力し、需要家の利得を最大化する運用方策を計画する。その際の制約条件には、機器特性およびエネルギー需給収支に加えて、需要家の熱的快適性を考慮することで空調熱処理量に自由度を加えている。最後のステップにおいては、事前に計画された運用方策に基づき、実際のエネルギー需要・PV 出力実現値においてシステムを運用・制御し、その運用成績を評価するものである。このようにして、将来事象の不確実性下においてシステムの運用方策に関する事前の意思決定を行い、実時間においてその意思決定に基づき運用を履行した際の運用成績を評価している。数値実験から、運用計画が予測に基づかず HEMS を導入していないケースと比較して、提案手法はほとんどの機器構成において、省コストとなる傾向を示し、需要家にとっての HEMS の有用性を定量的に示している。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた結果を総括している。

以上より、本論文では予測に基づく確率的運用計画手法を用いた、HEMS を中核とした家庭用エネルギーシステムの最適運用計画手法を提案している。また、数値実験により、提案手法における需要家にとっての運用費・一次エネルギー消費量の観点における有用性を示している。本論文で得られた成果は、HEMS に新たな開発指針を与えるものであり、制御工学およびエネルギー工学の分野への貢献は多大である。したがって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2015 年 2 月

(主査) 早稲田大学 教授 博士（工学）（早稲田大学） 天野 嘉春  
早稲田大学 名誉教授 工学博士（早稲田大学） 河合 素直  
早稲田大学 准教授 工学博士（早稲田大学） 武藤 寛