

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2020
課題番号：18K14170
研究課題名（和文）HEMSアグリゲーションのための分散最適化手法

研究課題名（英文）Distributed optimization for HEMS aggregation

研究代表者

吉田 彬（YOSHIDA, Akira）

早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構・次席研究員

研究者番号：90707887

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：地理的に分散して配置された家庭部門における分散型エネルギー資源を家庭用エネルギー管理システムを介して集約することで、デマンドレスポンスのための所与の条件下で電力プロファイルを制御することを狙いとし、分散階層型エネルギー管理手法を構築した。数値実験を通して、家庭用エネルギー管理システムへ電力消費量の制約条件を上位層から与えることで、30分単位の大域的な電力プロファイルを管理しうることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案する分散階層型エネルギー管理手法は、家庭用エネルギー機器の監視制御に必要な起動停止特性および変換効率などのモデル粒度を保持したまま、これまで困難であった、数千世帯規模の大域的な電力プロファイルを管理する点に特徴を持つ。本手法は、家庭部門のみならず業務部門および産業部門にも適用可能であり、またスマートグリッドに限らず他のエネルギーインフラも協調的に管理することで、より広域のエネルギーの合理的利用の可能性を示唆するものである。

研究成果の概要（英文）：A distributed hierarchical energy management method is constructed to control the electricity profile under given conditions for demand response by aggregating distributed energy resources in the geographically dispersed residential sector through home energy management systems. Through numerical experiments, the research have shown that the distributed hierarchical energy management system can control the global electricity profile in 30 minutes by providing the constraint of electricity consumption to the home energy management system from the upper layer.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：分散階層型エネルギー管理 家庭用エネルギー管理システム 太陽光発電 デマンドレスポンス 混合整数線形計画法 0-1整数計画法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

分散型エネルギー資源(DER)を活用する地域エネルギー管理システム(CEMS)は、太陽光発電(PV)など再生可能エネルギーの地産地消を進め、脱炭素社会を実現するために重要である。家庭部門において DER を集約する効果は、世帯数の多さから、非常に高いと期待されている。

家庭用エネルギー管理システム(HEMS)導入の動機として、エネルギー需要の見える化および家電の自動制御によるユーティリティー料金の削減が挙げられる。しかし、料金の削減幅は大きくなく、導入のための動機づけが弱いことが指摘されていた。そこで、HEMS 同士が協調してより高次の目的、例えば電力系統の負荷平準化、を達成することで、より大きなインセンティブを得ることが考えられている。

安定して数メガワット(MW)規模のネガワット出力を生み出し電力取引市場に参入するために、数千世帯規模の需要家が協調して電力消費量および発電量を制御する必要がある。そのために全ての対象世帯への協調運用計画の枠組みを構築するという問題に取り組む必要性が生まれる。数千世帯の需要家を集約する困難さは、運用方策を決定し機器に履行させる監視制御問題の非凸性から生じている。この問題の決定変数は、連続値に加えて、on/off などの離散値を含んでいる。離散変数の増加は解の爆発として知られる解の探索範囲の指数関数的増加という問題状況を生じさせる。この問題状況を回避するため、個々の需要家の持つ HEMS の全ての機能を、マンション1棟を集中管理するビルエネルギー管理システム(BEMS)に委譲することで、マンション内で電力・温熱の融通を図るといった研究が進められている。最近の研究では、DER アグリゲーションを実現するデマンドレスポンス(DR)に応答するには、複数の集中型 BEMS をアグリゲーターへ集約する階層的な手法が実用上有効であるとの見解が主流になっている。しかし、集中型 BEMS は、個々の需要家のエネルギー需要に関するプライバシーを確保できず、また、全ての対象機器の特性を把握して制御指令を送る必要があり、スケーラビリティの課題は残されたままである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、様々な次世代家庭用エネルギー機器を混在して、MW 規模で集約する分散階層型 HEMS アグリゲーション手法を構築し、アグリゲーションシステム設計に関する知見を整理し体系化することである。

3. 研究の方法

本研究は、需要家の家電を制御する下位の HEMS と、複数の HEMS の運用方策を集約するアグリゲーターの2層から構成される分散階層型エネルギー管理システムを開発する。

