

電力市場取引のための 需要家側エネルギーリソース運用制御手法

吉田 彬, 柏川 貴弘, 木村 浩一, 天野 嘉春

種々の電力市場に参加するため、小規模の需要家側エネルギーリソース (DSR) の大規模集約という課題が生じている。筆者らは DSR を運用制御するエネルギー管理システム (EMS) との電力価格信号の通信により電力プロファイルを間接的に変更し、それらを集約する階層的電力アグリゲーション手法を開発した。電力プロファイル集約は組合せ最適化問題として定式化され、イジングモデルに変換したのちアニーリング方式で求解する。本稿は、DSR を運用制御して発電機と同等の機能を提供する仕組みである仮想発電所へ提案手法を適用し、1MW の負荷を削減・増加させた事例を紹介する。

キーワード：仮想発電所、家庭用エネルギー管理システム、電力アグリゲーション問題、需要家側エネルギーリソース

1. はじめに

本稿では、需要家の受電点以下に接続される発電・負荷および蓄エネルギー装置である需要家側エネルギーリソース (DSR) を運用制御して発電機と同等の機能を提供する仮想発電所 (バーチャルパワープラント：VPP) を概観し、筆者らの提案する VPP 手法の家庭部門における検討事例を紹介する。

VPP の実施主体であるアグリゲーターは、小売事業者の電力調達コストダウンおよびインバランス回避、ならびに系統運用者向けの厳気象時の需給逼迫予備力および調整力の供出などさまざまな目的 [1] に対して DSR を運用・制御し、2022 年度より開始される電気事業法上の特定卸供給事業者制度を法的根拠として、集約した負荷の増加・削減量を市場にて売却することで利益を上げる。この行為は、電力を供給する電気事業者からみて需要家側の負荷を上げ・下げすることから、上げデマンドレスポンス (DR) および下げ DR と呼ばれる。火力用ガスタービンの小型化・高効率化とそれに伴う発電分野の規模の経済性の消失により、電力小

売市場は規制政策から競争政策へと舵を切った [2]。電力は瞬時に需給を一致させる必要がある一方、市場の電力価格を需要側にリアルタイムに伝える技術が未発達であり価格弾力性に乏しいため、需給一致は価格と数量の調節によって実現される。電力市場は、卸電力・調整力・容量市場の 3 種類においてそれぞれ異なる価値を交換する。

2016 年 4 月より小売全面自由化が開始され、発電・小売は卸電力市場を介して電力量すなわち kWh 価値を取引する。前述のとおり電力は瞬時に需給を一致させる必要があるため、発電・小売電気事業者はそれぞれ 30 分単位の計画値と実績値の差分であるインバランスを算定するバランシンググループ (BG) を構成し、インバランスが発生した際はある料金設定に基づきインバランス精算を行う。インバランスは主として変動性再生可能エネルギー (VRE) および電力需要の予測誤差に起因して発生し、一般送配電事業者がこれを解消する責を負う。

一般送配電事業者は、2020 年 4 月に中立的な電力の流通を目指して送配電部門が発電・小売とは別会社となったもので、BG ごとに接続供給契約を締結し、2021 年 4 月より開始された調整力市場を介して、需給に合わせて出力を制御できる電源すなわち Δ kW 価値を確保する。太陽光発電 (PV) および風力発電 (WT) などの VRE は、電力使用者から徴収される再生可能エネルギー発電促進賦課金を原資として、固定価格買取制度 (FIT) を活用して設備導入が進展している。再生可能エネルギーは、燃料費がかからず運用・保守費用が安価であり、また FIT 終了後は発電設備の投資回収が完了しているため、Feed-in-Premium 電源として

よしだ あきら

早稲田大学スマート社会技術融合研究機構

〒162-0044 東京都新宿区喜久井町 17

a.yoshida@aoni.waseda.jp

かしかわ たかひろ, きむら こういち

富士通株式会社富士通研究所 量子研究所量子ソフトウェアプロジェクト

〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4-1-1

kashikawa@fujitsu.com

k.kimura@fujitsu.com

あまの よしはる

早稲田大学理工学術院基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科
yoshiha@waseda.jp

卸電力市場価格に一定の補助額を上乗せして引き続きの再生可能エネルギーの導入を促進し、短期限界費用の非常に安価な電源として卸電力市場へ参入してくる。一方、VRE 出力は天候依存のため蓄電池が十分な容量普及していない現状ではバックアップとなる火力発電が一定量必要である。しかし、短期限界費用で卸電力市場の価格形成がなされる場合、VRE と比較して可変費すなわち燃料費のかかる火力発電は固定費すなわち設備投資の回収が困難となり、日本全体での発電能力が不足することが懸念されている [3]。

