

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04084

研究課題名（和文）分散台帳技術を用いた再生可能エネルギー高度利用のための小口電力取引スキーム

研究課題名（英文）Small Account Power Transaction Scheme for Advanced Use of Renewable Energy using Distributed Ledger Technology

研究代表者

山口 順之（Yamaguchi, Nobuyuki）

東京理科大学・工学部電気工学科・准教授

研究者番号：50371224

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）：分散型PV余剰電力取引システムの「実世界との融合手法の提案」として、一般送配電事業者が配電システムの混雑制約を考慮した取引の可否判定を実施し、ブロックチェーン上で取引を行うシステムの設計を行なった。最適潮流計算に基づく約定処理をオンチェーンで実施するアーキテクチャーを提案した。さらに、余剰電力トークンの所有者が、勝手にトークンを送信・消去できない電力トークンの設計を行なった。スケーラビリティの評価では、研究室内のEthereumを用いたプライベートネットワークを用いて、取引件数や市場参加者数が取引手数料と処理時間にどのような影響を及ぼすかについて、数値実験を行ない、学術論文として公開された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、PV出力を抑制するだけではなく、電力需要をシフトすることで、PVの出力抑制を回避するために、PV発電余剰が発生する時間帯に、電力需要を通常よりも多くし、需要家とPV出力をマッチさせる取引システムの実験と、アーキテクチャーの提案をすることができた。中央指令所からの制御ではなく、経済的な観点から各需要家のニーズに応じて分散的取引することにより、社会全体の経済合理性を満たすことが可能である。全国に広く分布している電力需要家が、再エネやデマンドレスポンス、電気自動車を、天候や需要家事情に基づいて取引することを、分散システムと市場メカニズムを活用する提案手法により実現することが可能である。

研究成果の概要（英文）：As a proposal of a method for integrating with the real world of the distributed PV surplus power trading system, we proposed that the system in which a general power transmission and distribution operator determines whether or not to trade in consideration of congestion restrictions of the distribution system and trades on the blockchain. We also proposed an architecture that performs on-chain execution processing based on optimal power flow calculation. Furthermore, the owner of the surplus power token designed a power token that cannot send or erase the token without permission. In the evaluation of the scalability, we examined that using a private network using the Ethereum of the laboratory, for any kind of impact on the number of transactions and market participants the number of transaction fees and processing time.

研究分野：電力系統工学

キーワード：ブロックチェーン スマートコントラクト オラクル 電力取引 太陽光発電 再生可能エネルギー 配電系統 送電混雑

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、わが国では、再生可能エネルギー発電の FIT 制度により太陽光発電 (PV) が大量に導入されてきている。日本全体の系統需要ピーク 170GW に対し、PV の FIT 認定量はすでに約 80GW である。PV 大量導入に伴い、電力需要が少なく PV 発電量が多い時間帯において、余剰電力が生じつつある。そのため、一部の地域では、PV に出力制御つき PCS の設置が義務付けられており、これを用いた出力制御システムが構築されている。

しかし、再生可能エネルギーをさらに活用するためには、単に PV 出力を抑制するだけではなく、電力需要をシフトすることで、PV の出力抑制を回避することが望ましい。

そのためには、PV 発電余剰が発生する時間帯に、電力需要を通常よりも多くすることのできる需要家と PV 出力をマッチさせる必要がある。このマッチングは、中央指令所からの制御ではなく、経済的な観点から各需要家における電力需要の必要性に応じて分散的に行われることを通じて、社会全体の経済合理性を満たす。電力需要家は、全国に広く分布しており、再生可能エネルギーやデマンドレスポンス、電気自動車は、天候や需要家行動によって動的に利用可能量が変化するためである。

このような PV 余剰電力の取引を実現するためには、卸電力取引と比較して小口の注文を大量に扱う必要がある。しかし、電子的であれ物理的であれ、従来の中央集中型の取引所は、設置・運営管理コストが高いことに加え、市場参加者が約定どおりに電力と金銭の授受を行なうかどうかという信用リスクを一定水準以下に保つことが難しい。

2. 研究の目的

本研究では、ブロックチェーン上の仮想通貨取引とスマートコントラクトの実行による分散型 PV 余剰電力取引システムを提案し、実証実験によりスケーラビリティや信頼性の評価を行なう。

