

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420411

研究課題名(和文)分散型大規模システムの最適運用と社会基盤システムへの展開

研究課題名(英文) Decentralized Decision Making and Optimal Operation of Energy Supply/Demand Networks

研究代表者

平田 研二 (Hirata, Kenji)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40314364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の分散型エネルギー需要・供給ネットワークにおける供給家、需要家を自身の利得確保を追求するエージェントと捉える。また、社会としての公共の利得確保を目指す独立した行政機関に対応するユーティリティーを想定する。本研究では、ユーティリティーによる価格(税金/補助金)の提示とエージェントの分散意思決定の相互作用により、エネルギー需要・供給ネットワークの最適な運転状態への誘導を可能とする。また提案する運用方策を太陽光発電システムにおける電圧変動抑制問題、配電システムにおける電圧変動の抑制問題、電気自動車の分散型充電管理といった実際の課題への適用し、有効性を検証する。

研究成果の概要(英文)：This research investigates a decentralized optimal operation of large-scale energy supply/demand networks. Each agent is allowed to determine its desired set-point according to the individual profit. However, the steady-state constraints are unlikely to be satisfied due to individual decision makings of the agents. In order to align the individual decision makings with the socially optimal solution that fulfills the steady-state constraints, an independent entity called utility is allowed to provide an additional price, which conceptually represents tax or subsidy to individuals from the community, and affect decisions of the agents. We proposed a real-time pricing strategy of the utility. The proposed decentralized optimal operating strategy has been applied to the voltage regulation problem for large scale photo-voltaic generation plant, the voltage deviation suppression problem of distribution networks and the decentralized storage management problem for electric vehicles.

研究分野：制御工学

キーワード：分散システム 最適運用 価格提示 エネルギー需要供給ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

2011年に閣議決定された第4次科学技術基本計画では、グリーンイノベーションの推進が、科学技術政策として推進すべき課題とされた。太陽光発電や風力発電といった自然エネルギー源、また小型の発電機や蓄電池などが大量に導入、活用された次世代の分散型エネルギー需要・供給ネットワークの実現は、日本のみならず世界からもその推進が求められている。

2. 研究の目的

次世代の分散型エネルギー需要・供給ネットワークにおける供給家、需要家を自身の利得確保を追求するエージェントと捉える。また、社会としての公共の利得確保を目指す独立した行政機関に対応するユーティリティーを想定する。本研究では、ユーティリティーによる価格(税金/補助金)の提示とエージェントの分散意思決定の相互作用により、エネルギー需要・供給ネットワークの最適な運転状態への誘導を可能とする。

次世代のエネルギー需要・供給ネットワークで大量に導入される小型発電機や蓄電池などの速い動特性を鑑み、とくに、標準的なデマンドレスポンスやリアルタイムプライシングと言った枠組みでは注目されない、エージェントの動特性を考慮した運転状態の誘導を可能とする。

3. 研究の方法

太陽光発電や風力発電といった自然エネルギー源、また小型の発電機や蓄電池が大量に導入された次世代の分散型エネルギー需要・供給ネットワークを、中央集中型の情報処理機構により運用することは、対象が大規模、分散型であるが故に困難である。分散型のエネルギー需要・供給ネットワークは、自身の利得を追求する供給家、需要家(エージェント)とこれらを組織化し、社会としての公共の利得確保を目指す独立した行政機関(ユーティリティー)から構成されると捉えられる。安全なエネルギー需要・供給ネットワークの実現には、個々のエージェントが利己的に自身の振る舞いを決定する中で、これらの分散意思決定を束ね、公共の利得確保を保證するユーティリティーのとるべき方策を提供することが、重要な課題となる。

本研究では、各エージェントにその目標運転状態決定の権利を与える分散化のもとで、その分散意思決定を束ね、公共の利得の実現へと導く、ユーティリティーによる統合化を検討する。このために、公共の利得確保を目指す独立した

行政機関であるユーティリティーには、税金あるいは補助金に対応する付加的な価格を各エージェントに提示する権利が与えられると考える。このエージェントの分散意思決定とユーティリティーによる価格提示の相互作用により、エネルギー需要・供給ネットワークを公共の利得を達成する最適な運用状態へと誘導することを可能とする。

本研究では、ユーティリティーによる具体的な価格提示方策を提案すると共に、太陽光発電システムにおける電圧変動抑制問題、太陽光発電システムの出力抑制問題への対応、配電系統における電圧変動の抑制問題、電気自動車の分散型充電管理といった実際的な課題への適用をおこない、その有効性検証までを実施する。

