

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
(理工学術院 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

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、昨年度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、経済分野で長年取り組ま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、各エージェントの入力を考慮した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統合に関する理論的手法まで世界で初めて提案し、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、従来検討されてきたリスク中立型エージェント・ユーティリティの場合だけでなく、新たにリスク回避型エージェント・ユーティリティの場合での定式化にも成功した。

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。まず、早いダイナミクスとして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問題を定式化した。特に、この問題は有限時間微分ゲームの解として解析的に導出できることを示し、実際の機器に基づく数値を用いたシミュレーションを通して提案手法の有効性を検証した。つぎに、物理モデルや意思決定モデルが明確ではない、または共有できない遅いダイナミクスである電力スポット・先物併合市場において、各電力供給家戦略の学習を解析した。本年度はこれまでの研究では扱われていない均衡解に至るまでの学習過程に注目し、数値シミュレーションを通じた現象解析を行った。本年度はこれまでの研究グループ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
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、昨年度より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開始している。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ている。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、その有用性をシミュレーションにより検証している。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。

電力利用に関する消費者行動を検証するために、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。電力価格とは別に、他の電力消費者の利用状況について情報を与えることが、電力消費行動（節電行動）へ与える影響を確認した。今後、本年度の実験結果を分析し、消費者への情報の与え方と消費行動の関連を明らかにすることで、スマートメータを活用した制度、システムの構築に有用な知見を得ることが期待できる。市場モデルの分析においては、ネガワット取引市場のモデルを構築し、とくに需要者側のエネルギー利用効率がネガワット供給曲線に与える影響を示したうえで、ネガワット市場の需給均衡解を導出した。今後、得られた需給均衡をもとに社会厚生分析を行い、最適な市場設計について政策的インプリケーションを導くことを目指す。

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	(理工学研究所 次席研究員)
塚本幸辰	(理工学研究所 招聘研究員)	辻 隆男	(理工学研究所 招聘研究員)
澤田英司	(理工学研究所 招聘研究員)		

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, "A Control Strategy based on Fuzzy Logic for Three-phase Grid-connected Photovoltaic System with Supporting Grid-frequency Regulation," *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 96-103, 2016
- Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, "A Two-level Control Strategy with Fuzzy Logic for Large-scale Photovoltaic Farms to Support Grid Frequency Regulation," *Control Engineering Practice*, vol. 59, pp. 77-99, 2017
- Kenta Tanaka, Yukihide Kurakawa, Eiji Sawada, Ken-ichi Akao and Shunsuke Managi, "Energy conservation and risk of electric outage: A laboratory experimental study", *Journal of Energy Engineering*, F4016010, 2016.
- Eiji Sawada, "Effect of Electricity System Reform on Retail Electricity Price Increases in Japan," *Journal of Economic Structures*, 5: 11, 2016
- Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, "An Approximate Dynamic Integration Mechanism for LQ Power Networks with Multi-time Scale Structures," *Proceedings of The European Control Conference 2016*, pp. 202-209, 2016.
- Hai Nguyen-Thanh, Cuong Vo-Viet, Kenko Uchida, and Nguyen Gia Minh Thao, "A SFOC-based Scheme with PI-ANN Controller to Regulation of Output Powers and Reduction of Current Harmonics for DFIG under Unbalanced Voltage Dips," *Proceedings of SICE Annual Conference 2016*, pp. 452-459, 2016

- Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, "An Enhanced Feedback Linearization with Fuzzy Logic to Control the Active and Reactive Powers of Bidirectional Three-phase Grid-connected Renewable Energy Inverters," Proceedings of The 5th International Conference on Electrical Energy and Networks, 2017
- 松井駿, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, "選好を考慮したLQG電力需給ネットワークに対する動的出力統合メカニズムの設計," 計測自動制御学会論文集, vol. 52, no. 6, pp. 338-347, 2016
- 赤尾健一, 大沼あゆみ, 阪本浩章, "割引率は何を意味しどのように発展してきたか," 環境経済・政策研究, vol. 9, no. 2, pp. 1-20, 2016
- 大森智貴, 小出明, 辻隆男, 大山力, "スマートメータの通信機能を考慮した配電システムの分散型電圧分布制御方式," 電気学会論文誌B, vol. 136, no. 8, pp. 689-697, 2016
- 小出明, 辻隆男, 大山力, 合田忠弘, 小島康弘, 進士誉夫, 内田健康, Frédéric Magoulès, "センサ付区分開閉器の計測情報を活用したPCSの無効電力制御量の確率的推定手法," 電気学会論文誌B, vol. 136, no. 4, pp. 410-423, 2016
- 古林薫, 小出明, 辻隆男, 大山力, "スマートメータの通信機能を考慮した配電システムの無効電力プライシング方式," 電気学会論文誌B, vol. 136, no. 4, pp. 382-389, 2016

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。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。