ブロックチェーンを用いた分散型取引所では、ブロックチェーン上の取引処理の負担を仮想通貨で支払うため、その時々で変化する処理負担を仮想通貨の時価で実施することができ、設置・運営管理コストの面で効率的となることが期待できる。また、スマートコントラクトにより、事前に仮想通貨を受け取り、需要家側のエネルギー管理システム (Energy Management System, EMS) を制御することで、電力と金銭の授受をより確実にすることが可能となる。

具体的には、本研究では、以下の 3 つの課題を設定する。

- A) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「実世界との融合手法の提案」
- B) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「スケーラビリティの評価」
- C) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「合意形成アルゴリズムの提案」

3. 研究の方法

- A) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「実世界との融合手法の提案」
 - A-1) ブロックチェーンを用いた配電系統混雑解消が可能な PV 余剰電力取引システムを考案する。
 - A-2) 余剰電力取引のためのトークンのデータモデルの設計を行う。
- B) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「スケーラビリティの評価」

スケーラビリティの評価では、研究室内の Ethereum を用いたプライベートネットを用いて、通信ネットワークや電子計算機ノードを実験環境として、取引件数や市場参加者数が取引手数料と処理時間にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。
- C) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「合意形成アルゴリズムの提案」

近年検討されつつあるオラクルシステム (実世界の公的機関 (例えば、気象庁や電力ガス市場取引等監視委員会、電力広域的運営推進機関など) との情報連携に基づく信憑性確保システム) を、提案する PV 余剰電力取引システムに取り込むためのシステムアーキテクチャを設計する。

4. 研究成果

- A) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「実世界との融合手法の提案」
 - A-1) ブロックチェーンを用いた配電系統混雑解消が可能な PV 余剰電力取引システムの提案

提案する余剰電力取引システムは、日中に発生する PV の余剰電力をブロックチェーン上でトークンとして扱い、それらを市場に参加するアカウント間で取引することにより実現するものである。このシステムは DSO ではなく、システムのサービス提供者(3)によって管理される。提案システムには、PV を所持し、余剰電力を生み出す PV 発電事業者と余剰電力の消費先となる追加需要の創出が可能な需要家、さらにシステムの提供・運用・管理をするサービス提供者が関係する。本システムにおいて配電線制約を考慮するために必要な値は、DSO によって提供される必要がある。

提案する余剰電力取引の流れは以下の通りである。(1) DSO が出力制御スケジュールを通知する。(2) サービス提供者によってブロックチェーン上に余剰電力の取引市場が開設される。同時に余剰電力トークンを PV 発電事業者に配布し、市場参加者の入札受付を開始する。(3) 一定期間後に入札受付を終了し、サービス提供者が配電線制約を考慮したノーダールプライスを計算し、板寄せ方式の約定処理を実行する。(4) サービス提供者は約定結果に基づき、スマートコントラクトによりトークンと仮想通貨を交換する。(5) ブロックチェーンに記録された約定結果の通

りに、PV 発電事業者による発電と需要家による追加需要の創出が行われる。

A-2) 余剰電力取引のためのトークンのデータモデルの設計

ブロックチェーン上で電力取引を行う場合、電力をスマートコントラクトの一種であるトークンで表し、システムに組み込む必要がある。しかしながら、現在一般的に使用される ERC20 などのトークン規格は、トークン所有者が自由に送信・消去が可能であり、余剰電力トークンとして用いるためには不適である。従って、送信・消去について所有者の権限を制御可能なペナルティトークン規格を応用した電力トークンの設計が必要である。

EEA (Enterprise Ethereum Alliance) は、トークン所有者が送信・消去することが不可能なトークン規格である「ペナルティ・トークン」を提案している。ペナルティ・トークンは、ERC777 の実装と、トークン所有者の送信・消去を制限するインターフェースである「NonTransferableToken」の実装を継承している。また、ブロックチェーン上でのアカウントに管理者 (Owner) や鑄造者 (Minter) 等の役割 (Role) を与えることができるという特徴を持つ。このペナルティ・トークンは規格として提案されているものの、これを用いた設計や実装の事例は多くない。そのため、提案システムにおける余剰電力トークンでは、このペナルティ・トークンを応用して新たに設計を行った。

B) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「スケーラビリティの評価」

研究室内の Ethereum を用いたプライベートネットを用いて、取引件数や市場参加者数が取引手数料と処理時間にどのような影響を及ぼすかについて、数値実験を行ない、学術論文として公刊された。数値実験結果では、まず、トークンとスマートコントラクトによりブロックチェーン上で PV 余剰電力取引をすることが可能であることを確認した。また、取引そのものの処理の時間は、実験で検証した最大 8000 件の入札で処理時間の平均値が 7.172 秒であった。これより、前日予告の取引において支障をきたすものではないと判断できる。

C) 分散型 PV 余剰電力取引システムの「合意形成アルゴリズムの提案」

個人間で電力取引を自由に行った場合、電圧・電流が配電制約を逸脱する可能性があるため、最適潮流計算を利用した取引の制御が必要である。また、最適潮流計算や約定処理には多くの計算処理を必要とするが、その処理を分散型システムであるブロックチェーンネットワーク上で行うのは、金銭的・時間的コストの双方から現実的ではない(9)。従って、情報レイヤにおいても、複雑処理をブロックチェーン外部 (オフチェーン) に委譲した上で、ブロックチェーン内部 (オンチェーン) と相互作用させるアーキテクチャーが必要である。

提案システムでは、オフチェーンの約定処理サーバーの API データの出処の真正性をオラクルにより証明する (Fig. 2.3)。例えば、Provable による TLSNotary を証明方法とした場合、オラクルが auditee (被認証者) となり、AMI (Amazon Machine Image) のロックダウンされた EC2 インスタンスが auditor (認証者) として動作することで、真正性が保証される。

これにより、余剰電力取引システムは混雑管理のような複雑な処理をオフチェーンに委譲可能となり、運用コストを削減可能である。また、混雑管理の処理に必要な需要家の個人データもオフチェーン化することにより、オンチェーンの分散型台帳への永続化を回避できる。

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 長塚卓巳・佐野盛僚・山口順之	4. 巻 140巻3号
2. 論文標題 ブロックチェーンを用いた分散型PV余剰電力取引システムの提案と処理時間の評価実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 176-185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.140.176	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 Takumi Nagatsuka, Moriaki Sano, Kodai Kushino, Nobuyuki Yamaguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Congestion Dissolution of Distribution Systems in Local Power Exchange Systems for Surplus Photovoltaic Output Using Blockchain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of 2019 3rd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)	6. 最初と最後の頁 193-199
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICSGSC.2019.00008	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takumi Nagatsuka, Moriaki Sano, Kodai Kushino, Nobuyuki Yamaguchi
2. 発表標題 Congestion Dissolution of Distribution Systems in Local Power Exchange Systems for Surplus Photovoltaic Output Using Blockchain
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Smart Grid and Smart Cities（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎野晃大, 長塚卓巳, 山口順之
2. 発表標題 分散型 PV 余剰電力取引システムにおける配電系統混雑管理のシミュレーション
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚卓巳, 榑野晃大, 山口順之
2. 発表標題 分散型 PV 余剰電力取引システムにおける調整力調達の費用負担に関する基礎検討
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榑野晃大, 佐野盛僚, 長塚卓巳, 山口順之
2. 発表標題 分散型PV余剰電力取引システムにおけるオラクル導入の一検討
3. 学会等名 電気学会 システム/スマートファシリティ合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Moriaki Sano, Takumi Nagatsuka, Koudai Kushino, Nobuyuki Yamaguchi
2. 発表標題 Preliminary Study of Interaction between Distribution System Operator and Exchange System of Surplus PV Output
3. 学会等名 International Workshop on Power Engineering in Remote Islands (IWPI2018-Jeju) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takumi Nagatsuka, Nobuyuki Yamaguchi
2. 発表標題 DECENTRALIZED TRANSACTION SYSTEM OF SURPLUS PV OUTPUT USING BLOCKCHAIN
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榑野晃大, 長塚卓巳, 山口順之
2. 発表標題 分散型PV余剰電力取引システムにおける配電線制約考慮に関する一検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Best Poster Presentation Award, Grand RE2018 http://www.renewableenergy.jp/council/news/GRE2018.pdf

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