

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04320

研究課題名（和文）太陽光発電大規模導入に向けた系統調整力提供のための需要家機器運用技術の開発

研究課題名（英文）Optimal management of distributed energy resources for flexibility dispatch toward high penetration of PV

研究代表者

安芸 裕久（Aki, Hirohisa）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70356343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：エネルギー需要・日射予測の不確実性を考慮し、調整力提供発動までを考慮したエネルギーマネジメントシステムモデルを開発した。数値シミュレーションの結果、電力価格が適正に調整され、十分な調整力が需要家から調達できることが示された。設置機器別に見ると、調整力提供に一番大きく貢献するのは蓄電池であり、ついでヒートポンプ給湯機となることがわかった。ヒートポンプ給湯機は広く住宅に普及しており、今後低コスト系統調整力資源として活用が期待される。実機検証においても、シミュレーション時と同様にエネルギー需要の不確実性に対応し、温水需要を満たすことができ、開発された制御手法とシステムの有効性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギーの大規模普及を進めていく上で電力系統における調整力不足が障害となっている。本研究の成果を活用することで、一般住宅に広く普及している機器を活用し、系統対策コストの低減が可能となる。これにより、再生可能エネルギーの普及に要する社会的費用の低減が可能となり、一層の普及加速が期待できる。学術的には、需要側も電力系統運用に貢献できることが示され、電力工学においてパラダイムシフトを促すことができる。

研究成果の概要（英文）：An energy management system model was developed that takes into account the uncertainties in energy demand and solar insolation predictions, and the activation of the provision of grid flexibility. Numerical simulation results show that electricity prices (incentives) can be adjusted appropriately and that sufficient grid flexibility can be procured from prosumers. The heat pump water heater is widely used in residential dwellings as a hot water supply device, and is expected to be utilized as a low-cost grid flexibility resource in the future. In the verification of the actual system, as in the simulation, it was possible to meet the demand for hot water while coping with the uncertainty of energy demand, demonstrating the effectiveness of the developed control method and system.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：系統調整力 分散エネルギー源 再生可能エネルギー エネルギー機器 エネルギーマネジメントシステム

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

近年、太陽光発電 (PV) 普及に伴う電力系統運用への影響が顕在化しつつある (図 1)。昼には、PV 発電により電力が余剰となり (電力余剰)、夕方には PV 発電の減少によって見かけの電力需要が急激に増加する (需要ランプアップ)。そのため需給バランス維持が困難となり、2018 年 10 月に九州において、我が国初の PV 発電抑制が実施され、現在では頻発するようになって

いる。そこで、需給バランスの変化に柔軟に対応できるよう、調整力 (調整力) の強化が必要となり、大規模蓄電池の設置が検討されているが、コストが大きい。一方、需要側に着目し、需要家の機器を系統の状況に応じて運用すれば、新たな設備投資なく低コストで調整力を提供できる。住宅では、燃料電池コージェネレーション (FC-CHP) や CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯機 (CO<sub>2</sub>HP) を活用し、電力余剰と需要ランプアップに対し、運転 / 停止や発電量を制御することにより電力売買 (電力購入 / 逆潮流) を変化させ、調整力を提供できる。基礎的検討が進められており、実用化に向けた運用技術の開発や実機での検証が必要という段階だった。

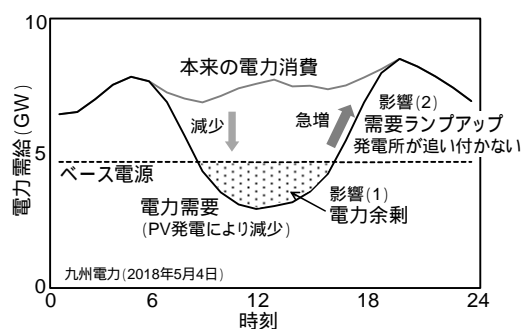


図 1 PV 普及による電力系統への影響

### 2. 研究の目的

需要家機器を活用した系統調整力提供のための運用技術について、需要家の需要や系統の状況など全ての情報が既知という前提の運用技術について研究が進められてきたが、実際には、情報は事前にはわからない。本研究では、実用化に向けて、不確実性を考慮した需要家機器運用の手法として、前日に予測に基づいて翌日の運用計画を立案し、その後、運用計画を参考にアルゴリズムに従ってリアルタイム運用を行う、モデル予測制御を適用した機器制御手法の開発と、それを実装したエネルギーマネジメントシステム (EMS) のモデル開発とを目的とした。温水機器について実機を用いて、開発した運用手法における実用上の問題がないのかについての検証も行った。