そのため、電力広域的運営推進機関は 2024 年度より容量市場を開設し、電源投資が行われるよう適切な容量すなわち kW 価値を確保している。アグリゲーターは、VPP を介して需要家へ DR を行い、集約した kWh・ Δ kW・kW 価値をこれら市場に売却することで、その利益を最大化するものである。電力市場に参加するには、それぞれの市場の参加要件、たとえば 30 分コマ単位で最低入札量が 1MW など、を満たす必要がある。そのため、MW 規模の負荷削減・増加が単体で可能な大口需要家を有する場合を除いて、小口需要家の DSR 設備および負荷設備をプールして群管理する機能すなわちエネルギー管理システム (EMS) が求められる [4]。

一般的な EMS の定義は ISO50001 に依拠し、プラントの消費するエネルギーの利用効率を定点観測し、改善していく活動を指す [5]。前述の電力システム改革に加えて計測・制御機器のデジタル化の進展により、エネルギー需給をリアルタイムで把握する必要性および能力が高まった結果、EMS はプラント内の複数の設備の連携した運用・制御によりシステムを全体最適化してエネルギー効率を向上させる機能を志向していった [6]。EMS は管理対象とする部門ごとに呼称が異なり、工場・ビル・家庭はそれぞれ FEMS, BEMS および HEMS である。対象とするプラントは、消費設備に限らず、蓄電・発電設備も含み、また単一のプラントに限らず複数プラントを管理しうる。EMS はデジタル通信およびアルゴリズムに基づき複数プラントの運転管理および市場取引を行うエージェントとしての機能を果たすことになり、外部システムとの通信機能を有し電力取引に特化していった EMS へ VPP という呼称が定着していった、と筆者は解釈している。

電力市場取引のため電気事業者および需要家の EMS をデジタル通信網で接続し互いの状態をリアルタイムに通信する規格を統一する必要性が高まり、国際標準化が進展している [7]。日本では電気事業者からアグ

リゲーターまでは OpenADR2.0 が標準であり、家庭用機器は ECHONET Lite を通信標準として用いる。筆者の所属するスマート社会技術融合研究機構ではスマート化するすなわちデジタル通信を用いた分散型エネルギーリソースの管理手法について、通信標準および応用例などの検討をしており [1, 8]、筆者はエネルギー変換機器のモデル同定から、ボトムアップ的に VPP/EMS を模擬する基盤開発に取り組んでいる。

VPP 類型として、本稿では個々の需要家の HEMS をアグリゲーターの上位 EMS が束ねて、全需要家の電力プロファイルを塊として管理するモデルを取り上げる。以降の節において、HEMS・VPP モデルを述べた後、数値実験結果を概観する。

2. 最適運用計画問題

HEMS は、アグリゲーターから通知された下げ DR・上げ DR に対応するため家庭用エネルギー機器、具体的には熱源機および蓄エネルギー装置、の運用方策を管理する。運用方策を導出する最適運用計画問題は、連続および離散変数を含む混合整数計画 (Mixed Integer Programming: MIP) 問題として定式化される。本問題における離散変数は、機器の導入・非導入、on/off、運転モードのステートマシンおよび入出力関係の非線形特性の区分線形近似など、対象とするエネルギー変換要素の緻密な表現に用いられる。モデルの緻密さ、ここでは主として離散変数の数、と計算複雑度にはトレードオフが存在するため、モデル化・最適化の精度の両立が要求される。

家庭用エネルギー消費量のうち本稿の HEMS が制御しうる給湯・冷暖房用途はそれぞれ 27.6%・28.5% [9] と合計で 5 割以上を占め、残りの 43.9% である厨房用・動力他のエネルギー消費量は、需要家が直接制御する性質であるため、HEMS からは非可制御であるとす。給湯用熱源機は、近年、直接燃焼式ガスヒーター (GH) から電動ヒートポンプ給湯機 (HP) および燃料電池コージェネレーション (FC-CGS) への入れ替えが進んでいる。出力が 1kW 未満の小型 FC は、固体高分子形 FC (PEFC) および固体酸化物型 FC (SOFC) が商品化 [10] されており、それぞれ頻繁な発停および発電効率に優れるという特性を有する。DR 信号に合わせて需要家側電力プロファイルを制御するため、CGS の主機には PEFC を取り上げる。CGS はガスを入力として発電時の排熱から温水供給を行い、電気・熱の両方を利用する場合に大規模火力発電と比較して総合効率が良いため、排熱を貯める貯湯槽 (ST) を有