3. 1 HEMS 運用計画問題

図1に示す通り、家庭用エネルギーシステムの構成要素として、太陽光発電(PV)、蓄電池(BT)、ルームエアコンディショナー(AC)および給湯機を考察の対象に取り上げる。ここではそれぞれの要素をブラックボックスモデリング手法により準静的モデルとして同定する。燃料電池コージェネレーション(PE)およびヒートポンプ給湯機(HP)は複数の運転モードを持つため、運転モードごとに入出力特性をモデル化する。最適運用計画問題の未知変数は、エネルギーおよび物質流量、運転モードを表現する 0-1 変数である。目的関数は評価期間全体に亘るユーティリティー費用を最小化するものとする。本問題は、混合整数線形計画(MILP)法として定式化され、汎用 MILP ソルバを用いて求解する。

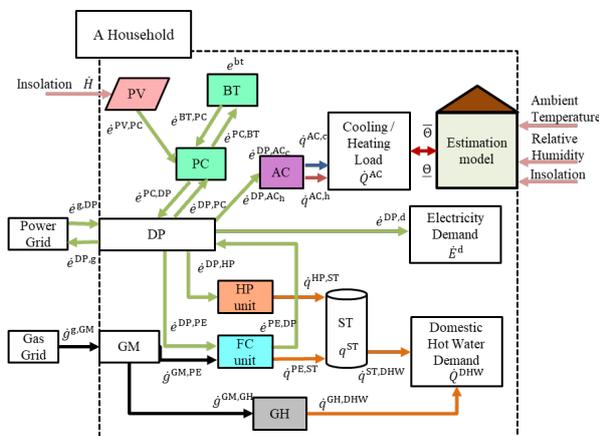


図1 家庭用エネルギーシステムの
スーパーストラクチャ

3. 2 分散階層型手法に基づく電力プロファイル生成

複数のエネルギーキャリアを持つエネルギーシステムのエネルギーマネジメントは電気系と熱系との慣性に起因する応答性の違いや、熱履歴などの機械保護特性に起因し難易度が高い。そこで、局所・大域的状態を階層的に管理するアプローチを採用する。本研究は、数千軒の需要家が持つ分散型エネルギー資源を個別に運用最適化し、アグリゲーターが全体最適を行う方法論を構築した。ここではアグリゲーターとHEMS間の通信を介して、HEMS層で局所的な状態を扱い、アグリゲーション層で大域的な状態を扱うことで、スマートグリッドにおける需給バランスという目標を達成する。また、階層化により集中型の管理手法のようにアグリゲーターがすべての

プロセスの状態を扱うことを避けることができる。提案手法では、前述の HEMS 運用計画問題へ、アグリゲーターを介して電力需給に関する制約式、例えば DR 時間帯のみ電力消費量の上限値が小さくなる、を与えることで、HEMS の運用方策を僅かに変化させ、集約する需要家の合計した電力プロファイルを変化させる。図 2 に示す手続きの通り、アグリゲーターは DR 時間帯における電力消費量の上下限値を HEMS へ与え、個々の HEMS より複数の運用方策を取得し、DR の所与条件を満足するまで電力消費量の上下限値を調整する処理を繰り返す。HEMS は DR 信号を受信しなかった場合の運用方策時のベースラインとなる電力プロファイル、およびインセンティブ価格に応じて運用方策を変化させた電力プロファイルを特定の時間内で求め、アグリゲーターへ回答する。HEMS が導出したいずれの運用方策でも、需要家のエネルギー需要は満足するものとし制約するため、アグリゲーターは HEMS が提案するいずれの運用方策でも選択することができる。