### 3. 研究の方法

本研究では、電子計算機シミュレーションによる需要や系統状況等の不確実性を考慮した運用技術の開発と、実機を用いた運用技術の検証とを行った。運用アルゴリズムを実装したモデルを構築し、予測データによる最適計画立案と実績データによるリアルタイム運用のシミュレーションを 1 年間分を行った。その結果を、提供調整力の量や需要家のインセンティブ収入などの評価指標で定量的に評価した。評価指標が改善されるように運用アルゴリズムを見直すことで、優れた運用技術 (アルゴリズム) を開発する。次に実機を用いた実験設備を構築して検証を行い、運用技術のブラッシュアップを図った。

シミュレーションの流れを図 2 に示す。アグリゲータが需要家に対して電力料金を提示し、需要家は与えられた電力料金と予測エネルギー需要とから最適運用計画を立案する。その結果から、アグリゲータは調達できる系統調整力を算出する。調達調整力が不足する場合は、電力料金を変化させて需要家へ提示する。そのサイクルを、必要調整力が調達できるか、電力料金が上限または下限に達するまで繰り返す。これにより、必要調整力の調達、電力料金 (インセンティブ) の設計および最適機器運用計画の立案を行う。

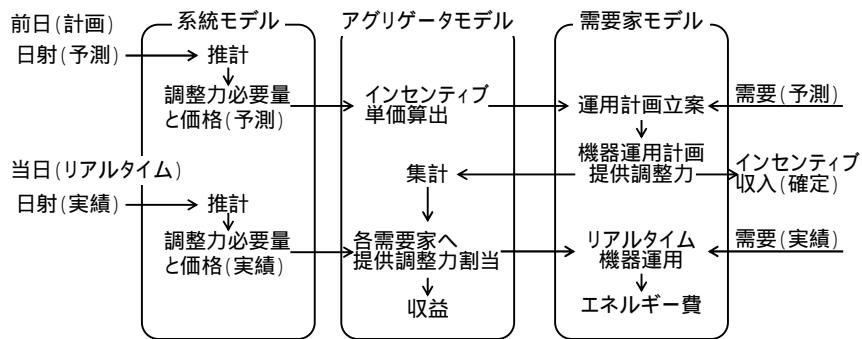
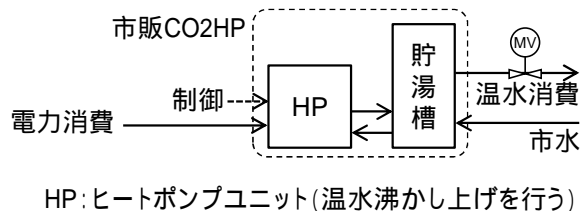


図2 シミュレーションの流れ

シミュレーションにおいては、住宅の機器として、PV、FC-CHP、蓄電池およびCO2HPを想定した。電力需要と温水需要が異なる20戸の住宅を5グループに分け、各々異なる機器が設置されているものとした。最適運用計画立案にあたっては、各機器の特性を反映した数理計画モデルを構築して行なった。実機検証については図3に示す装置を構築して行なった。



HP: ヒートポンプユニット(温水沸かし上げを行う)



図3 ヒートポンプ給湯機実機検証装置

#### 4. 研究成果

エネルギー需要・日射予測の不確実性を考慮し、調整力提供発動までを考慮したEMSを開発した。数値シミュレーションの結果、電力価格が適正に調整され、十分な調整力が需要家から調達できることが示された。

