

博士論文概要

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

2014年11月

次世代家庭用エネルギーシステムとして、燃料電池コージェネレーションシステム（FC-CGS）が開発され、また、自然エネルギーの積極的活用の観点から太陽光発電（PV）の導入が進んでいる。FC-CGSは多入力・多出力系であり、貯湯槽（HWT）を持ち、また、起動・停止に時間を要することから、運用方策を予め適切に決定することで、システムの潜在能力を最高度に発揮し、省エネルギー・省コストとなることが知られている。自然エネルギー源の出力は天候依存で制御が困難であることから、それらを電力系統へ連系することで電力品質へ影響を与えることが懸念されており、PVと組み合わせて蓄電池（BT）を備え付けることで、PV出力の変動を吸収する試みがなされている。一方で、次世代の通信機能付き電力計であるスマートメータへの入れ替えが進展している。スマートメータは電力需給の合理化を目的としたデマンドレスポンス（DR）信号を電力系統の運用者より受信する機能を持ち、家庭用エネルギーシステムがそのDR信号に対応する節電行動を実施することで、家庭、地域単位でのエネルギーの合理的利用を実現することが期待されている。しかし、現在のところFC-CGS、PV、BT等の家庭用エネルギーシステムは機器毎に独立した運用・制御を行っており、DR信号には利用者自らが手動で対応せざるを得ない。そのため需要家毎にDR信号に対する応答性が異なることが課題とされている。この課題の解決策として、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目的として、機器間の情報通信を用いて家庭単位のエネルギー管理を一括して行うHome Energy Management System（HEMS）が提唱されている。HEMSには、前述の特徴を持つFC-CGS、PV、BT等の家庭用エネルギー機器を取りまとめDR信号に対応しつつ、需要の不確実性下においてシステム全体が最適となる運用を行うアルゴリズムが必要となる。換言すれば、予測情報に基づくHEMS運用技術が課題となっている。HEMSの現状としては、エネルギーの使用状況を閲覧する機器に留まっており、例えばEchonet Lite等機器間通信のための標準化プロトコルが策定された段階である。そのプロトコルを用いる通信機能を備えた家庭用エネルギー機器の販売が開始されたものの、その機器の普及には長い期間を要することが見込まれ、また、HEMSのためにエネルギー機器自体にどのような機能を備えるべきかという点については十分に議論されていない。したがって、HEMSとその管理下におく家庭用エネルギー機器の開発指針を明らかにすることが、HEMSの有効性を高めることに貢献すると考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究はHEMS開発の技術課題を解決するために、翌日の予測情報に基づくHEMS運用計画手法を構築することを目的としている。その際に、HEMS管理下には次世代エネルギー機器としてFC-CGS、PVおよびBTを構成要素に持つシステムを検討対象としている。また、数値実験によってHEMSがシステム全体最適運用を達成した際の潜在能力を分析し、提案する予測に基づくHEMS運用計画手法の有用性を定量評価し、HEMSとその管理下のエネルギー機器の開発指針を提示する。

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，本研究の目的と位置づけを説明している．

第 2 章では，FC-CGS の運用計画問題の構築，すなわち，数理モデルを提案し，FC-CGS の様々な条件下における実測データに基づき，モデルのパラメータ同定を実施している．

第 3 章では，これまで十分に検討がなされていない新たな家庭用エネルギー機器である PV・BT に対して FC-CGS と組み合わせた次世代家庭用エネルギーシステムの数理モデルを構築，すなわち，混合整数線形計画法として定式化する．そして，分枝限定法，単体法等の解法を組み合わせることで目的関数である一次エネルギー消費量を最小化する最適運用方策を導出している．その際，FC-CGS の主機としては固体高分子形燃料電池（PEFC）および固体酸化物型燃料電池（SOFC）の双方を取り上げる．また，BT 蓄電容量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 つのケースを検討対象とする．さらに，PV 逆潮電力はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しない，あるいは寄与するとした，2 つのケースを設定することで，考えうる次世代家庭用エネルギーシステムの候補群を対象として数値分析を実施している．その結果，次世代エネルギーシステムの潜在能力の最大値を明らかにしている．このとき，需要特性がエネルギーシステム特性によく整合している場合には，機器の持つ省エネルギー性が発揮されるが，整合しない場合には，その省エネルギー性が十分に発揮されないことを明らかにしている．以上の結果より，FC-CGS の省エネルギー性に寄与する需要特性の分析が，機器の運用性能を評価する上で重要であることを明らかにしている．

