

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06490

研究課題名(和文) 多拠点大規模分散システムに対する最適運用と誘引設計問題

研究課題名(英文) Decentralized Optimal Operation of Large-scale Systems using Pricing Signal

研究代表者

平田 研二 (Hirata, Kenji)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：40314364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000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需要家、供給家を自身の利得確保を目指す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運用機関であ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仮想的な価格信号の提示と各エージェントの分散意思決定による分散型の運用方策を提案する。またこれにより、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点といった分散する多数の拠点の統合を可能とする仮想発電所の運用を実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電や風力発電といった自然エネルギー源、また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る研究課題である。本研究で提案する仮想的な価格信号の提示と分散最適化を活用した分散型の運用方策は、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点の相互作用最適化までを実現し、発電から消費までの一体的な管理運用を可能とする。

研究成果の概要(英文)：This research investigated decentralized optimal operations of large-scale energy supply and demand networks. Each agent is allowed to determine its desired set-point according to the individual profit. In order to align the individual decision making with the optimal solution that maximizes the social welfare of the network, an individual entity called utility is allowed to provide an additional price signal. Interactions between the utility and multiple agents lead the entire network to the optimal operating conditions. We also investigated decentralized operations of the multiple networks. This hierarchical decentralized strategy realized the integrated operation from energy generation to consumption.

研究分野：制御工学

キーワード：分散制御 価格提示 エネルギーマネジメント

1. 研究開始当初の背景

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、また第5次 科学技術基本計画では、「エネルギーの安定的確保とエネルギー利用の効率化」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る研究課題である。しかしながら例えば現在、大規模太陽光発電システムの設備認定量が、各電力会社の接続可能量試算値を超過したことを背景に、発電出力量に対する抑制司令の発動を可能とするための法整備が進められ、実際一部の電力会社による抑制司令が開始されている。単純な出力抑制は、発電可能なエネルギーの廃棄を意味する。蓄電池との相互運用はもちろん、需要拠点のエネルギー運用との相互運用による需要量の調整までも視野に入れた、新たな需要・供給ネットワークの実現が、エネルギーの安定的確保とエネルギー利用の効率化には不可欠である。

2. 研究の目的

太陽光発電システムなどに代表される発電拠点、蓄電池群から構成される蓄電拠点、多数の需要者からなる需要拠点は、それぞれ1拠点に着目しただけでも、多数の構成要素からなる大規模システムである。これら大規模システムを中央集中型の情報処理により運用することは、現実的ではない。さらに出力抑制司令への対応に例示される問題への対応には、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点といった多数の拠点到分散する複数の大規模システムの最適運用が必要となる。本研究では、各拠点の最適な運転状態への誘導を可能とする分散型の運用方を提案する。さらに各拠点間の相互作用を最適化する分散型の運用方を提案する。これにより、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点の統合的な運用を可能とする分散階層型の運用方を提案する。

3. 研究の方法

発電拠点、蓄電拠点、需要拠点到存在する個々のエネルギー機器を自身の利得確保を目指すエージェントと捉える。また拠点全体の最適運用を目指す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仮想的な価格信号の提示と各エージェントの分散意思決定による分散型の運用方を提案する。さらに、発電拠点における蓄電池との相互運用、蓄電拠点における価格信号のワインドアップ現象、需要拠点におけるチャタリング現象の発生といった、各拠点の特徴から生じる固有の問題についても、その回避方を明らかにする。これら各拠点の運用方を活用、統合的に運用することにより、発電から消費までの一体的な管理運用を実現する仮想発電所 (VPP: Virtual Power Plant) の運用方を提案する。

4. 研究成果

(1) 太陽光発電拠点到代表される分散型電源は、多数の発電機器により構成される大規模システムとなる。とくに発電機器の追加による拠点的拡充、あるいは突然の不具合による一部の発電機器の離脱などに柔軟に対応できる拠点的全体の運用方は、発電拠点的の運用にとつて大きな利点となる。本研究では、個々の発電機器をエージェントとみなし、また拠点全体の管理者を想定した上で、管理者による仮想的な価格信号の提示とこの価格信号を取り入れたエージェントによる分散意思決定から構成される、分散型の運用方を提案している。仮想的な価格信号の提示方は、拠点を構成する個々の発電機器の特性や台数に依存しない、また個々のエージェントによる分散意思決定は、簡易な最適化問題として定式化され、発電機器上への実装も容易である。したがつて提案する分散型の運用方は、機器の追加や離脱がある場合でも、運用方の修正なしに対応できる利点を有する。提案する分散型の運用方を太陽光発電拠点到から系統への逆潮流に起因する電圧変動の抑制制御、あるいは蓄電設備の併設された発電拠点到における出力抑制司令対応問題などに適用し、その有効性を検証することもできている。