シミュレーション結果の例として、ある1日のCO2HPの運用を図4に示す。図中の赤/青の部分が上げ/下げ調整力が必要なその時間帯である。調整力必要量に応じて電力価格が調整され、通常深夜に運転されるCO2HPが昼間に運転されている。その結果、昼に上げ調整力が、夕方から夜間に調整力が提供された。

各月の調整力必要量、調整力提供予定量および調整力提供量の結果を図5に示す。電力需要に比してPV発電量が大きくなる春は上げ調整力必要量が大きく、電力需要が大きくなる夏と冬は調整力必要量が小さくなる。必要量が大きい春を除いて、必要とされる調整力をほぼ提供することができている。なお、ここでは省略するが、設置機器別に見ると、調整力提供に一番大きく貢献するのは蓄電池であり、ついでCO2HPとなることがわかった。CO2HPは温水機器として広く住宅に普及しており、今後低コスト系統調整力資源として活用が期待される。

実機検証においても、シミュレーション時と同様にエネルギー需要の不確実性に対応し、温水需要を満たすことができ、開発されたEMSの有効性が示された。

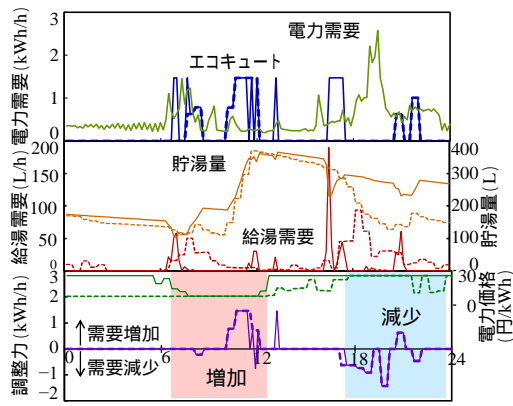


図4 CO2HP の運用

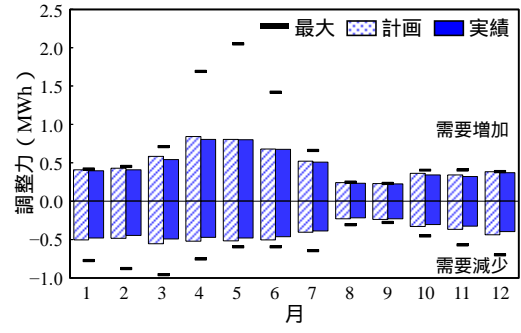


図5 月別調整力提供量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kumamoto Takayuki, Aki Hirohisa, Ishida Masayoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 Provision of grid flexibility by distributed energy resources in residential dwellings using time-of-use pricing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sustainable Energy, Grids and Networks	6. 最初と最後の頁 100385 ~ 100385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.segan.2020.100385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Kento, Aki Hirohisa, Ikegami Takashi	4. 巻 239
2. 論文標題 Application of model predictive control to grid flexibility provision by distributed energy resources in residential dwellings under uncertainty	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 122183 ~ 122183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2021.122183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kento Sasaki, Takayuki Kumamoto, Hirohisa Aki, Takashi Ikegami
2. 発表標題 An interaction model of an aggregator and consumers for providing grid flexibility using distributed energy resources
3. 学会等名 The 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muhammad Zakwan Bin Mohd Zahid, Hirohisa Aki
2. 発表標題 Development of Demand Response Model for Providing Grid Flexibility Under the Influence of Consumers Participation Rate
3. 学会等名 10th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Asia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 健人, 安芸 裕久, 池上 貴志
2. 発表標題 需要家分散型エネルギーを用いた系統調整力提供のためのモデル開発と実機検証
3. 学会等名 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村春毅, 根岸信太郎, 池上貴志
2. 発表標題 予測の不確実性を考慮したヒートポンプ給湯機のロバストな運用手法の開発
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020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
研究 分担 者	池上 貴志  (Ikegami Takashi)  (70534460)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授   (12605)	

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
---------	---------