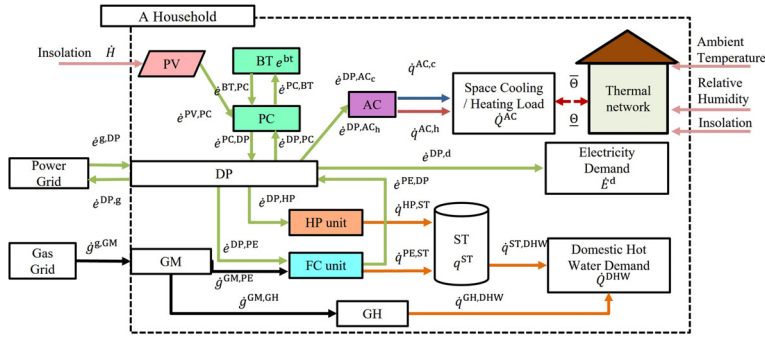


図 1 家庭用エネルギーシステムスーパーストラクチャ

し、熱主電従運転を行う。HP も ST を有し、電気料金が高い時間帯にヒートポンプを稼働し蓄熱する。これらの新しい給湯システムは熱源機の運用に自由度があるために 1 日単位の運用方策に基づき熱源機を運転する。HEMS は各家庭 $h \in [1, H] \in \mathcal{H}$ の目的関数 f をそれぞれ最小化し、その際、決定変数として電力 \dot{e} kWh/h、熱流量 \dot{q} kWh/h、ガス流量 \dot{g} Nm³/h、蓄熱量 q kWh、蓄電量 e kWh、温度 θ °C および機器の状態・発停 $\delta \in \{0, 1\}$ を監視制御する。各エネルギー供給/変換機器の安定性はローカル制御器により保証されているものとする。図 1 は、1 需要家を対象とした家庭用エネルギーシステム系統図のスーパーストラクチャを示す。スーパーストラクチャからどの候補機器を選択するかという機器構成設計問題は、本分野の重要な課題の一つである。一方、本稿の数値実験においては、図 1 に定義されたエネルギー機器候補より機器を事前に選択し、各需要家の設備を構成しておく。需要家に応じて構成機器は異なるものの、全世界にルーム・エアコンディショナー (AC) を含むものとする。式 (1) は各 HEMS h の目的関数である運用経費 μ_h JPY を示す。電力プロファイル \dot{e} kWh/h およびガス消費量 \dot{g} Nm³/h にそれぞれ時変コスト係数 C_t を乗じたものを評価期間 T で合算し、最小化する。

$$\dot{e}_h^*, \mu_h^* = \operatorname{argmin}_{\dot{e}, \dot{q}, \dot{g}, q, e, \theta, \delta} \sum_{t=1}^T (C_t^e \dot{e}_{ht} + C_t^g \dot{g}_{ht}) \quad (1)$$

式 (2) のとおりガス消費量 \dot{g} は PEFC-CGS, 以下 PE と略記、および GH の消費量の合計値である。

$$\dot{g}_{ht} = \dot{g}_{ht}^{\text{PE}+} + \dot{g}_{ht}^{\text{GH}+} \quad (2)$$

運用計画問題は、エネルギーおよび物質収支ならびに機器特性を制約式とする。対象とする需要量は、電力需要 \dot{E} kWh/h、給湯需要 \dot{Q} kWh/h および冷暖房需要であり、式 (3)–(5) にそれぞれ制約式を示す。冷

暖房負荷は、ある快適温度幅 $\underline{\theta} \sim \bar{\theta}$ °C に室温 θ °C が収まるよう制約される。快適温度幅は、熱的快適性の判断基準として採用した予想平均温冷感申告 (PMV) が特定の範囲に収まる上下限温度幅と定義し、運用計画に先立ち算出する。最適化の決定変数としての温度は、線形化した建物の熱回路網モデルにより算出する。本制約により、電力プロファイルの上制限制約が厳しくなる時間帯前、あるいは電力価格のピーク時間帯前において、プレヒーティングおよびプレクーリングを可能とする。

$$\dot{e}_{ht} + \dot{E}_{ht}^{\text{PV}-} + \dot{e}_{ht}^{\text{PE}-} + \dot{e}_{ht}^{\text{BES}-} = \dot{E}_{ht} + \dot{e}_{ht}^{\text{AC}+} + \dot{e}_{ht}^{\text{HP}+} + \dot{e}_{ht}^{\text{BES}+} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{ht}^{\text{ST-HP}} + \dot{q}_{ht}^{\text{ST-PE}} + \dot{q}_{ht}^{\text{GH-}} = \dot{Q}_{ht} \quad (4)$$

$$\underline{\theta}_{ht} \leq \theta_{ht} \leq \bar{\theta}_{ht} \quad (5)$$

ここで、各変数の右上の添字は機器を具体化したものであり、略語および正負の符号は、それぞれユニット名およびユニットへの入出力である。また、変数名において大文字およびアルファベットの小文字はそれぞれ外生変数および最適化問題の決定変数である。PV からの出力 $\dot{E}_{ht}^{\text{PV}-}$ は交流端での発電量を外生変数として与える。AC の熱処理量 $\dot{q}_{ht}^{\text{AC}-}$ kWh/h は AC の消費電力 $\dot{e}_{ht}^{\text{AC}+}$ kWh/h にパラメータとしての成績係数 (COP) α^{AC} を乗じて式 (6) のとおり算出する。

$$\dot{q}_{ht}^{\text{AC}-} = \alpha_t^{\text{AC}} \dot{e}_{ht}^{\text{AC}+} \quad (6)$$

蓄電システム (BES) は蓄電池 (BT) およびパワーコンディショナー (PCU) から構成される。BT および PCU にはそれぞれ蓄電効率 η^{BT} および充放電効率 η^{PCU} を設け、また、充放電速度 \bar{E}^{PCU} kW/h は PCU において設定する。充電量 e^{BT} の収支、PCU における収支、および充放電速度制約を、それぞれ式 (7)、式 (8)・(9)、ならびに式 (10)・(11) に示す。