4. 研究成果

1. ユーティリティーによる具体的な実時間価格提示方策を提案した。またこの実時間価格提示方策、エージェントによる分散意思決定およびエージェントの動特性により構成される閉ループシステムが、局所的に安定であることを明らかにした。これにより、最適な運用状態への誘導が理論的にも保証されたうえで実現可能となる。
2. 大規模な太陽光発電システムでは、系統への有効電力の注入により、系統連係点での電圧変動が生じる。本研究では、太陽光発電システムを構成する複数のパワーコンディショニングシステム(PCS)をエージェントと捉え、各PCSによる分散運転目標値決定とユーティリティーによる価格提示により、電圧変動の抑制が可能であることを明らかにした。具体的には、PCSによる無効電力注入目標値の決定により電圧変動の抑制が可能であることを示した。無効電力注入目標値に加え、有効電力目標値も分散的に決定することが可能であり、これにより快晴時など、無効電力の注入のみでは対応が困難な状況でも電圧変動の抑制が可能であることを示した。提案するPCSの分散運用方策を実機実装し、電圧変動の抑制が可能であること実験によっても検証した。
3. 太陽光発電設備の認定量が各電力会社による接続可能量試算値を超過し、電力系統の安定運用担保が困難になったという技術的な理由から、太陽光システムに対する出力抑制指令の発令を可能とする法令整備が進

められている。提案するユーティリティーによる実時間価格提示方策と太陽光発電システムを構成する PCS による分散目標値決定により、出力抑制指令値への追従が可能であることを明らかにした。

4. 家庭における太陽光発電システム、蓄電池の導入により、従来の配電系統では単調減少であった配電系電圧が複雑な振る舞いを示すようになってきている。本研究では、各家庭をエージェントと捉え、各家庭における有効電力、無効電力の注入目標値分散決定とコミュニティの運営者に対応するユーティリティーによる価格提示方策により、配電系統の電圧変動を抑制し、適切な基準電圧への誘導が可能であることを明らかにした。
5. 車載型蓄電池は、分散型エネルギー需要・供給ネットワークのより柔軟な運用を実現する構成要素として、期待されている。一方、コミュニティに連結された車載型蓄電池群は、多数の異種エージェントからなるネットワークであり、中央集中型の情報処理機構による充電・放電の管理は現実的ではない。また、車両による外出と帰宅を予測し、精度の高い電力需要予測を実現することは、容易な問題ではない。本研究では、実時間価格提示を利用した分散型の充電管理方策を提案した。これにより、コミュニティ内の電力需要と需要予測にもとづき供給される電力との間の需要・供給バランスを達成する蓄電池の運用が可能であること明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 石井, 平田, 大堀, 服部, 太田, 実時間価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 2, 144/151, 2017, 査読有.
2. 西澤, 阿久津, 平田, 太田, 実時間価格提示方策を利用した配電系統電圧の分散制御による経済効用に関する考察, システム制御情報学会論文誌, Vol. 30, No. 1, 30/32, 2017, 査読有.
3. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 実時間価格提示を利用した太陽光発電用インバータ

群の分散制御, システム制御情報学会論文誌, Vol. 29, No. 4, 182/191, 2016, 査読有.

4. 平田, 上地, 電力需要・供給バランスを実現する車載型蓄電池の分散型充電管理方策に関する考察, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 11, 427/434, 2015, 査読有.

[学会発表] (計 30 件)

1. H. Akutsu, K. Hirata, A. Ohori, N. Hattori and Y. Ohta, Decentralized Control of Inverter Networks for PV Generation Plants using Real-time Pricing Strategy, *The 7th IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies*, 2016ISGT0242, Minneapolis, USA, 09/06-09, 2016
2. K. Hirata, Real-Time Pricing Leading to Optimal Operation and Applications to Energy Management Systems, Invited talk, *The 5th International Conference on Continuous Optimization*, Tokyo, Japan, 08/08-11, 2016.
3. T. Ishii, K. Hirata, A. Ohori, N. Hattori and Y. Ohta, Distributed Active and Reactive-power Flow Management for Grid Voltage Maintenance using Real-time Pricing Strategy, *The 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 1322/1327, Osaka, Japan, 12/15-18, 2015.
4. K. Hirata, Real-time Pricing Leading to Optimal Operation and its Application Case Studies, Invited talk, *Workshop on Energy Supply-demand Networks with Renewables based on Integration of Economic Models and Physical Models*, Kanagawa, Japan, 11/19-20, 2015.
5. K. Hirata, J. P. Hespanha and K. Uchida, Real-time Pricing and Distributed Decision Makings Leading to Optimal Power Flow of Power Grids, *2015 American Control Conference*, 2284/2291, Chicago, USA, 07/01-03, 2015.
6. K. Hirata, J. P. Hespanha and K. Uchida, Real-time Pricing Leading to Optimal Operation under Distributed Decision

