

令和元年6月12日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00029

研究課題名(和文) 両面性電力市場におけるプラットフォーム戦略に関する研究

研究課題名(英文) Platform Strategy on Two-sided Electrical Market

研究代表者

徐 ふぁ (Xu, Hua)

筑波大学・ビジネスサイエンス系・教授

研究者番号：40253025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、動的システムの最適化理論、動的ゲーム理論や動的プリンシパル・エージェント・モデルなどの数理的アプローチを応用して、両面性電力市場における送配電事業者のプラットフォーム戦略を研究した。電力供給事業者をリーダーとして、小売電気事業者をフォロワーとする複数のリーダーと複数のフォロワーを持つマルコフジャンプ線形確率システムのインセンティブシュタッケルベルグ戦略、更に、リーダーのナッシュ(Nash)均衡とフォロワーの協力(Pareto)均衡または非協力(Nash)均衡を可能にするインセンティブシュタッケルベルグ(Stackelberg)戦略などを研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力供給システムの中に、突発的な運転モードの遷移がある。その運転モードの遷移はマルコフ過程に従う。運転モードの遷移、逆流による外乱やシステムの不確定要素などを取り入れるマルコフジャンプ確率システムを用いて、1. 出力フィードバックによるシュタッケルベルグ(Stackelberg)戦略設計問題、2. ロバストパレート最適戦略設計問題、3. インセンティブシュタッケルベルグゲーム問題を定式し、各々の問題の解(戦略)が存在する条件を定めて、その解の求め方や計算アルゴリズムを研究した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we applied mathematical approaches such as dynamic optimization theory, dynamic game theory, and dynamic principal agent model to investigate the platform strategies of electrical distributors in the two-sided electrical market. With power suppliers as leaders and the electricity retailers as followers, we studied the Stackelberg incentive strategy for linear Markov jump stochastic systems, which has multiple leaders and multiple followers, as well as Stackelberg incentive strategy, arrives at the Nash equilibrium of the leaders and the cooperative (Pareto) or non-cooperative (Nash) equilibrium of the followers.

研究分野：数理情報学

キーワード：動的ゲーム 両面性市場 電力市場 インセンティブ戦略 ナッシュ均衡

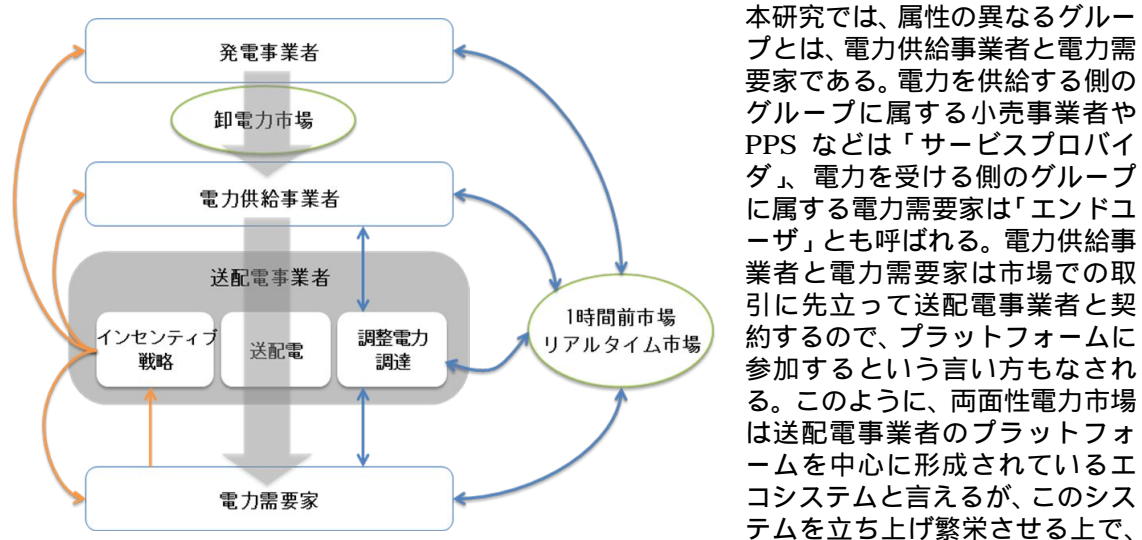
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力システム改革の第3段階にあたる「発送電分離」を2020年4月に実施する法案（電気事業法の改正案）が2015年6月に成立した。電気事業法の改正で、大手電力会社の送配電網を別会社化することが決まり、既存の（旧）一般電気事業者や新規参入した新電力会社(PPS)などが、中立的な条件で送配電網を使えるようになる。これによって、大手電力による地域独占が終焉し、電力需要家が電力の購入先を自由に選ぶようになる一方で、PPSなど様々な企業が自由に電力を作り、売ることができるようになる。電力の自由化が新規参入など新しいビジネスチャンスになることは間違いない。