表 1 エネルギーシステム主要パラメータ

Specification	Unit	Value	
BT	Capacity	kWh	8.0
	Minimum state-of-charge	—	10%
	Charge/discharge efficiency	—	92.7%
	Charge/discharge rate	kW	2.0
	Self-discharge loss	h ⁻¹	1.00%
PV	Panel and PCU capacity	kW	4.0
GH	LHV Efficiency	—	95.0%
HP	Maximum output	kW _{th}	4.5
	Maximum output	kW _e	0.75
PE	Minimum output	kW _{th}	1.08
		kW _e	0.20
		kW _{th}	0.21
ST	Volume	L	370
	Thermal loss	h ⁻¹	1.0%

$$e_{ht}^{BT} - \eta^{BT} e_{h,t-1}^{BT} = (\dot{e}_{ht}^{BT+} - \dot{e}_{ht}^{BT-}) \Delta t \quad (7)$$

$$\delta_{ht}^{BES+} \dot{e}_{ht}^{BES+} \eta^{PCU} = \dot{e}_{ht}^{BT+} \quad (8)$$

$$\delta_{ht}^{BES-} \dot{e}_{ht}^{BT-} \eta^{PCU} = \dot{e}_{ht}^{BES-} \quad (9)$$

$$\dot{e}_{ht}^{BES+} \leq \overline{E}^{PCU} \delta_{ht}^{BES+} \Delta t \quad (10)$$

$$\dot{e}_{ht}^{BES-} \leq \overline{E}^{PCU} \delta_{ht}^{BES-} \Delta t \quad (11)$$

ここで Δt は離散時間間隔を示す。

PE は、燃料電池ユニット、余剰電力回収ヒーター (EH)ST およびバックアップ用 GH から構成される。また、HP はヒートポンプユニットおよび ST から構成される。ST は BT と同様に蓄熱効率 η^{ST} を設定し、式 (12) に示すエネルギー収支で制約される。

$$q_{ht}^{ST} - \eta^{ST} q_{h,t-1}^{ST} = (\dot{q}_{ht}^{ST+} - \dot{q}_{ht}^{ST-}) \Delta t \quad (12)$$

GH, PEFC ユニットおよび HP ユニットは、それぞれ式 (13)–(15) にて制約される。

$$\dot{q}_{ht}^{GH-} = \eta^{GH} \dot{g}_{ht}^{GH+} \quad (13)$$

$$(\dot{q}_{ht}^{PE-}, \dot{e}_{ht}^{PE-}) = f_{PE}(\dot{g}_{ht}^{PE+}) \quad (14)$$

$$\dot{q}_{ht}^{HP-} = f_{HP}(\dot{e}_{ht}^{HP+}) \quad (15)$$

熱源機の COP の温度に対する非線形特性は区分線形近似し、また、起動・停止時の運用モードの変更は論理変数を用いたステートマシンとして実装する。これらの論理変数は、一つの組の論理変数のうち高々一つまでが 1 になりうる。たとえば、ある時間断面において、機器の部分負荷出力はある一つを選択して設定値として機器へ入力する必要がある、また、機器のウォームアップ、定常状態およびシャットダウンのうちある一つの状態のみ取りうる。家庭用エネルギーシステムの主たるパラメータを表 1 に示す [10, 11].

3. 電力プロファイルアグリゲーション問題

家庭部門 1 需要家あたりの可制御負荷・発電機は高々数 kW であり、市場参入要件である 1MW を達成するには、数千需要家の HEMS の振る舞いをアグリゲーターの有する上位 EMS がとりまとめることになるため、需要家数に関してスケーラブルな手法が要求される [12–14]. HEMS の全機能をアグリゲーターの EMS が代替する集中型手法は、運用方策の計画に必要な家庭のエネルギー需要を上位 EMS に伝える必要がある、また機器を直接制御する権限を上位 EMS に移譲するため、プライバシーの課題も残されている。このスケーラビリティおよびプライバシーの課題を解決するため、集中型と同等の解を並列計算で得ること

のできる、大域的最適解の理論的な保証のある分散凸最適化手法を適用したアグリゲーション手法が報告されている [15]. しかし、分散凸最適化アグリゲーション手法を実際に実装にするにあたり、凸関数のみでは離散性などの非凸性、たとえば単純な on/off 論理ですら、表現できないというモデルの表現力に関する課題が残されている。非凸最適化のうち変数に離散性を含む問題は、分枝限定法などに代表される解候補を体系的に探索するアルゴリズムにより大域的最適解を理論的に保証しうる一方、組合せの爆発として知られる離散変数の増加に伴う計算複雑性の増加により、離散変数の数が大規模に増加する問題を実時間で解くことは困難である。これら非凸性から生じる課題に対して、非凸問題へ凸緩和を施し、緩和問題の解を求めた後、その緩和問題を元の非凸問題に反映させる発見的手法を特定の事例に適用した報告 [16] があるものの、汎用的かつスケーラブルな性能をもつ非凸アルゴリズムの確立には至っていない。

