

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04420

研究課題名（和文）強化学習による入札行動に基づくP2P電力取引システムの構築とその検証

研究課題名（英文）Construction and Verification of P2P Power Trading System Based on Bidding Behavior by Reinforcement Learning

研究代表者

高山 聡志（Takayama, Satoshi）

大阪公立大学・大学院工学研究科 ・講師

研究者番号：50613551

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）：本研究では、再生可能エネルギーの主力電源化を目指し、固定価格買取制度（FIT）に依存しない新たなビジネスモデルの構築を目指した。具体的には、ブロックチェーン技術を活用したP2P電力取引システムを開発し、配電システムの物理的制約と統合することで、実態に即した取引システムを構築した。さらに、全参加者が市場取引で得る効用を最大化する入札戦略手法を開発し、ネットワーク効果を検証・評価することで、P2P電力取引システムのビジネスモデル化を実現した。この成果を国内会議および学術雑誌の投稿などを通じて公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ブロックチェーン技術を活用したP2P電力取引システムの開発を目指しています。これにより、再生可能エネルギーの利用促進と電力需給の最適化を図ります。学術的意義として、ブロックチェーン技術と強化学習を組み合わせることで、電力取引の効率化と透明性の向上を実現し、既存の電力市場の課題解決に貢献します。社会的意義として、FIT制度に依存しない新たなビジネスモデルを提案し、再生可能エネルギーの普及を促進します。消費者が直接取引に参加することで、電力コスト削減と安定供給を実現し、持続可能なエネルギー社会の構築に寄与します。これにより、エネルギー政策の転換と地域経済の活性化が期待されます。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed to establish a new business model that does not rely on the Feed-in Tariff (FIT) system to make renewable energy a primary power source. Specifically, we developed a P2P electricity trading system utilizing blockchain technology and integrated it with the physical constraints of the distribution network to create a practical trading system. Additionally, we developed bidding strategy methods to maximize the utility gained by all participants from market transactions and verified the network effect. By evaluating this network effect, we realized the commercialization potential of the P2P electricity trading system. These results were disseminated through domestic conferences and submissions to academic journals. Through these efforts, we aim to advance renewable energy utilization and provide a viable alternative to traditional energy trading models.

研究分野：電力工学

キーワード：P2P電力取引 太陽光発電 電圧制御 入札モデル マルチエージェント 強化学習 数理計画法 ブロックチェーン

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。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2018年7月に第5次エネルギー基本計画が閣議決定され、この中で再生可能エネルギー（以下再エネ）の主力電源化が明言されている。一方、太陽光発電や風力発電の急激なコストダウンに伴うFIT買取単価の低下や、FIT電源の増加に伴い国民が負担する再エネ賦課金の増加など、需要家サイドにとって再エネ導入のメリットは将来的に減っていくことが想定される。つまり、今後も継続的に再エネ導入量を増やすためには、再エネ活用を前提としつつFITに頼らない新たなビジネスモデルの構築が重要である。

この背景のもと、申請者はこれまでに再エネを市場に売ることが可能な自由化環境を想定し、市場参加者が適切な入札行動を決定するために機械学習の一つである強化学習手法を取り入れた入札行動決定手法を提案しており、提案手法により参加者全体の利益を向上させつつ、市場参加者の利益公平性を担保できることを示している。

一方、近年余剰電力の有効活用を目的に、ブロックチェーン技術によるP2P電力取引が検討されており、特に今後増加が見込まれるFIT買取が終了した需要家に対して有効なビジネスモデルであることから、様々な研究が進められている。

2. 研究の目的

本申請課題では、配電システムの物理的制約を考慮したP2P電力取引シミュレーションツールを開発する。また、P2P電力取引参加者の様々な入札行動モデルを、強化学習を用いてモデル化し、参加者の入札行動が他参加者の収益や入札行動にどのような影響を与えるのか、そのメカニズムを開発したシミュレーションツールを用いて解明する。これによってP2P電力取引がビジネスモデルとして成立するための条件である、市場参加者の増加に伴い、新規参加者以外の全市場参加者の効用も増加させる、いわゆるネットワーク効果が働く適切な市場状態・条件を解明することができる。