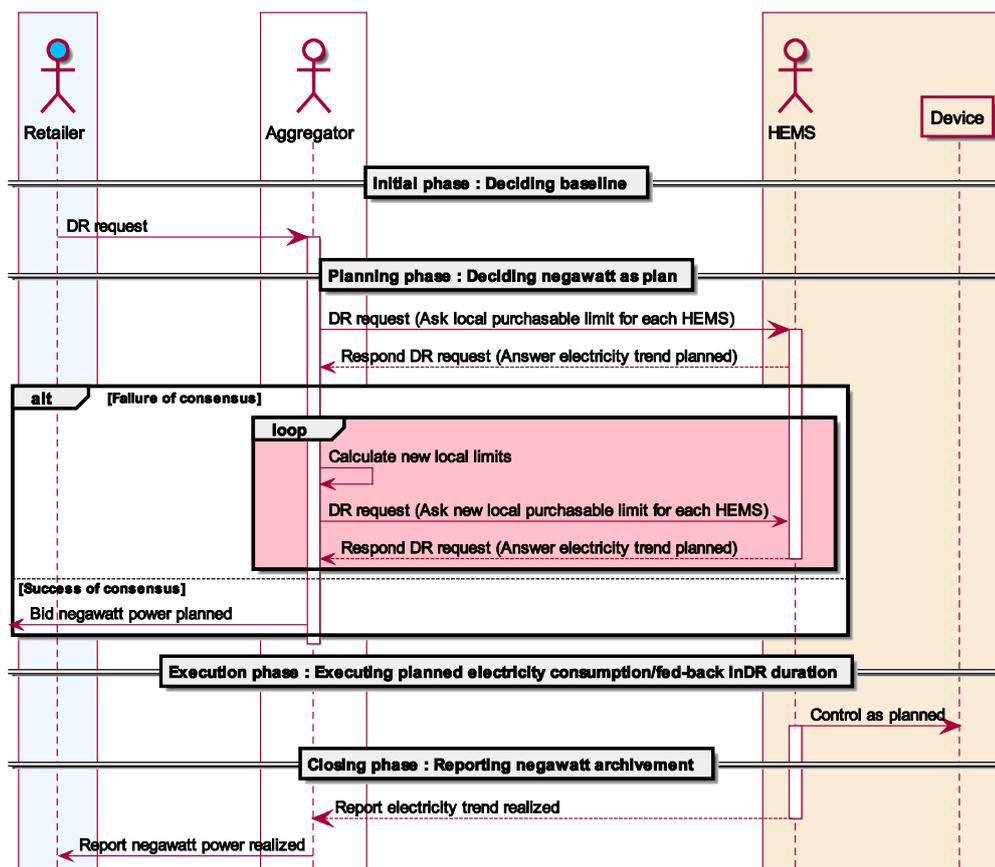


図 2 HEMS アグリゲーションシーケンス図

3. 3 アグリゲーション問題における高速な近似解の導出

30 分値の電力プロファイルを管理するためには、それより短周期でのフィードバック制御が要求される。本研究は、前述の各 HEMS から提案される複数の運用方策から、アグリゲーターが DR 所与条件を満たす運用方策を高速に選択する手法を構築した。運用方策を選択した際に需要家へ支払う費用を最小化する目的関数を定義し、大域的なベースラインとなる電力プロファイルからある一定量を変化させるという制約条件、および 1 つの HEMS から採用される運用方策はただか 1 つまでであるという制約条件を加える。本問題は 0-1 整数計画問題として定式化する。NP 困難な問題であるため多項式時間で厳密解を得られる保証はなく、高速化が課題となる。本研究は、制約なし 0-1 整数計画問題へと変換し、アニーリングマシンを採用することで高速化するアプローチを採用した。