そこで、本稿では各 HEMS が導出した複数の運用方策、すなわち計画された電力プロファイル群をアグリゲーターの上位 EMS が選択的に集約するアグリゲーション問題を考える。まず、DR 発動情報を得た HEMS は、ある運用方策 δ_{hi} を採用した場合の電力プロファイル \dot{e}_{hi} および要求するインセンティブ報酬 $\Delta\mu_{hi}$ を複数案アグリゲーターに通知する。ここで、案の添字を $i \in \mathcal{I}$ とする。次に、アグリゲーターは目標となる電力プロファイル \dot{E}_c を満足するよう、需要家へのインセンティブ報酬 $\Delta\mu_{hi}$ の合計値を最小化し、運用方策 δ_{hi} を選択する。図 2 はスマートグリッドアーキテクチャモデルを参考にした DSR のスマートグリッド

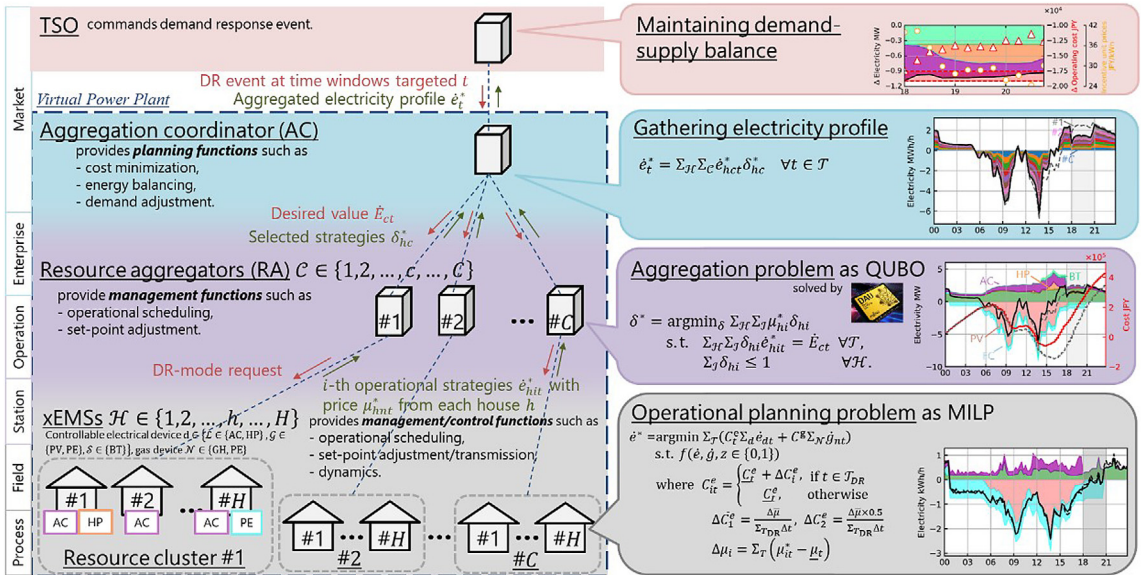


図 2 階層的電力アグリゲーション手法

Algorithm 1 Hierarchical aggregation.

Result: Aggregated electricity profile e_t^* ,
Selected strategies δ_{hc}^*
Initialize: DR event at time windows targeted \mathcal{T}
Desired value \dot{E}_t

- 1 HEMSs make operational strategies *in parallel*
- 2 Feasibility check to reach the desired value \dot{E}_t
- 3 Divide households into clusters
- 4 while $\sum_C \dot{E}_{ct} \neq \dot{E}_t$ do
- 5 for cluster = 1, C *in parallel* do
- 6 $\sum_C \dot{E}_{ct} = \dot{E}_t \quad \forall \mathcal{T}$
- 7 while $\sum_H \sum_C e_{hct}^* \delta_{hc}^* \neq \dot{E}_{ct}$ do
- 8 update W_c, β_c , and γ_c
- 9 while error $\neq 0$ do
- 10 $\delta^* = \operatorname{argmin}_{\delta} \sum_H \sum_I \mu_{hi}^* \delta_{hi}$
- 11 error = count ($h | \sum_{\mathcal{T}} \delta_{hi}^* > 1$)
- 12 update \dot{E}_{ct}
- 13 $e_t^* = \sum_H \sum_C e_{hct}^* \delta_{hc}^* \quad \forall \mathcal{T}$

平面であり、階層的アグリゲーション手法の概観を示す。図中および本稿のケースでは家庭用エネルギー機器のみを考察の対象に取り上げているが、方法論としては業務・産業用リソースにも適用可能である。Algorithm 1 は、提案するアグリゲーションアルゴリズムを示す。前述のとおり、HEMS は DR 発動なしの通常の電気料金 C_t^e を用いた場合のベースラインとなる運用方策を導出し、アグリゲーターより DR 信号を受信した後に、DR 時間帯にどの程度の電力量をシフトできるかを、その追加費用とともに導出する。アグリゲーターは、実業における分業を念頭に、市場との