(2) 個々の蓄電池群が充電量、放電量を決定する蓄電拠点的の運用では、本研究で提案する仮想的な価格信号にその値が極端に大きな値をとるワインドアップ現象を生じる。これは、個々の蓄電池の満充電、全放電といった運転状態に起因して生じるものである。またワインドアップ現象は、放電動作から充電動作への動作切り換え時に極端な応答の遅れを生じるなど、制御性能の悪化を引き起こす。本研究では、個々の蓄電池の満充電、全放電といった運転状態に起因するワインドアップ現象とこれが引き起こす制御性能の劣化を抑制する2つのアンチワインドアップ方を提案することができている。提案するアンチワインドアップ方の一つは、蓄電池への充電、放電を実行するPCS (Power Conditioning System) の動特性とPCSの目標電流制御に利用するコントローラの特徴を利用したものであり、容易に実装できる利点を有する。一方、もう一つのアンチワインドアップ方は、プライスガバナと呼ぶワインドアップ現象に起因する制御性能の劣化抑制を目的とした付加的な機構を構成し、仮想的な価格信号の修正をおこなうものである。これにより、より複雑な目標電流制御コントローラを採用する場合でも、ワインドアップ現象の回避が可能となっている。これにより、満充電、全放電といった、蓄電機器固有の不可避な特性がある場合でも、制御性能の劣化を抑制した分散型の運用方を実現することができている。

(3) ビル全体のエネルギー管理といった需要拠点の運用問題では、オン・オフや高・中・低などに対応した、離散値出力（消費）のみが可能な機器の混在がその特徴として挙げられる。またこれにより、与えられた目標総需要量に対する追従が不可能であり、実需要量の応答に振動を生じるチャタリング現象が発生する場合がある。本研究では、チャタリング現象発生条件を明らかにすることができている。したがってチャタリング現象を回避するもっとも簡易な運用方策は、本研究により明らかにされた条件を利用し、目標総需要量をチャタリング現象を生じない値に限定することとなる。しかしながら、目標総需要量の限定、変更が望まれない応用もある。そこで、連続値出力機器の評価関数修正あるいは離散値出力機器の動作モード切り換えによる、実装の簡易な 2 つのチャタリング回避方策を提案した。これにより、連続値出力機器、離散値出力機器の混在する需要拠点においても、個々の機器の追加や離脱といった状況にも柔軟に対応可能な、分散型の運用方策を実現することができている。

(4) 本研究により提案した分散型の発電拠点、蓄電拠点、需要拠点の運用方策を統合的に運用することにより、発電から消費までの一体的な管理運用を実現する仮想発電所（VPP: Virtual Power Plant）の運用方策を提案している。提案する運用方策では、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点が個々のエージェントとみなされ、これらを統合する上位の分散型の運用方策が構築される。ここで個々の拠点は、これまでに提案した分散型の方策により引き続き運用される。したがって VPP 運用方策全体では、分散かつ階層型の構造をもつ特徴がある。またこの分散階層構造により、拠点の追加や離脱にも柔軟に対応可能な方策となっており、多拠点、大規模なシステムへの適用を可能としている。提案する分散階層型の運用方策の有効性は、発電拠点、蓄電拠点、需要拠点を構成する各機器の総数が 58 台の数値実験により検証されており、構成機器数の増加に伴う計算負荷の増加など無しに実装が可能であることが確認できている。

(5) 本研究の特徴である仮想的な価格信号の提示は、実際の需要者に対してはその行動を左右する誘因として働く。これに対する行動決定、応答には、需要者個人の特性が反映される。そこで需要者の特性を加味した数値シミュレーション環境の構築を目指し、入札、約定を繰り返す学習型の市場のシミュレータの構築を実施した。これにより、複数の供給者、需要者が入札、約定を繰り返す市場において、市場参加者全体の社会厚生推移などを確認することが可能となっている。さらに、約定量の増加を重視する供給者、需要者あるいは取引価格の低下、上昇を重視する供給者、需要者の特性を取り入れた市場取引の模擬を実施することもできている。これにより、これら市場参加者の個別の特性が市場参加者全体の社会厚生に与える影響を報告することもできている。