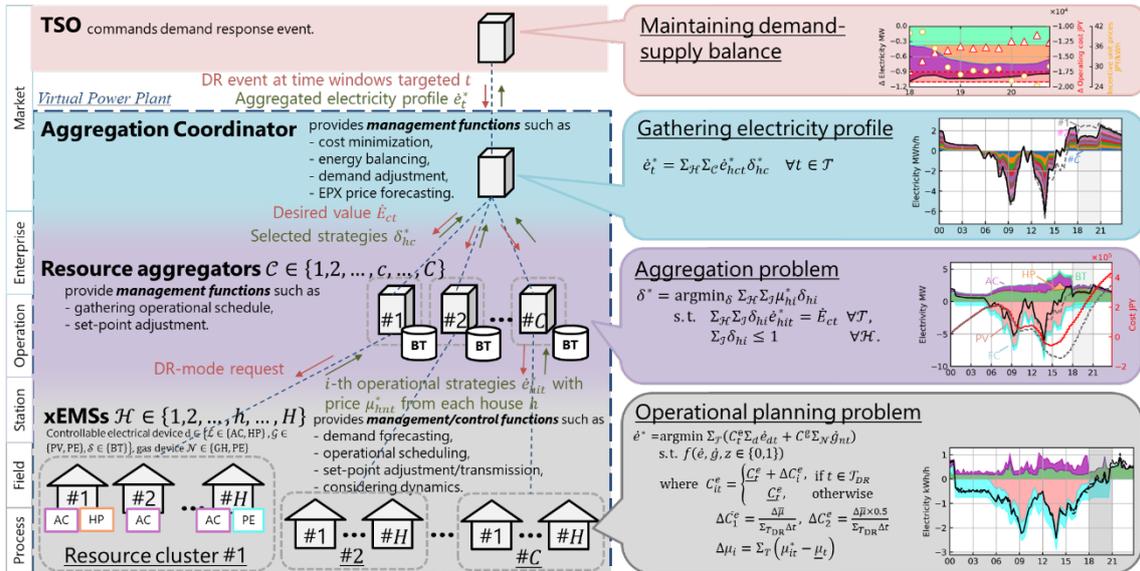


図3 アグリゲーターおよび HEMS の階層的接続関係および各階層における最適運用計画問題

4. 研究成果

本研究の検討対象は機械のモデル化、HEMS 運用計画、電力プロファイルの大域的な集約と多岐にわたるため、特に重要となるアグリゲーション結果の主たる結果を概観する。

4. 1 数値条件

数値実験において、東京都のある市における 4,000 世帯をアグリゲーション対象とし、夏季ピーク日における 18 時から 3 時間の間、ベースラインから 1MW の節電を行う問題を設定した。DR の成否は、30 分の実績値が目標値の $\pm 10\%$ に収まるかを判定基準とする。可制御機器は、AC・HP・PE・BT であり、それぞれ 100%・50%・20%・5%の需要家が保有する。15 分ごとに予測誤差を補償するフィードバックを HEMS へ与え、運用方策を繰り返し導出するため、計算時間の観点で 4,000 軒の需要家を複数のクラスタに分割した。その際、個々のクラスタへ 1MW を均等割した目標値を与えた。HEMS は、ベースラインおよび 2 種類のインセンティブ価格に応じた 2 つの運用方策の合計 3 つの運用方策をアグリゲーターに提案し、アグリゲーターは 3 つの中からいずれか 1 つの運用方策を選ぶものとする。

4. 2 数値結果

図 4・5 は、ベースラインから 1MW を削減する DR を行った結果を示す。図 4 の左右軸はそれぞれ 4,000 世帯合計の電力プロファイルおよび運用費を示す。積み上げ棒グラフは非可制御機器および可制御機器が消費した電力消費量あるいは発電量を示す。図 5 の左軸は、ベースラインから変化した実績を示し、右軸はその際の運用費の変化および当該時刻の需要シフトを発生させるためのインセンティブ費用を示す。結果として、DR 対象時刻 18 時~20 時 30 分において、0.9MW 以上の削減を達成していることがわかる。BT・HP はそれぞれ 14・15 時から蓄エネルギーを始めており、本数値解析の条件下では、これらの機器は DR 開始の 4 時間前までに通知を受けることで、DR に対応できることが示唆された。図 6 は 4,000 軒の需要家がアグリゲーターとの通信を介して大域的な電力プロファイル生成に要する計算時間を示す。実時間では約 10 分を要し、15 分間隔のフィードバックを行い HEMS の運用方策を更新するには十分な計算速度である。内訳を確認すると、最適化問題を解くイジングマシンおよび MILP ソルバの求解時間はそれぞれ 1%・30%であり、前者の最適化専用ハードウェアの有効性が強調される結果となった。