やり取りを行うアグリゲーションコーディネーターおよび、需要家とのやり取りを行うリソースアグリゲーター (RA) に機能分化した。前者のアグリゲーションコーディネーターは、DR で要求される電力プロファイル \dot{E}_t を受信し、各 RA へ目標となる電力プロファイル $\sum_C \dot{E}_{ct}$ を割り当て、目標値に対する計画値の充足を判定する機能を有する。アルゴリズム中では、需要家がクラスタリングされ電力プロファイルが集約されることに相当するため、図表中では RA をそれぞれクラスタ番号 $c \in \{1, \dots, C\} \in \mathcal{C}$ により区別する。

電気料金型 DR を参考に、DR 発動時間帯 \mathcal{T} において、DR 発動なしの通常の電気料金 C_t^e JPY/kWh に電力消費量が忌避されるのに十分なインセンティブ価格 ΔC_{it}^e JPY/kWh を加味して、時変コスト係数 C_{it}^e JPY/kWh を設定する。

$$C_{it}^e = \begin{cases} C_t^e + \Delta C_{it}^e, & \text{if } t \in \mathcal{T} \\ C_t^e, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

インセンティブ価格 ΔC_{it}^e は、式 (17) の追加コスト $\Delta \mu_i$ JPY に基づき決定する。この追加コストは、DR 発動ありの電気料金 C_{it}^e を用いた場合の運用経費 μ_i と、DR 発動なしの通常の電気料金 C_t^e を用いた場合の運用経費 μ との差である。換言すれば、DR 発動に伴い運用方策を変更したために追加的に生じる運用経費の増分を、アグリゲーターが需要家に支払うべき最低限の DR インセンティブ報酬 $\Delta \mu_i$ として設定している。

$$\Delta\mu_i = \mu_i - \underline{\mu} \quad (17)$$

$$\Delta C_i^e = \frac{\Delta\mu_i}{\sum_{t \in \mathcal{T}} \Delta t} \quad (18)$$

ここで、簡単のためインセンティブ価格 ΔC_i^e は DR 期間中一定としているものの、より需給が逼迫するコマに価格を高くする傾斜配分へ拡張することも可能である。

最終的に、アグリゲーション問題は運用経費増分を最小化する目的関数式 (19)、DR 中の電力プロファイル制約式 (20) および一つの HEMS から高々 1 案までを選択する式 (21) の三つの式から構成される。

$$\delta^* = \operatorname{argmin}_{\delta} \sum_{\mathcal{H}} \sum_{\mathcal{I}} \Delta\mu_{hi}^* \delta_{hi} \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\mathcal{H}} \sum_{\mathcal{I}} \delta_{hi} \dot{e}_{hit} = \dot{E}_{ct} \forall \mathcal{T}, \quad (20)$$

$$\sum_{\mathcal{I}} \delta_{hi} \leq 1 \forall \mathcal{H}. \quad (21)$$

本問題は集約する運用方策 δ_{hi} の数に対して計算量が増加するため、計算量の削減が重要な課題となる。本稿では、30 分おきの運用計画を実現する目的でアルゴリズム全体を 15 分以内で完了させるため、第 2 世代富士通デジタルアニーラ (DA) [17] を用いて、短時間で電力アグリゲーション問題の近似解を得ることを検討した。DA は二次制約なし二値最適化 (QUBO) 形式を入力として受け入れているため、ラグランジュ乗数法により重み ρ を乗じて式 (20)・(21) を目的関数へ加算し式 (22) へと変換することで、式 (23) の QUBO モデル、すなわちイジングモデルを作成した。

$$\sum_{\mathcal{H}, \mathcal{I}} \Delta\mu_{hi}^* \delta_{hi} + \rho_e (\sum_{\mathcal{H}, \mathcal{I}} \dot{e}_{hit} - \dot{E}_{ct})^2 + \rho_b \prod_{\mathcal{I}} \delta_{hi} \quad (22)$$

$$\delta^* = \operatorname{argmin}_{\delta} -\frac{1}{2} \sum_j \sum_{k \neq j} \mathbf{W}_{jk} \delta_j \delta_k - \sum_j \beta_j \delta_j + \gamma \quad (23)$$

重み係数行列 \mathbf{W} 、重み係数ベクトル β および切片 γ は式 (22) を展開してそれぞれ次のとおりとなる。

$$\mathbf{W}_{jk} = -2(\rho_e \dot{e}_j^* \dot{e}_k^* + \rho_b) \quad (24)$$

$$\beta_j = -(\Delta\mu_j^* - 2\rho_e \dot{e}_j^* \dot{E}_{ct} + \rho_e \dot{e}_j^*) \quad (25)$$

$$\gamma = \rho_e \dot{E}_{ct}^2 \quad (26)$$

4. 数値実験結果

下げ・上げ DR はそれぞれ 18~21・12~15 時に実施し、両者ともに DR 発動のないベースケースから 1MW を減少・増加させる。対象とする需要家数 H は 4,000 世

