

エネルギー需給ネットワークのモデリングと統合メカニズム

研究代表者 内田 健康
(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

エネルギー伝送ネットワークと双方向情報伝達ネットワークをインフラとして、ダイナミクスを持つエネルギー需要者及びエネルギー供給者、並びに公益事業体をエージェントとする次世代のエネルギー需給システムを想定する。このエネルギー需給システムにおいて、エネルギー需要者とエネルギー供給者が利己的かつ戦略的に決定する分散制御を束ねて公共の利益に導く最適な統合メカニズム（公益事業体の機能）を構築するために、エネルギー需給ネットワークをモデル化し、同時に統合メカニズムの理論的な基礎を築き、統合メカニズムの設計法を確立することを目指す。

2. 主な研究成果

2016年度から我が国においても電力自由化が本格化し、自由な電力需給のために、卸売市場から小売市場への展開、スポット市場からリアルタイム調整市場への展開が推進されている。一方で再生可能エネルギーの導入が進められており、電力自由化を踏まえながら再生可能エネルギーの不確かさを克服してアンシラリーサービスを実現するリアルタイム調整市場の実現が望まれている。本研究プロジェクトにおいては、ダイナミックな電力システムを前提としたリアルタイムオークションの新たなモデルを提案し、その経済的評価の理論的解析を継続的に実施している。

多種多様な目的・意思や資財を持つエージェント・ユーティリティ間で経済的・物理的に公平なエネルギー授受を実現するには、本研究課題でこれまで取り組んでいたメカニズムデザインによるモデルベース電力市場設計理論をより一般化した契約理論に基づく枠組みが必要である。この枠組みを理論的に構築するために、経済分野で長年研究されてきた契約理論をシステム制御分野の知見を基に再解釈し、制御入力を持つダイナミクス制約を考慮した新たなエネルギー需給システムを提案した。特に、従来研究でも行われてきた契約構造の分析だけでなく、最適な契約を導出する構成手法まで世界で初めて理論的に示し、経済モデルと物理モデルを統合したエネルギー需給システムの基盤理論体系の拡張に成功した。また、需要者の市場取引への参加を促すためのアグリゲータの新たなモデル、特にマーケットパワーを最大化するアグリゲータの検討を開始し、複数のアグリゲータの機能を提案した。さらに、再生可能エネルギーを市場取引によって安定化するための確率モデルを提案した。

実際の電力システムはマルチタイムスケール制御を行うことで安定化を実現しているが、個々のエージェントに運用状態決定の権利を与える分散型の情報処理・意思決定を各タイムスケールで実現する必要がある。しかし、タイムスケール間の影響を陽に考慮したモデル解析の研究は限られていた。機器のダイナミクスを考慮した多地域電力網システムの実時間制御を対象に、電力市場からの参照信号を考慮しつつ、負荷周波数制御器設計において物理的運用コストに関する評価関数をエージェント毎に最適化するゲーム構造の問題を定式化した。これらの理論的成果は、実際の物理モデルを用いたシミュレーション解析を通してその効果を検証した。昨年度からこれまでの本研究プ

プロジェクトの理論的成果を実装できる電力市場シミュレータ開発のためのシステム構築を始め、開発に必要とする基盤を整備した。特に、本システムは機械学習に基づく計算機上で行われる入札と共に、実際の市場の約定結果を踏まえ、人間による入札も同時に行える機能を備えている。今年度から本機能を用いて、機械学習の知見、行動経済学的知見、システム制御的知見を融合した分析を開始している。本研究テーマについては、昨年度の成果を踏まえて、今年度も継続的に取り組む。

再生可能エネルギーの導入量拡大を前提として、今後の電力・エネルギー市場ではネガワットを含む調整力の確保が課題である。また同時に、蓄電設備容量の拡大も予想される。ネガワットや蓄電量の大幅な取引は従来の電力市場には見られない新たな要素であり、これらの取引規模の拡大が市場パフォーマンスに与える影響について、十分な知見が蓄積されているとはいえない。本研究プロジェクトでは、今後の電力市場を想定した市場モデル分析にも取り組んでいる。この研究課題は、ネガワットや蓄電取引に加え、アグリゲータといった新たな市場プレーヤも視野にいれ、今後の電力市場設計に資する政策的インプリケーションを得ることを目的としている。2017年度は調整力市場におけるネガワット取引量が、消費者側のエネルギー利用効率と密接な関連を持ち得ることに着目し、理論的分析を推進した。分析の結果、調整力市場におけるネガワットと火力発電の代替的関係を想定した場合、消費者側のエネルギー効率改善はネガワット価格を上昇させ、調整力としての火力発電量の増加をもたらすケースがあることを示した。今後は、電力市場設計における具体的なインプリケーションを導くために、蓄電を含むモデルへの拡張に取り組む予定である。これにより、市場取引の各プレーヤ（消費者、小売事業者、など）にとって節電（ネガワット）や蓄電が戦略的にどのような意味をもつのか、また市場全体のパフォーマンスをどのように左右するのか、明らかにすることを目指す。それと同時に小売価格の内生化に取り組み、エネルギー効率改善が小売価格へ与える効果を含め、市場全体に与える影響について分析をすすめる。