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拡張している．CGS の潜在能力を発揮した運用を行えるかどうかは，設計段階ではなく日々の需要予測の精度に依存するところが大きいものの，時々刻々変動する家庭のエネルギー需要予測は非常に困難である．そこで，翌日のエネルギー需要時系列パターンは，前日までに実現した需要時系列パターンに似て発生するという仮定のもと，過去に実測した需要データと翌日に実現するであろう需要特性との類似度を判定し，分類することを提案している．ここでは，一般化 Kullback-Leibler divergence (KL 情報量) を用いて 1 日単位の需要時系列同士の距離を定義する手法を提案している．数値検討として，72 世帯に亘る実測のエネルギー需要量を対象に，1 日単位の時系列パターン同士の距離をそれぞれ算出し，ある日とある日の時系列パターン同士がどの程度異なるかという基準で定義された距離行列を作成してそのデータベース化している．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の構築を行っている。古典的なエネルギーシステムの運用方策決定の方法論として、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しないという認識から、不確実な係数を有する系の運用方策決定の方法論として確率計画法 (SP) を用いる提案を行っている。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が 21%増加することを明らかにしている。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、不確実性が増加してくると PEFC を使用しない運用方策が採用されるため、PEFC-CGS を活用するには予測シナリオの本数を増やさず予測精度を向上させる予測技術の必要性が示唆されている。

第6章では、HEMS の開発を目的としてその運用手法を提案している。提案手法は3つのステップから構成される。1つ目のステップは、実用的な予測モデルとして用いられている Just-In-Time モデリング手法を用いてエネルギー需要時系列・PV出力時系列パターンの予測を行っている。これは、第4章で提案した過去の需要時系列同士の距離を定義する手法に基づき構築したデータベースから、関係の深い因子から決定される類似波形を抽出することで、翌日のエネルギー需要・PV出力時系列パターンを検索するものである。2つ目のステップは、1つ目のステップで予測されたエネルギー需要量・PV出力を、第5章で提案した確率的最適運用計画問題へ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事前に決定するステップである。3つ目のステップは、事前に計画された運用方策に基づき実際の需要実現値においてシステムを運用・制御し、1日の運用成績を評価するというステップである。換言すれば、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。次世代家庭用エネルギーシステム8種類を対象として、提案手法である HEMS 運用手法を用いて運用成績を評価したところ、運用計画が予測に基づかない比較手法に対して、省コストとなる傾向を示すことを明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

以上より、従来ではエネルギー使用状況の閲覧に留まり、また、エネルギー機器毎に部分最適な運用を行っていた HEMS に対して、本論文では、予測に基づく確率的運用計画手法を用いた、システム全体最適となる HEMS 運用計画手法を提案している。また、数値実験によりその提案手法の運用費用の観点における有用性を示すことで、HEMS の開発指針の一方向を示唆するものである。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