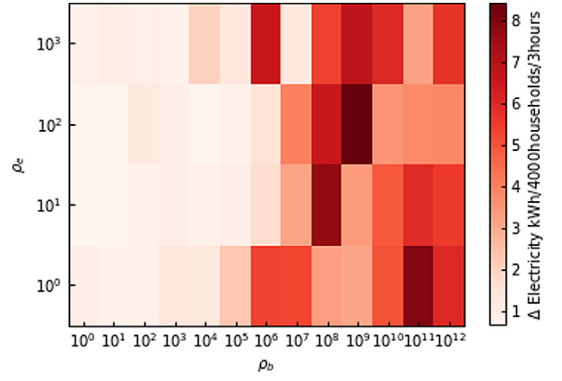


図 3 二つのラグランジュ乗数と式 (20) 違反量

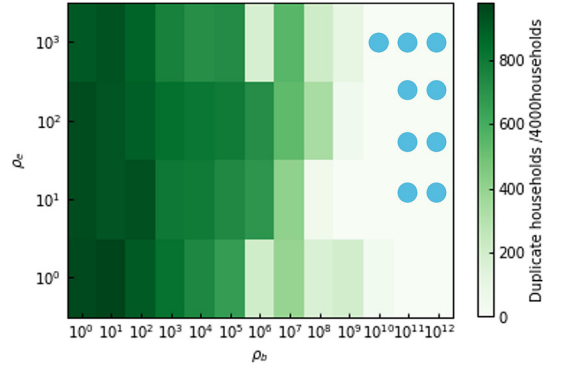


図 4 二つのラグランジュ乗数と式 (21) 違反量

帯であり、それぞれベースラインおよび $I=2$ の合計三つの運用方策を導出し、 $C=8$ クラスタの RA がそれぞれ 500 世帯ごとを集約する。各クラスタの電力アグリゲーション問題は、500 世帯 \times 2 候補 = 1,000 個の変数を有し、最大で 500 個の変数が 1 となりうる。本問題は Python 3.7 により実装し、QUBO ソルバは第 2 世代 DA、汎用 MIP ソルバは Gurobi 9.1 を用いて実験した。

式 (23) の QUBO 問題は非凸でありラグランジュ乗数は発見的に探索した。その結果を図 3・4 へそれぞれ式 (20)・(21) の制約違反量を示す。図 4 の丸印は式 (21) 違反が存在しないことを意味する。

図 5 は Algorithm 1 を実行するのに要した時間の内訳であり、全体で 15 分以内となるよう汎用 MIP ソルバの計算時間上限を調整した。汎用 MIP ソルバを用いて個々の HEMS の運用方策を導出するのに、全体の 89% の時間を要している一方、DA を用いて運用方策を集約する計算は 1.7% の時間で完了している。

図 6・7 はそれぞれ下げ・上げ DR 事例であり、左軸の黒色実線・破線はそれぞれ DR 発動が有・無ケースにおける 4,000 需要家を積算した電力プロファイル

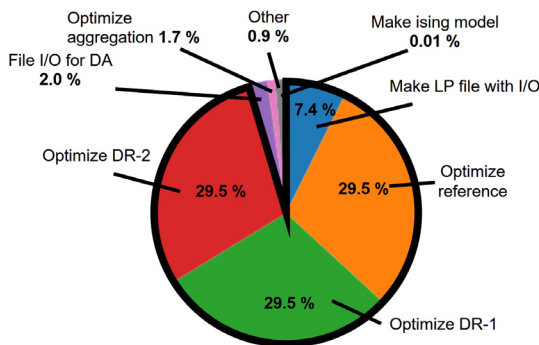


図5 計算時間内訳

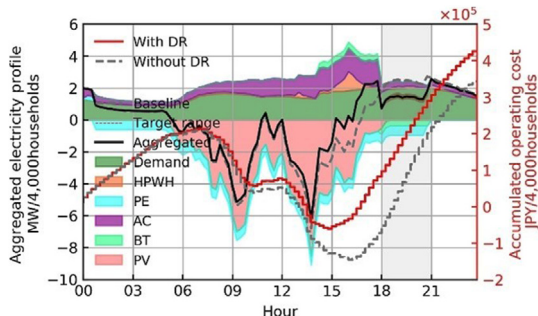


図6 下げDR ケースにおける電力プロファイル

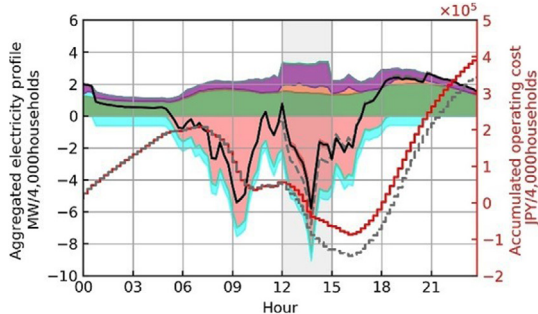


図7 上げDR ケースにおける電力プロファイル

を示す。いずれのケースでも DR 時間帯に破線で示したベースラインと比較して 1MW 増減させることができた。積み上げ棒グラフの各色は、機器稼働状況を示し、図6の下げDRにおいてはHP・BT・ACが事前に電力を消費しエネルギーを蓄えることで、DR時間帯に節電した。図の右軸は時間断面ごとの累積運用経費を示し、上げDRと比較して下げDRは追加的な費用が大きいことがわかる。以上のとおり、提案手法を用いて任意の電力プロファイルを市場要件を満たしつつ運転費用最小の観点で実現できることが確認された。