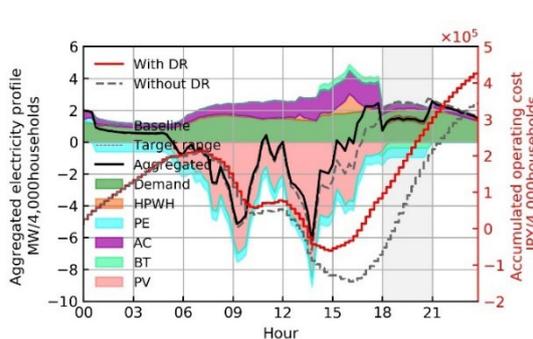


図4 夏季ピーク時 DR の電力プロファイル

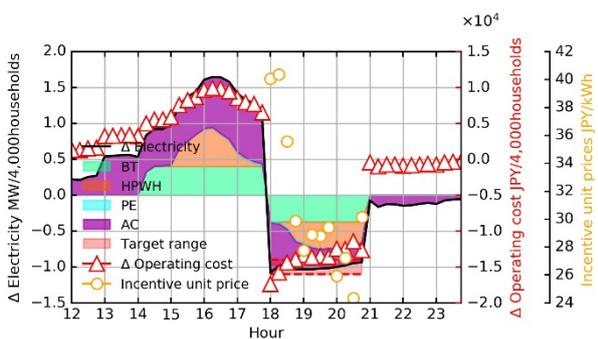


図5 可制御機器の電力プロファイル変化の内訳

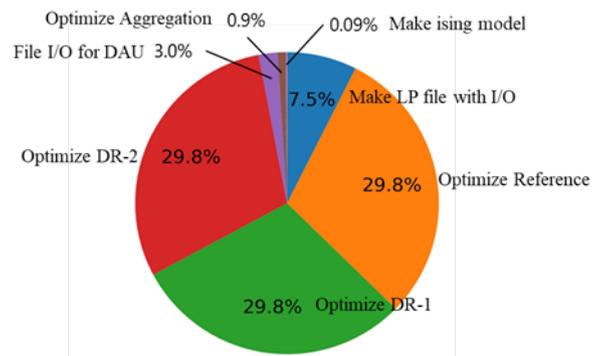


図 6 大域的電力プロファイル生成に要する計算時間の内訳

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Akira Yoshida
2. 発表標題 An online HEMS scheduling method based on deep recurrent neural network
3. 学会等名 32th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Enironmental Impact of Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 彬
2. 発表標題 太陽光発電大量導入地域における蓄熱システムの余剰電力吸収効果の検討
3. 学会等名 第36回エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 彬
2. 発表標題 地域冷暖房を対象としたデマンドレスポンスのポテンシャル評価
3. 学会等名 第36回エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 彬
2. 発表標題 太陽光発電に併設した可逆燃料電池による余剰電力吸収効果の検討
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会 研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 彬
2. 発表標題 蓄熱空調システムの新たな活用とその評価
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会 研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 寅之輔
2. 発表標題 熱回路網モデルおよび混合整数最適化モデルから構成されるエネルギー評価基盤を用いた実在都市に対する2030年におけるエネルギー消費動向のシナリオ分析
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 寅之輔
2. 発表標題 複数住宅の断熱・蓄熱性能と住設機器の組み合わせを考慮した協調節電効果の分析
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第26期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Yoshida
2. 発表標題 Asynchronous ADMM HEMS aggregation scheme in smart grid
3. 学会等名 Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Yoshida
2. 発表標題 Environmental Efficiency Evaluation in High Solar Wind Penetration Region with Fractional Optimization-based Operational Planning
3. 学会等名 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Enironmental Impact of Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toranosuke Saito
2. 発表標題 Fast Hierarchical Coordination Using Price Signal for Town-scale Home-EMSs Aggregation with Digital Annealer
3. 学会等名 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Enironmental Impact of Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toranosuke Saito
2. 発表標題 Combinatorial Optimization-based Hierarchical Management of Residential Energy Systems as Virtual Power Plant
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Yoshida
2. 発表標題 Hierarchical Residential Aggregation Method Incorporating Energy Demand Forecast
3. 学会等名 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Enironmental Impact of Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------