2. 研究の目的

本研究では、別会社化する送配電事業者、送配電事業者の送配電網を利用する電力供給事業者と電力需要家が参加する電力市場（図）を両面性電力市場として捉え、送配電事業者のプラットフォーム戦略について研究する。「両面性市場（Two-Sided Market）」とは、属性の異なるグループが存在し、両者が取引することで利益を得ることができ、かつその取引に必ず仲介者が存在するような市場を言う。また、取引仲介者を「プラットフォーム（Platform）」という。



プラットフォームは以下のような問題に直面する。()両面性電力市場に如何に多数の電力供給事業者と電力需要家をバランスよく参加させるか、特に、再生可能エネルギーの利用拡大やイノベーションが促進されるか、()如何に両面性市場に参加している電力供給事業者と多くの取引を発生させるか、()取引によって生み出された価値（収益）が、どのように電力供給事業者と送配電事業者間に配分されるか。

()の問題の困難さは、間接ネットワーク効果の存在によって、いずれか片側の参加者グループが存在しなければ他方の側の参加者もプラットフォームに参加しないため、両側の参加者を同時に集めなければならないところにある。()の問題は、参加者の事後の意思決定、すなわちプラットフォームへの参加後の取引行動へのインセンティブ戦略問題と捉えられる。()の問題は、電力市場内の取引によって直接的に価値を生み出し、かつその価値を収益として得ているのが各参加者であることから生じる。送配電事業者はプラットフォームとしては取引を仲介はするが、取引当事者ではないから、両面性電力市場に参加するためのアクセス料金や託送料金以外に、取引自体から収益を得ることは少ない。プラットフォームが収益を得るためには、参加者が得る収益の一部をプラットフォームに配分させる必要がある。そこで、()の問題は「参加インセンティブ問題」、()の問題は、「取引インセンティブ問題」、()の問題は市場の生み出す価値の「収益配分問題」と呼ばれる。

3. 研究の方法

本研究では、動的システムの最適化理論、動的ゲーム理論や動的プリンシパル・エージェント・モデルなどの数理的アプローチを応用して、両面性電力市場における送配電事業者のプラットフォーム戦略を研究する。具体的には、【1】動的システムの最適化理論に基づいて、送配電事業者のパレート最適需給調整戦略を構築する。【2】動的ゲームアプローチを用いて、再生可能エネルギー電力供給事業者のための取引インセンティブ戦略を構築する。【3】動的プリンシパル・エージェント・モデルを応用して、両面性電力市場における最適収益配分戦略と送配電網への投資インセンティブ戦略を構築する。

4. 研究成果

日本の送電網は九つの小さなネットワークに分かれている。各ネットワークにおいて、資源提供者として、一つの主な電力供給事業者が多数の小売電気事業者に対して電力を提供する。まず、各ネットワークにおいて、電力供給事業者が小売電気事業者に対してインセンティブメカニズムデザインのための理論的研究を行った。この中に、再生可能エネルギーによる逆潮流

の影響を送電網への外乱とみなして、外乱や不確定要素が含まれる大規模電力システムにおけるインセンティブシュタッケルベルグ (Stackelberg) 戦略を構築した。実システムに応用するための計算アルゴリズムを開発した。次に、九つのネットワークをまとめて、各ネットワークの電力供給事業者をリーダー (Leader) として、小売電気事業者をフォロワー (Follower) とする複数のリーダーと複数のフォロワーを持つマルコフジャンプ線形確率システムのインセンティブシュタッケルベルグ戦略を研究した。リーダーのナッシュ (Nash) 均衡とフォロワーの協力 (Pareto) 均衡または非協力 (Nash) 均衡を可能にするリーダーのインセンティブシュタッケルベルグ (Stackelberg) 戦略を構築した。実システムに応用するための計算アルゴリズムを開発した。

次に、電力供給システムをマルコフジャンプ確率システムとして捉えて、多数の電力供給事業者が多数の小売電気事業者に対し、パレット最適化問題やインセンティブデザイン問題などを研究した。電力供給システムの中に、突発的な運転モードの遷移がある。その運転モードの遷移はマルコフ過程に従う。運転モードの遷移、逆流による外乱やシステムの不確定要素などを取り入れるマルコフジャンプ確率システムを用いて、以下の問題を定式化した。つまり、1. 出力フィードバックによるシュタッケルベルグ (Stackelberg) 戦略設計問題、2. ロバストパレート最適戦略設計問題、3. インセンティブシュタッケルベルグゲーム問題を定式し、各々の問題の解 (戦略) が存在する条件を定めて、その解の求め方や計算アルゴリズムを研究した。