3. 研究の方法

上記の背景およびこれまでの研究成果をもとに、本研究は電力システムの物理的制約を考慮したP2P電力取引システムの開発とネットワーク効果が働くP2P電力取引の市場条件・状態を明らかにする。具体的には、以下の項目について検討を行う。

はじめに、P2P電力取引の需要家行動を考慮した配電システムモデルの潮流計算シミュレーションを行うためのモデルをMatlab/Simulinkを用いてモデル化しシミュレーションを行うことで、P2P電力取引が配電システムの電圧面や安定度、線路潮流に与える影響を評価する。これまでに低圧側（100V、200Vレベル）の配電システムはMatlab/Simulinkを用いてモデル化しており、本申請課題では高圧側（6,600V）の配電システムを追加してモデル化する。最終的には、得られた知見から配電システムの物理的制約を明らかにし、それらを踏まえた新たなP2P電力システムモデルについて提案する。

次に、参加者の入札行動のモデル化するために強化学習を用いた取引参加者の入札行動をモデル化する。強化学習は、学習目標を反映させた「報酬」を手掛かりに、「エージェント」が試行錯誤を通じて「環境」から得た「情報」をもとに「行動」決定戦略を求める機械学習手法の一つである。従来の手法（最適化理論、ゲーム理論）に比べ、行動主体が複数存在するマルチエージェントシステムに対して優れた解を得られる可能性が高いことから、入札行動のモデル化との親和性が高いと言える。

また、これらの提案システムモデルと入札モデルを考慮して、ネットワーク効果が働く状態およびリアルタイムシミュレータを用いた実機検証を行う。

申請書に記載のとおり、2020、2021年にP2P電力システムモデルの提案および入札行動モデルを2022年にネットワーク効果の評価を実施し、研究目的の達成を図った。一方、2023年のEthereumを用いた実証では、シミュレーション環境の再現性を担保するため、模擬ブロックチェーン環境をPython上で構築し、リアルタイムシミュレータを用いた実証した。これらの成果は国内会議での発表や、学術雑誌への投稿などを行い、積極的に公開することに努めた。これらから、本研究の目的を計画通りに達成できたと考えている。

4. 研究成果

本研究の成果として、ブロックチェーン技術を活用したP2P電力取引システムが開発されました。このシステムは、再生可能エネルギーの効率的な利用と電力需給の最適化を実現します。学術的には、ブロックチェーン技術と強化学習の融合により、電力取引の効率化と透明性が向上し、従来の電力市場における課題を解決する新しいモデルを提供します。また、このシステムは市場参加者全体の効用を最大化し、ネットワーク効果を活用した新しいビジネスモデルの可能性を示しました。

社会的には、FIT制度に依存しない持続可能な電力取引モデルを提案し、消費者が直接電力取引に参加できる環境を整備しました。これにより、電力コストの削減と安定供給が実現し、地域経済の活性化にも寄与します。さらに、この研究はエネルギー政策の転換を促進し、再生可能エ

エネルギーの普及に大きく貢献するものと期待されます。この一例として、電圧制約を加味した P2P 電力取引システムによる運用結果を以下に示します。

本研究では、PV 出力抑制量を決定する問題を最適化問題として定式化しています。提案する P2P 電力市場取引では、システム電圧を維持するために出力を抑制するプロシューマに対して補償金を支払います。補償金の総額を削減することで、プロシューマと消費者が支払う P2P 電力市場取引の参加費や取引手数料が減少し、システムオペレータの補償リスクも減少し、全てのプレーヤーにとって win-win の関係が築かれます。したがって、本研究では、システム電圧を維持するために出力抑制を行ったプロシューマに対する補償金を最小化することを目的とした最適化問題を設定しています。最適化の定式化は以下の通りです。