吉田 彬 印

(2015年 1月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 論文	○Energy-saving Evaluation of SOFC Cogeneration Systems with Solar Cell and Battery, ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 1-7, 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Koichi Ito, Yoshiharu Amano
論文	○太陽電池・蓄電池組込み型 PEFC システムの省エネルギー性評価, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 816, pp. 1-11, 2014, <u>吉田 彬</u> , 伊東 弘一, 天野 嘉春
論文	○A Comparison of Optimal Operation of a Residential Fuel Cell Co-Generation System Using Clustered Demand Patterns Based on Kullback-Leibler Divergence, Energies, Vol.6, No.1, pp.374-399, 2013, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Noboru Murata, Koichi Ito, Takumi Hashizume
論文	病院用エネルギー供給システムの更新計画における初期システムの影響分析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.806, pp.2321-2323, 2013, 吉田 修, <u>吉田 彬</u> , 伊東 弘一, 天野 嘉春
b. 講演	○Evaluation of Optimal Capacity of Hot Water Tank in PEM Cogeneration System for Residential Energy Demand Profiles, Proceeding of ECOS 2014, Turku, June 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano
講演	○Impact of Electric Battery's Degradation on Economic and Energy Saving Characteristics of Residential Photovoltaic System, Proceeding of ECOS 2014, Turku, June 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Tomikazu Sato, Yoshiharu Amano, Koichi Ito
講演	○ Optimal Operation of a Residential Photovoltaic/fuel-cell Energy System using Scenario-based Stochastic Programming, Proceeding of ECOS 2013, Guilin, July 2013, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Koichi Ito
講演	○ A Comparison of Optimal Operation of Residential Energy Systems Using Clustered Demand Patterns Based on Kullback-Leibler Divergence, Proceeding of ECOS 2012, Perugia, June 2012, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Noboru Murata, Koichi Ito, Takumi Hashizume
講演	○Comparative Evaluation of Residential Energy Systems to Reduce CO2 emissions, World Engineer's Convention, Proceeding of WEC 2011, Geneva, Sept 2011, <u>Akira Yoshida</u> , Kouhei Ingaki, Yoshiharu Amano, Koichi Ito, Takumi Hashizume
講演	○Analysis of Energy Systems Supplying Hot Water and Electricity for Residential Use, Proceeding of IEA Heat Pump Conference 2011, Tokyo, July 2011, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Koichi Ito, Takumi Hashizume

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
b. 講演	○予測・運用計画・制御手法に基づく家庭用エネルギーシステムの時間帯別料金を考慮した経済性評価, エネルギー資源学会, 第31回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2015, 小方 亮平, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春
講演	予測・運用・制御の一貫したGEMSの電圧制御とHEMSの電熱運用手法との協調EMS手法の評価, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014, 芳澤 信哉, 河野 俊介, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春, 林 泰弘
講演	○快適性を考慮した家庭用エネルギーシステムの最適運用方策の検討, 日本機械学会 年次大会, 東京, 2014, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春
講演	○確率計画法を用いたエネルギー需要シナリオに対する家庭用PEFCシステムの最適運用方策の検討, 日本機械学会 第19回動力・エネルギー技術シンポジウム, 福井, 2014, <u>吉田 彬</u> , 小方 亮平, 村田 昇, 天野 嘉春
講演	家庭用PEFCシステムにおける給湯需要予測誤差が省エネルギー性に及ぼす影響の評価, 日本機械学会 第19回動力・エネルギー技術シンポジウム, 福井, 2014, 小方 亮平, <u>吉田 彬</u> , 村田 昇, 天野 嘉春
講演	スマートハウスにおける窓システムとエアコンの協調制御の評価, 空気調和・衛生工学会大会, 学術講演論文集, pp. 185-188, 2014, 江部 真里奈, 竹中 大史, 田辺 新一, 庄司 智昭, 海野 玄陽, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その1: 制御システムと評価対象建物概要, 日本建築学大会, 学術講演梗概集, pp. 159-160, 2014, 竹中 大史, 江部 真里奈, 海野 玄陽, 田辺 新一, 庄司 智昭, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その2: 協調制御とエアコン単体制御の電力消費量の比較, 日本建築学大会, 学術講演梗概集, pp. 161-162, 2014, 江部 真里奈, 竹中 大史, 海野 玄陽, 田辺 新一, 庄司 智昭, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	○地域別エネルギー需要特性に対する家庭用PEFCシステムの運用方策の検討, エネルギー資源学会 第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2014, <u>吉田 彬</u> , 天野 嘉春
講演	家庭用太陽電池システムへの蓄電池の導入効果の分析, エネルギー資源学会, 第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2014, 佐藤 富一, <u>吉田 彬</u> , 天野 嘉春, 伊東 弘一
講演	○典型的需要パターンが及ぼすエネルギー供給システムへの影響分析手法の検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013, 滋賀, 2013, <u>吉田 彬</u> , 村田 昇, 天野 嘉春

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
b. 講演	蓄電池の劣化特性を考慮した家庭用 PV-BT システムの検討, 日本機械学会 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp.235-238, 千葉, 2013, 佐藤 富一, 吉田 彬, 天野 嘉春, 伊東 弘一
講演	○戸建住宅における電力・給湯需要に対する各種エネルギー供給システムの比較分析, 日本機械学会 第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp.49-52, 東京, 2010, 吉田 彬, 小川 雅也, 天野 嘉春, 伊東 弘一, 橋詰 匠