最後に、送配電事業者の送電網拡大のために電力供給事業者が送配電事業者に収益を配分する問題を研究した。送配電事業者が託送電力増に応じた投資を行いつつ、電力供給事業者の収益を最大化する送配電事業者と電力供給事業者間の利益配分、及び投資水準を決定する確率最適制御問題として定式化した。送配電事業者と電力供給事業者との契約によって定められる利益配分の条件が求められた。電力供給事業者の最適利益配分戦略と投資インセンティブ戦略が確率最適制御問題の解として求められた。数値シミュレーションによって収益配分の妥当性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Incentive Stackelberg Games for Stochastic Linear Systems With H_∞ Constraint, IEEE Transactions on Cybernetics, Vol.49, No.4, pp.1463-1474, 201. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#) and Vasile Dragan : Static Output-Feedback Incentive Stackelberg Game for Discrete-Time Markov Jump Linear Stochastic Systems with External Disturbance, IEEE Control Systems Letters, Vol.2, No.4, pp.701-706, 2018. (査読有)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Differential Games for Weakly Coupled Large-Scale Linear Stochastic Systems with an H_∞ -Constraint, International Game Theory Review, Vol.20, No.1, March, 2018. (査読有)

海野 大, [シュウ ファ](#), 医療保険加入者に健康改善への行動変容を促すウェルネス・プログラムの最適インセンティブ設計、リアルオプション研究, Vol. 9, pp.1-22, 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#), Tadashi Shima and Vasile Dragan : A Stochastic Multiple-Leader-Follower Incentive Stackelberg Strategy for Markov Jump Linear Systems, IEEE Control Systems Letters, Vol.1, No.2, pp.250-255, Oct. 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Open-loop Stackelberg Games for Stochastic Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E100-A, No.4, pp.989-995, 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Infinite Horizon Linear-Quadratic Stackelberg Games for Discrete-time Stochastic Systems, Automatica (Brief paper), Vol.76, March, pp.301-308, 2017. (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#) and Vasile Dragan : Static-Output Feedback Stackelberg Strategy of Infinite Horizon Markov Jump Linear Stochastic Systems with H_∞ Constraint, 57th IEEE Conf. Decision and Control, pp.1935-1940, Miami, FL, December 2018. (査読有)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Robust Incentive Stackelberg Games for Stochastic LPV Systems, 57th IEEE Conf. Decision and Control, pp.1059-1064, Miami, FL, December 2018. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#), Tadashi Shima and Mostak Ahmed : Multi-leader-follower Incentive Stackelberg game for Infinite-Horizon Markov Jump Linear Stochastic Systems with H_∞ Constraint, The 2018 IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, pp.3946-3953, Miyazaki, Japan, October 2018. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#) and Vasile Dragan : Robust Pareto Suboptimal Strategy for Uncertain Markov Jump Linear Stochastic Systems with Multiple Decision Makers, 2018 American Control Conf. (ACC), pp.6628-6633, Milwaukee, WI, June 2018. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, [Hua Xu](#), Tadashi Shima and Vasile Dragan : A Stochastic Multiple-Leader-Follower Incentive Stackelberg Strategy for Markov Jump Linear Systems, 56th IEEE Conf. Decision and Control, pp.3688-3693, Melbourne, Australia, December 2017. (査読有)

Masaru Unno, [Hua Xu](#) and Hiroaki Mukaidani: Dynamic Incentive Remuneration Design for Functional Recovery Care, Proceedings of Asian Conference of Management Science and Applications, Fuzhou, China, December 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, Masaru Unno, [Hua Xu](#) and Vasile Dragan : Gain-Scheduled Nash Games with H_∞ Constraint for Stochastic LPV Systems, 20th IFAC World Congress, IFAC PapersOnLine 50-1, pp.1478-1483, Toulouse, France, July 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, Tadashi Shima, Masaru Unno, [Hua Xu](#) and Vasile Dragan : Team-optimal Incentive Stackelberg Strategies for Markov Jump Linear Stochastic Systems with H_∞ Constraint, 20th IFAC World Congress, IFAC PapersOnLine 50-1, pp.3780-3785, Toulouse, France, July 2017. (査読有)

Hiroaki Mukaidani, Mostak Ahmed, Tadashi Shima and [Hua Xu](#) : H_∞ Constraint Incentive Stackelberg Game for Discrete-Time Stochastic Systems, 2017 American Control Conf. (ACC), pp.5257-5262, Seattle, WA, May 2017. (査読有)

〔図書〕(計 1 件)

Hiroaki Mukaidani and [Hua Xu](#) : Closed-Loop Nash Games for Interconnected Positive Nonlinear Systems with H_∞ Constraint, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Positive Systems, Theory and Applications (POSTA 2018), Springer, pp.215-224, 2019. (査読有)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：海野 大

ローマ字氏名：Masaru Unno

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、研究者個人に帰属されます。