$$\min \sum_{i=1}^n P_i^{cur} \cdot C^{P2P} + \sum_{j=1}^m P_j^{cur} \cdot C^{com} \quad (1)$$

$$P_i - P_i^{cur} = V_i \sum_{k=1}^{n+m} V_k \{ G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) \} \quad (2)$$

$$P_j - P_j^{cur} = V_j \sum_{k=1}^{n+m} V_k \{ G_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) \} \quad (3)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^{n+m} V_k \{ G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) \} \quad (4)$$

$$Q_j = V_j \sum_{k=1}^{n+m} V_k \{ G_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) - B_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k) \} \quad (5)$$

$$V^{\min} \leq V_i \leq V^{\max} \quad (6)$$

$$-\pi \leq \theta_k \leq \pi \quad (7)$$

$$0 \leq P_i^{cur} \leq P_i \quad (i = 1 \dots k) \quad (8)$$

ここで、 i は契約を結んだプロシューマの数、 j は契約を結んでいないプロシューマの数、 P^{cur} は出力抑制量、 C^{P2P} は P2P 電力取引のクリアリング価格、 C^{com} は PV 出力抑制の補償金、 P は入札する有効電力、 Q は無効電力、 V はノード電圧、 θ はノード位相を示す。 G と B はノード間のコンダクタンスとサセプタンスの成分を示し、 V^{\min} と V^{\max} はノード電圧の指定範囲内の最小および最大電圧をそれぞれ示す。

式(1)は、P2P 電力取引で契約を結んだ消費者と結んでいない消費者の補償金の合計を最小化する目的関数を示す。P2P 電力取引で契約を結んだプロシューマは、出力抑制による機会損失を防ぐために契約価格を補償単価に設定する。契約を結ばなかったプロシューマの補償単価はパラメータとして考慮される。式(2)から(5)はそれぞれ有効電力と無効電力の潮流方程式を示し、式(2)と(3)に PV 出力抑制量 P^{cur} の項を加えることで、式(6)に示す電圧上下限值制約が満たされない場合に P^{cur} の値を代入して満たすようにする。式(7)は各ノードの位相制約を示し、式(8)は余剰電力を超えた抑制量が許されないようにする出力抑制量の上限制約を示している。

以上の定式化を踏まえ、P2P 電力取引を実施した結果として、図 1 に出力抑制の最小化または補償コストの最小化を目的関数とした場合の各手法の電圧変動を示す。また、すべての逆潮流電力をグリッドに供給した場合の電圧変動も比較のために示している。図 1 に示されているように、PV 出力が抑制されない場合、電圧は 1.05 p.u.の上限を逸脱する。一方、提案された最適化手法は、PV 出力を抑制することで電圧を規制範囲内に保つことができている。目的関数の違いによる出力抑制量の差はほとんどなく、電圧変動はほぼ同じであった。

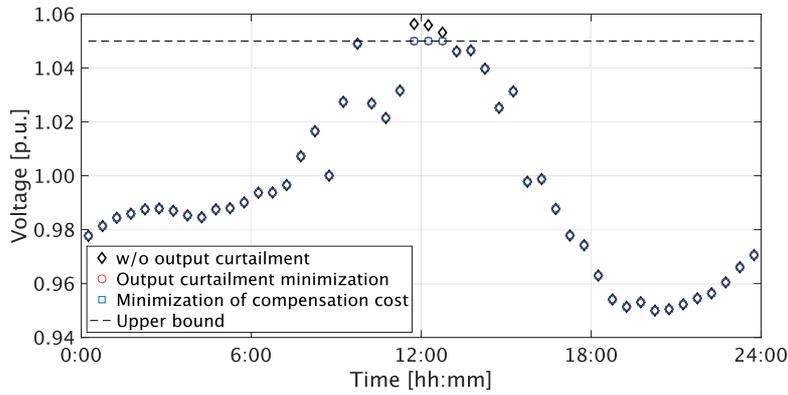
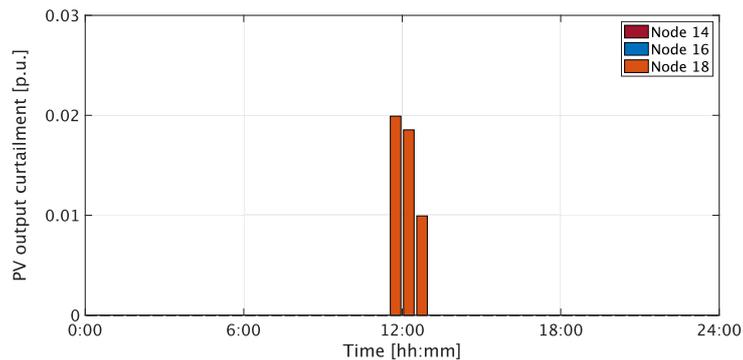