(6) 広範囲に分散し意思決定をおこなう需要者群を束ね、地域でのエネルギー需要供給バランスの実現などを達成するための方策として、アグリゲータの導入が注目されている。本研究では、複数のアグリゲータが導入された地域において、各需要者はどのアグリゲータを自身へのエネルギー供給源として選択すべきか、という観点から、経済学におけるベルトラン競争の概念に着目し、需要者、アグリゲータ、エネルギー供給拠点からなる三階層エネルギー需要供給ネットワークにおけるベルトラン競争モデルを提案している。提案するベルトラン競争モデルを利用した解析により、2 つのアグリゲータを有する地域において、ベルトラン競争の過程を経て需要者に提示される供給価格、またこの供給価格が採用された場合の地域全体として社会厚生算出などが可能となっている。本研究課題は、地理的に分散した需要者への供給といったエネルギー需要供給問題に固有の特性を考慮することで、さらなる展開が可能と捉えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasuaki WASA, Kenji HIRATA and Kenko UCHIDA	4. 巻 2
2. 論文標題 Optimal Agency Contract for Incentive and Control under Moral Hazard in Dynamic Electric Power Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IET Smart Grid	6. 最初と最後の頁 594/601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 和佐 泰明, 平田 研二, 内田 健康	4. 巻 55
2. 論文標題 ゲーム理論的トランザクティブ制御に基づく二階層電力調整力市場設計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 401/410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Yusuke OKAJIMA, Kenji HIRATA and Vijay GUPTA	4. 巻 1
2. 論文標題 Economic Impact and Market Power of Strategic Aggregators in Energy Demand Network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Book chapter in Economically-enabled Energy Management -Interplay between control engineering and economics	6. 最初と最後の頁 153/180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する