上記研究課題とも関連し、一般消費者の電力需要（節電）行動を行動経済学的な視点から分析するために、2017年1月に一般住民200世帯を対象としたラボラトリー経済実験を実施した。2017年度は実験結果の分析をすすめると同時に、ラボラトリー実験、および関連するフィールド実験結果を統合的に説明可能な電力需要モデルの構築に取り組んだ。2018年度も継続して取り組む計画である。本モデルの構築は、スマートメータをはじめとする電力システム設計への貢献も期待できる。

3. 共同研究者

赤尾健一（社会科学総合学術院 教授）	庫川幸秀（理工学術院総合研究所 次席研究員）
和佐泰明（理工学術院総合研究所 次席研究員）	塚本幸辰（理工学術院総合研究所 招聘研究員）
辻 隆男（理工学術院総合研究所 招聘研究員）	澤田英司（理工学術院総合研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Nguyen Gia Minh Thao and K. Uchida, "An Enhanced Feedback Linearization with Fuzzy Logic to Control the Active and Reactive Powers of Bidirectional Three-Phase Grid-Connected Renewable Energy Inverters," International Journal of Electrical Energy, vol. 5, no. 1, pp. 1-13, June 2017
- Nguyen Gia Minh Thao and K. Uchida, "An Improved Interval Fuzzy Modeling Method: Applications to the Estimation of Photovoltaic/Wind/Battery Power in Renewable Energy Systems," Energies 2018, 11(3), 482
- T. Murao, K. Hirata, Y. Okajima and K. Uchida, "Real-time pricing for LQG power networks with independent types: A dynamic mechanism design approach," European Journal of Control, vol. 39, pp. 95–

105, 2018

- Y. Okajima, K. Hirata, T. Murao, T. Hatanaka, V. Gupta and K. Uchida, "Strategic Behavior and Market Power of Aggregators in Energy Demand Networks," Proc. 56th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 694-701, 2017
- Y. Wasa, K. Sakata, K. Hirata and K. Uchida, "Differential Game-based Load Frequency Control for Power Networks and Its Integration with Electricity Market Mechanisms," Proc. 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 1044-1049, 2017
- Y. Wasa, K. Hirata and K. Uchida, "A Dynamic Contract Mechanism for Risk-sharing Management on Interdependent Electric Power and Gas Supply Networks," Proc. 2017 Asian Control Conference, pp. 1222-1227, 2017
- 庫川幸秀, 田中誠, "調整力市場におけるネガワット取引とエネルギー利用効率", RIETI Discussion Paper Series 18-J-003, pp.1-13, 2017
- Norhafiz Bin Salim, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Optimal Reactive Power Control of Inverter-based Distributed Generator for Voltage Stability Insight using Particle Swarm Optimization", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 137, No. 5, pp.392-404, 2017
- Norhafiz Bin Salim, Hossam Aboelsoud Eid Elhassaneen, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Load Frequency Control of Two-Area Network using Renewable Energy Resources and Battery Energy Storage System", Journal of Electrical Systems, 13(2): 348-365, 2017
- Hyangryul Bae, T. Tsuji, T. Oyama, and K. Uchida, "Frequency control in power system based on balancing market considering wind power forecasting error", 6th International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER Renewable Energy Resource Impact (ICCEP), ICCEP.2017.8004843, 2017
- Bo Jie, Hyangryul Bae, T. Tsuji, "Combined Modelling of Frequency Regulation of Power Systems with Renewable Energy Sources Based on Control Mechanism and Balancing Market", Proc. of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE), S6-1-06, 2017

5. 研究活動の課題と展望

昨年度に引き続き、電力自由化を前提として動的ゲーム理論並びに最適制御理論を基礎とした統合メカニズムの理論については引き続き検討を進める予定である。市場モデルにおける需要者及び供給者の戦略振る舞いに抗して社会厚生を実現する統合メカニズム、ネットワークの不確かさに対処してアンシラリーサービスを実現する統合メカニズムの創生が課題である。そのための、メカニズムデザインの方法、契約ベースの方法、提携・離脱など組織変更の分析、新たなプライシングの方法、並びにそれらの動的システムへの展開を検討し、動的統合メカニズム理論の更なる展開と体系化を目指す。それらの成果を組み込んだ電力市場シミュレータ開発にも精力的に取り組む。また、経済的評価・分析に重点をおいて、電力市場モデル、および消費者行動モデルについて各種パラメータを推計し、定量的な観点からも政策立案に資する分析の実施を目指す。