5. おわりに

本稿では、需要家側エネルギーリソースをデジタル通信に基づき運用制御する仮想発電所の電力アグリゲーション問題を対象に、既存のソフトウェアソルバでは実時間で求解が困難である規模の組合せ最適化問題を QUBO ソルバである第2世代富士通デジタルアニーラを用いて解くことができることを、主として経済性に焦点をあてて論じた。専用ハードウェアを用いた高速な最適化ソルバの活用は、本稿で紹介した VPP のみならず、2050年カーボンニュートラルに向け、地域でのエネルギー需給一致によりレジリエンスを強化するマイクログリッド、電力部門に加えて電化の進展が予期される熱・運輸部門を接続するセクターカップリング、複数のエネルギーキャリアによる貯蔵・輸送を実現するマルチベクトルなど、次世代のエネルギーシステムに関するさまざまな時間・空間分解能の意思決定問題への適用が期待される。

参考文献

- [1] 石井英雄, 広橋亘, “VPPを支える基盤システム,” 電気学会誌, **139**, pp. 144–147, 2019.
- [2] 大橋弘, 『競争政策の経済学—人口減少・デジタル化・産業政策—』, 日本経済新聞出版, 2021.
- [3] 後藤美香, “卸電力市場と容量確保メカニズム,” 電気学会誌, **135**, pp. 356–359, 2015.
- [4] 長山浩章, 『再生可能エネルギー主力電源化と電力システム改革の政治経済学—欧州電力システム改革からの教訓—』, 東洋経済新報社, 2020.
- [5] 社団法人日本能率協会審査登録センター, 寺田博, 『ISO50001「エネルギーマネジメントシステム」基本知識と導入法』, 日本能率協会マネジメントセンター, 2011.
- [6] 電子情報技術産業協会 制御・エネルギー管理専門委員会 WG1 (省エネルギー) エネルギーマネジメントシステム標準化専門委員会, “FEMS (Facility Energy Management System) による地球環境改善,” 電気計算, **89**, pp. 27–35, 2021.
- [7] 電気学会スマートグリッドに関する電気事業者需要家間サービス基盤技術調査専門委員会, 『国際標準に基づくエネルギーサービス構築の必須知識—電気事業者・需要家のための—』, オーム社, 2016.
- [8] 林泰弘, 『Society5.0の実現に向けたエネルギーマネジメントシステム』, IEICE Conferences Archives, 2020.
- [9] 一般財団法人日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット, 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2021年版)』, 理工図書, 2021.
- [10] A. Yoshida, J. Yoshikawa, Y. Fujimoto and Y. Amano, “An optimal predictive control of 0.75 kW PEM fuel cell cogeneration with home appliances for efficient PV utilization,” In *Proceedings of the ASME 2016 14th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, American Society of Mechanical Engineers*, FUELCELL2016-59285, 2016.
- [11] A. Yoshida, J. Yoshikawa, Y. Fujimoto, Y. Amano

- and Y. Hayashi, “Stochastic receding horizon control minimizing mean-variance with demand forecasting for home EMSs,” *Energy and Buildings*, **158**, pp. 1632–1639, 2018.
- [12] T. Saito, A. Yoshida, T. Kashikawa, K. Kimura and Y. Amano, “Combinatorial optimization-based hierarchical management of residential energy systems as virtual power plant,” In *Proceedings of the 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, pp. 1833–1839, 2020.
- [13] T. Saito, S. Katayama, A. Yoshida, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Amano and Y. Hayashi, “Fast hierarchical coordination using price signal for town-scale home-EMSs aggregation with digital annealer,” In *Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2020)*, pp. 1662–1673, 2020.
- [14] A. Yoshida, T. Saito, T. Kashikawa, K. Kimura and Y. Amano, “Hierarchical residential aggregation method incorporating energy demand forecast,” In *Proceedings of the 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2021)*, pp. 1511–1521, 2021.
- [15] 宮本俊幸, 北村聖一, 森一之, 泉井良夫, “交互方向乗数法を用いた分散最適化,” システム/制御/情報, **60**, pp. 219–224, 2016.
- [16] S.-J. Kim and G. B. Giannakis, “Scalable and robust demand response with mixed-integer constraints,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, **4**, pp. 2089–2099, 2013.
- [17] S. Matsubara, M. Takatsu, T. Miyazawa, T. Shibasaki, Y. Watanabe, K. Takemoto and H. Tamura, “Digital annealer for high-speed solving of combinatorial optimization problems and its applications,” In *Proceedings of the 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, pp. 667–672, 2020.