- Makings, 2014 American Control Conference, 1925/1932, Portland, USA, 06/04-06, 2014.
7. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 出力抑制指令への対応を可能とする複数発電拠点の分散制御に関する考察, 第 4 回 制御部門マルチシンポジウム, 2C1-1, 岡山, 03/06-09, 2017.
 8. 笠輪, 阿久津, 平田, 価格提示を利用した蓄電拠点の分散制御におけるwindアップに関する考察, 第 4 回 制御部門マルチシンポジウム, 3B1-4, 岡山, 03/06-09, 2017.
 9. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 出力抑制指令への対応を目的とした太陽光発電インバータ群の分散制御と実機検証, 第 59 回 自動制御連合講演会, 150/153, 福岡, 11/10-12, 2016.
 10. 平田, 価格提示を利用した最適運用状態への誘導とエネルギーマネジメント問題への応用について, 招待講演, 計測自動制御学会 北陸支部講演会, 石川, 08/29, 2016.
 11. 上地, 平田, 小野, 石井, 小野田, 実時間価格提示を利用した分散型充電管理方策と制御通信ネットワークの連成シミュレーションによる考察, 第 60 回 システム制御情報学会研究発表講演会, 146-6, 京都, 05/25/27, 2016.
 12. 阿久津, 笠輪, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した太陽光発電用インバータ群における有効・無効電力分散制御の実機検証, 第 60 回 システム制御情報学会研究発表講演会, 114-1, 京都, 05/25/27, 2016.
 13. 西澤, 阿久津, 平田, 太田, 価格提示方策を利用した配電系統電圧の分散制御による経済効用に関する考察, 第 60 回 システム制御情報学会研究発表講演会, 114-2, 京都, 05/25/27, 2016.
 14. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池併設型太陽光発電用インバータ群の分散制御, 第 3 回 制御部門マルチシンポジウム, 3B2-2, 名古屋, 03/07-10, 2016.
 15. 上地, 平田, 小野, 石井, 小野田, 実時間価格提示を利用した分散型充電管理方策と制御通信ネットワークの連成シミュレーション環境について, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015, 949/953, 函館, 11/18-20, 2015.
 16. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した太陽光発電用インバータ群の有効・無効電力出力分散制御, 第 58 回 自動制御連合講演会, 2A1-5, 兵庫, 11/14-15, 2015.
 17. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した太陽光発電用インバータ群の分散制御実験, 第 59 回 システム制御情報学会研究発表講演会, 146-2, 大阪, 05/20-22, 2015.
 18. 上地, 平田, 車載型蓄電池を有するコミュニティの分散型充電管理方策に関する検討, 第 59 回 システム制御情報学会研究発表講演会, 156-4, 大阪, 05/20-22, 2015.
 19. 平田, 上地, 実時間価格提示による分散型充放電管理方策に関する考察, 第 2 回 制御部門マルチシンポジウム, 531-5, 東京, 03/04-06, 2015.
 20. 石井, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御, 第 2 回 制御部門マルチシンポジウム, 633-5, 東京, 03/04-06, 2015.
 21. 森澤, 平田, 小泉, 確率的起動・停止制御方策による斜面災害監視用センサーネットワークの運用 - 通信経路の構築方策と検証実験 -, 第 2 回 制御部門マルチシンポジウム, 532-5, 東京, 03/04-06, 2015.
 22. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を用いた系統連系インバータ群による連系点電圧制御の実機検証, 平成 27 年度 電気学会全国大会, 6-230, 東京, 03/24-26, 2015.
 23. 平田, 内田, 価格提示と分散最適化による最適潮流状態への誘導, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, Vol. 114, No. 288, NLP2014-96, 新潟, 11/06-07, 2014.
 24. 平田, 上地, 価格提示による分散型充放電管理方策の実現に関する考察, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 507/512, 岡山, 11/21-23, 2014.

25. 石井, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した電圧上昇抑制分散制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 485/490, 岡山, 11/21-23, 2014.
26. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示による太陽光発電用大規模インバータ群の分散型電圧抑制, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 491/494, 岡山, 11/21-23, 2014.
27. 森澤, 平田, 小泉, 斜面災害監視用センサーネットワークの通信経路構築と検証実験, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 495/500, 岡山, 11/21-23, 2014.
28. 石井, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御に関する考察, 第 57 回 自動制御連合講演会, 1861/1865, 群馬, 11/10-12, 2014.
29. 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示による大規模太陽光発電インバータ群の負荷分散制御, 第 57 回 自動制御連合講演会, 1866/1869, 群馬, 11/10-12, 2014.
30. 森澤, 平田, 小泉, 斜面災害監視用センサーネットワークの起動・停止制御方策と通信経路構築
第 57 回 自動制御連合講演会, 1008/1014, 群馬, 11/10-12, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 研二 (HIRATA, Kenji)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 40314364