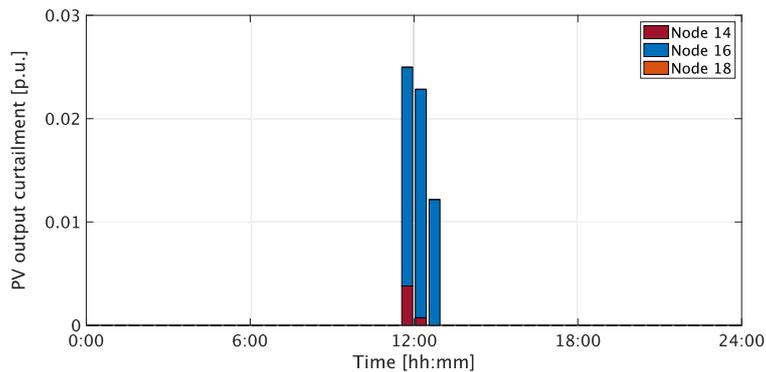
Fig.1 Voltage transition in each method

次に、各目的関数の PV 出力抑制結果を評価する。図 2(a)は PV 出力抑制の最小化を目的関数とした結果を示し、図 2(b)は補償費用の最小化を目的とした結果を示している。図 2(a)では、各ノードの出力抑制電力が PV 出力抑制を最小化するように決定されるため、末端ノードであるノード 18 の PV 出力が抑制されている。一方、図 2(b)では、ノード 18 が P2P 電力取引にて約定できたため、補償費用が高くなり、その結果、ノード 18 の PV 出力抑制が回避されている。したがって、ノード 18 の P2P 電力取引による利益が損なわれることはない状況を作り出せている。逆に、契約できなかったノード 14 および 16 の PV 出力が抑制されている。

このように、両方の目標関数は図 1 に示されているように電圧を指定範囲内に保つことができているが、各ノードの PV 出力抑制は目標関数の違いに応じて異なっている。したがって、提案された P2P モデルは、出力抑制の不公平を解消しながら電圧管理を達成できることが示唆された。



(a)



(b)

Fig.2 PV output curtailment for each objective function;
(a) PV output curtailment minimization, (b) Compensation cost minimization

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Takayama Satoshi, Ishigame Atsushi	4. 巻 17
2. 論文標題 A Voltage-Aware P2P Power Trading System Aimed at Eliminating Unfairness Due to the Interconnection Location	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 841 ~ 841
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en17040841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 0件）

1. 発表者名 生駒 和也, 高山 聡志, 石亀 篤司
2. 発表標題 需要家間P2P電力取引導入によるエンドユーザーの経済的メリット評価
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生駒 和也, 高山 聡志, 石亀 篤司
2. 発表標題 需要家間P2P電力取引による取引参加者の経済的メリットの評価
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲 琢矢, 高山 聡志, 石亀 篤司
2. 発表標題 電圧制約を組み込んだP2P電力取引に関する基礎検討
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲 琢矢, 高山 聡志, 石亀 篤司
2. 発表標題 電圧制約による不公平性を考慮したP2P電力取引市場ルールの検討
3. 学会等名 令和3年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
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
---------	---------