1. 著者名 Kenji HIRATA	4. 巻 1
2. 論文標題 Real-time Pricing and Decentralized Optimization Strategy for Power Flow Balancing in EV/PHEV Storage Management	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Book chapter in Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems -Integration of EMS, EV, and ICT-	6. 最初と最後の頁 87/106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 笠輪 寛明, 阿久津 慧, 平田 研二	4. 巻 54
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 167/174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 阿久津 慧, 平田 研二, 大堀 彰大, 服部 将之, 太田 快人	4. 巻 30
2. 論文標題 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システムにおけるインバータ群の分散制御	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 439/448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kenji HIRATA, Hikaru AKUTSU, Akihiro OHORI, Nobuyuki HATTORI and Yoshito OHTA	4. 巻 64
2. 論文標題 Decentralized Voltage Regulation for PV Generation Plants using Real-time Pricing Strategy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 5222/5232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2017.2650868	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28件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 阿久津 慧, 平田 研二, 大堀 彰大, 服部 将之, 太田 快人
2. 発表標題 実時間価格提示方策を利用した仮想発電所の分散型運用に関する考察
3. 学会等名 第 7 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前野 昇陽, 平田 研二
2. 発表標題 電力需要拠点の分散制御におけるチャタリング現象に関する考察
3. 学会等名 第 7 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木志昇, 村尾俊幸, 平田研二
2. 発表標題 LQG 電力需給ネットワークに対する予算均衡メカニズムによる統合
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru AKUTSU, Kenji HIRATA, Akihiro OHORI, Nobuyuki HATTORI and Yoshito OHTA
2. 発表標題 Decentralized Power Curtailment Control using Real-time Pricing Strategy for PV Generation Plants with Storage and its Experimental Verification
3. 学会等名 The 2nd IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Okajima, Kenji Hirata, Vijay Gupta and Kenko Uchida
2. 発表標題 Strategic Battery Storage Management of Aggregators in Energy Demand Networks
3. 学会等名 The 2nd IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Hirata
2. 発表標題 An Iterative Bidding Process of Multiple Consumers/Suppliers in Energy Trading Markets and Social Welfare Maximization
3. 学会等名 The 4th Workshop on Management and Control of Energy Supply-demand Networks with Renewables (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Hirata
2. 発表標題 On Double Auction Type Bidding Process of Multiple Energy Consumers/Suppliers and Social Welfare Maximization
3. 学会等名 The 3rd Workshop on Management and Control of Energy Supply-demand Networks with Renewables (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西澤 幸蔵, 平田 研二
2. 発表標題 アグリゲータを含む三階層電力需要ネットワークにおけるベルトラン競争モデルと均衡点の解析
3. 学会等名 第 6 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東上里 望夢, 平田 研二, 和佐 泰明, 澤田 英司
2. 発表標題 ダブルオークション型電力市場取引における市場参加者の入札戦略集合と社会余剰の最大化に関する考察
3. 学会等名 第 6 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤 雄大, 平田 研二
2. 発表標題 実時間価格提示方策を利用した離散値出力型機器を含む電力需要群の分散型運用方策
3. 学会等名 第 6 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西澤 幸蔵, 平田 研二
2. 発表標題 アグリゲータを含む電力需要ネットワークにおけるベルトラン競争モデルと均衡点に関する考察
3. 学会等名 第 61 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東上里 望夢, 平田 研二, 澤田 英司, 和佐 泰明
2. 発表標題 ダブルオークション型電力市場取引における入札戦略学習と社会余剰の最大化に関する考察
3. 学会等名 第 61 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤澤 雄大, 平田 研二
2. 発表標題 価格提示方策を利用した電力機器群の分散型需要制御とチャタリングの発生に関する考察
3. 学会等名 第 61 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西澤 幸蔵, 平田 研二
2. 発表標題 エネルギー需要ネットワークにおける戦略的なアグリゲータと社会余剰に関する考察
3. 学会等名 第 62 回 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru AKUTSU, Kenji HIRATA, Akihiro OHORI, Nobuyuki HATTORI and Yoshito OHTA
2. 発表標題 Decentralized Control Approach to Power Curtailment Instruction Problem for PV Generation Plants with Storage
3. 学会等名 The 2017 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Okajima, Kenji Hirata, Toshiyuki Murao, Takeshi Hatanaka, Vijay Gupta and Kenko Uchida
2. 発表標題 Strategic Behavior and Market Power of Aggregators in Energy Demand Networks
3. 学会等名 The 56th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hikaru AKUTSU, Kenji HIRATA, Akihiro OHORI, Nobuyuki HATTORI and Yoshito OHTA
2. 発表標題 Decentralized Active and Reactive Power Control for PV Generation Plants using Real-time Pricing Strategy
3. 学会等名 2017 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Hirata
2. 発表標題 Strategic Behavior and Market Power of Aggregators in Energy Demand Networks
3. 学会等名 The 2nd Workshop on Management and Control of Energy Supply-demand Networks with Renewables (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平田研二
2. 発表標題 エネルギー需要・供給ネットワークの分散型運用方策と制度設計について
3. 学会等名 電力システムグループセミナー, 大阪府立大学 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笠輪 寛明, 平田 研二
2. 発表標題 価格提示を利用した蓄電拠点の分散制御におけるwind-up現象と Price Governor によるアプローチ
3. 学会等名 第 5 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大屋 秀顕, 平田 研二, 和佐 泰明, 澤田 英司
2. 発表標題 電力市場取引における利得関数の経済学的定義と入札戦略学習への利用
3. 学会等名 第 5 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿久津 慧, 平田 研二, 藤澤 雄大
2. 発表標題 価格提示方策を利用した電力機器群の分散型需要電力制御に関する考察
3. 学会等名 第 5 回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平田 研二, 岡島 佑介, 西澤 幸蔵, 内田 健康
2. 発表標題 エネルギー需要ネットワークにおける分散最適化とアグリゲータの戦略的入札
3. 学会等名 第 60 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大屋 秀顕, 平田 研二, 和佐 泰明, 内田 健康
2. 発表標題 異種意思決定者の参加を可能とする大規模電力市場シミュレーション環境構築に関する研究
3. 学会等名 第 60 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿久津 慧, 平田 研二, 大堀 彰大, 服部 将之, 太田 快人
2. 発表標題 出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池・太陽光発電 PCS 群における分散制御の実機検証
3. 学会等名 第 60 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下村 耕紀, 平田 研二
2. 発表標題 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と電圧分布に関する考察
3. 学会等名 第 60 回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿久津 慧, 西澤 幸蔵, 平田 研二, 大堀 彰大, 服部 将之, 太田 快人
2. 発表標題 出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池・太陽光インバータ群の分散制御実験
3. 学会等名 第 61 回 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下村 耕紀, 西澤 幸蔵, 阿久津 慧, 平田 研二
2. 発表標題 実時間価格提示を利用した分散型電圧制御と配電系統電圧分布に関する考察
3. 学会等名 第 61 回 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----