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

価格を利用したエネルギー需給ネットワークの制御では、市場における価格決定に必要な情報として、エージェントのモデル情報及び各時刻でのエージェントの動作状態が入札される必要がある。しかしながら、入札情報により価格が決定されることを知るエージェントには、戦略的な偽り情報の入札により、自身の利得を向上させる誘因が生じる。利己的なエージェントによる戦略的情報操作の問題に対し、経済学の分野を中心に発展しているメカニズムデザイン理論の考えに着目したエネルギー需給ネットワークのための社会システムのデザインを提案している。この設計問題を LQG 制御問題の枠組みで定式化し、戦略的な情報操作がエージェントの利益を生まない社会システムのデザインが可能であることを明らかにした。またこの成果をベースにして、予測モデルを利用した制御系との融合、再生可能エネルギーの導入を想定した確率的外乱の考慮、エージェントの選好およびパラメータの不確かさに起因する特性変動の考慮、予算均衡性を達成する新たなメカニズムの提案などへ展開することに成功した。さらに、真の情報の報告を促す制御系を、各エージェントとユーティリティー間の交渉を許容するより実用的な制御系へと発展させるには、エージェントによる利己的な情報報告に関する考察が不可欠となるとの観点から、最適な利己的情報報告を特徴づけることにも成功している。一方で、エージェントのどのような戦略的報告に対しても一定のレベルを保証する最悪価格決定についても検討し、その決定法を与えた。

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のもとで、エネルギーの需要と供給のバランス成立を達成する統合化された解を実現するという観点に立ち、価格提示を利用し統合化された解への誘導を実現する動的ネットワークの運用法を提案した。本運用法は、マイクログリッドを想定した価格策定方策の高速化、大規模なネットワークで問題となる通信遅延を考慮した場合の価格策定方策の提案などへと展開され、構成される閉ループシステムの理論的な安定性も示されている。本年度は特に電力送電システムの需要・供給バランス実現問題に対する数値実験により本手法の有効性を検証した。

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。

経済の側面に重点をおいた研究では以下のような成果を得た。電力自由化市場のモデルを構築し、自由化がピークタイムおよびオフピークタイムの電力小売価格に与える影響について定性的な検証をおこなった。また電力消費における非価格的要因の影響に関して、集団効果を含む電力消費モデルを構築し、平均的な電力消費に関する情報の提供が個々の消費者のピーク時間帯、オフピーク時間帯の電力消費量、および電力市場価格に与える影響についてシミュレーションを行った。その結果、消費者のタイプ毎に適切に情報を与えることにより、電力市場の効率性を改善する余地があることを示した。

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

- N. G. M. Thao and K. Uchida, "Active and Reactive Power Control Techniques based on Feedback Linearization and Fuzzy Logic for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters", Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 5, pp. 1522–1546, September 2015 (Early published online: 10 September 2014)
- 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, "不確かな情報環境における制約付きエネルギー需要ネットワークの AGV メカニズムによる統合", システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 8, pp. 356-365, Aug., 2015
- S. Matsui, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, "A Dynamic Output Integration Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters", Proc. of the 10th Asian Control Conference, Paper ID 1570077573, 2015
- T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, "Optimal Bidding and Worst Case Pricing under Dynamic Integration Mechanism for LQG Power Networks", Proc. of the 2015 European Control Conference, pp. 3315-3320, 2015
- K. Hirata, J. P. Hespanha and K. Uchida, "Real-time Pricing and Distributed Decision Makings Leading to Optimal Power Flow of Power Grids", Proceedings of the 2015 American Control Conference, pp.2284-2291, 2015
- Y. Okajima, T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, "Integration of Day-ahead Energy Market Using VCG Type Mechanism under Equality and Inequality Constraints", Proc. of the 2015 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 187-194, 2015

- N. G. M. Thao and K. Uchida, “A Novel Fuzzy-based Control Strategy for Grid-connected Large-scale Solar Farm with Supporting the Grid-Frequency Regulation”, Proceeding of 2015 Asian Control Conference (ASCC 2015), pp. 224-231, Kota Kinabalu, Malaysia, 31st May - 3rd June 2015
- N. G. M. Thao and K. 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, April 2016) Early published online: 11 June 2015
- 向佑樹, 小出明, 辻隆男, 大山力, 内田健康, “電圧制御問題における経済合理性を考慮した無効電力買取制度のリアルタイム運用手法”, 電気学会論文誌 B, 135 巻, 7 号, pp. 437-445, 2015
- Takao Tsuji, Frédéric Magoulès, Kenko Uchida, Tsutomu Oyama, “A Partitioning Technique for a Waveform Relaxation Method Using Eigenvectors in the Transient Stability Analysis of Power Systems”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 30, Issue 6, pp. 2867-2879, 2015

4.2 招待講演

- 内田健康, 次世代エネルギー需給システムの構築に向けた経済・物理モデルに基づく統合メカニズム, 豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第 6 回シンポジウム, 豊田工業大学, 名古屋, 2015 年 9 月 1 日

5. 研究活動の課題と展望

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必要がある。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。