

「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の  
創出と融合展開」

H25 年度  
実績報告

平成 24 年度採択研究代表者

内田健康

早稲田大学理工学術院  
教授

エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を  
公共利益に統合する最適化メカニズム

## § 1. 研究実施体制

### (1)「統合メカニズム」グループ

- ① 研究代表者:内田 健康 (早稲田大学理工学術院、教授)
- ② 研究項目
  - ・エネルギー需給システムのモデリングと統合メカニズム

### (2)「分散制御」グループ

- ① 主たる共同研究者:滑川 徹 (慶應義塾大学理工学部、准教授)
- ② 研究項目
  - ・電力市場における最適価格設定法と需給制御
  - ・電力ネットワークにおける分散的モニタリング
  - ・リアルタイムプライシングによる電力網の系統周波数制御

### (3)「実時間最適化」グループ

- ① 主たる共同研究者:大塚 敏之 (京都大学大学院情報学研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・統合メカニズム構築のための実時間最適化
  - ・問題設定の特徴を利用した解析・計算方法

## § 2. 研究実施の概要

本研究では、全研究期間を通して課題を、課題1:モデル構築、課題2:変動と不確かさ、課題3:分散制御設計、課題4:統合メカニズム検討、課題5:高速最適化計算、という五つに分けて研究を進めている。本年度は、これらの課題に対して以下のように研究を実施した。

〈モデル構築〉エネルギー需給ネットワークを解析・設計するためには、環境、社会・経済、並びに物理という分野の異なるディシプリンを共役するモデルの構築が不可欠である。本年度は、システム規模や分解能、並びにエージェントのダイナミクスに留意したモデル化、ユーティリティーの数理モデル化、マルチエージェントネットワークとしてのモデル化、エージェント個々の利益及び公共の利益の定量化に取り組んだ。特に、エネルギー価格によってエージェントを制御するというモデルの妥当性を検証するために、経済実験を実施した。経済の視点からは、電力需給に関する制度モデルを用いた理論的分析も行った。

〈変動と不確かさ〉エネルギー需給ネットワークにおける変動・不確かさを、エージェント間の競争的關係(すなわち不完全情報環境)に由来するものと環境変動に起因するものに分けて検討した。エージェントの不完全情報環境に関しては、不完全ゲームとしてモデル化し、ロバスト制御設計や確率的モデルを加えた設計による不確かさに対処できる最適な統合メカニズムの基礎を与えた。再生可能エネルギーの導入に伴う環境変動に起因する不確かさに対しても、物理システムの分布を限定しない確率的モデリングを検討し、その対処法を検討した。

〈分散制御設計〉具体的なモデルに対して大規模最適制御理論やゲーム理論を用いて分散制御設計を検討した。まず、利己的に振舞うエージェントと社会の利益を追求するユーティリティーからなるネットワークに対する分散制御方策とプライシング設計の枠組において、電力ネットワークの動的モデルに対する分散的な最適プライシング設計と、環境の変動と不確かさを考慮した分散型の周波数制御の構成を提案した。また、次世代電力ネットワーク構築を念頭に、分散的モニタリング手法や再生可能エネルギー発電システム単体のインテリジェント制御を試みた。

〈統合メカニズム検討〉構築したモデルに基づいて統合メカニズムの可能性を検討した。スポットプライシングと動的モデルを必要とするリアルタイムプライシングにタイムスケールで階層化し、それぞれの階層において、完全情報環境におけるプライシングによる統合化、不完全情報環境(エージェントの戦略的振る舞いを許す環境)におけるメカニズムデザインの方法、特に個人合理性を保証するメカニズムデザインの方法を提案した。また、マルチエージェントモデルを用いて、電力プライシング手法の検討や合意形成の基礎研究も行った。

〈高速最適化計算〉制御のより良い応答を実時間最適化によって実現するために、モデルに組み込むべき要素と評価関数に組み込むべきコストを調整する方法を検討し、逆最適性(逆問題)に基づく方法を提案した。また、最適化の対象となる非線形システムの構造を実時間最適化に適した形へ変換するための基礎研究を行った。電力システムにおける電力取引に焦点を絞った研究として、電力取引量の上限を高速に算定する新しい手法を提案した。

本研究チームは三つの研究グループ／サブグループの複合構造を持っている。一つの研究目標をもったチームとして機能するように研究打ち合わせを定期的に行い、国内外の研究グループとの共同研究やワークショップの共同開催を積極的に企画し、チームの研究成果の進展と研究組織の一体化を計った。

### § 3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

- A-1 岡島佑介, 平田研二, 内田健康, “不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの VCG メカニズムによる統合”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1186-1195, 2013 (DOI:NA)
- A-2 河又啓, 辻隆男, 大山力, “再生可能エネルギーを含むマイクログリッドにおける自律分散型電力取引支援システムの検討”, 電気学会論文誌 C, Vol. 133, No. 9, pp. 1670-1679, 2013 (DOI: 10.1541/ieejciss.133.1670)
- A-3 Yutaka Tsubota, Genki Baba, Kenko Uchida, Toru Jintsugawa and Yosuke Nakanishi, “Reference Governor for Output Smoothing of Renewable Energy Generation”, Proc. of the 9th Asian Control Conference, 2013 (DOI:10.1109/ASCC.2013.6606055)
- A-4 Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, “Control the Photovoltaic Grid-Connected System Using Fuzzy Logic and Backstepping Approach”, Proc. of the 9th Asian Control Conference, 2013 (DOI: 10.1109/ASCC.2013.6606123)
- A-5 MingHui Wang and Kenko Uchida, “Interval Consensus Problem in Multi-Agent Systems with Time-Delay”, Proc. of the 32nd Chinese Control Conference, pp. 7204-7209, 2013 (DOI:NA)
- A-6 Yusuke Okajima, Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “Real Time Pricing and Pivot Mechanism for LQG Power Networks”, Proc. of the 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 495-500, 2013 (DOI:10.1109/CCA.2013.6662819)
- A-7 Truc Pham-Dinh, Hai Nguyen-Thanh, Kenko Uchida and Nguyen Gia Minh Thao, “Comparison between Modifications of SFOC and DPC in Control of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator under Unbalanced Voltage Dip”, Proc. of the SICE Annual Conference 2013, pp. 2581-2588, 2013 (DOI:NA)
- A-8 Yusuke Okajima, Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “A Dynamic Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters and Pricing Delay”, Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2384-2390, 2013 (DOI:10.1109/CDC.2013.6760237)
- A-9 MingHui Wang and Kenko Uchida, “Interval Consensus Problem of Multi-Agent Systems in Accordance with Switching Protocol”, International Journal of Systems Science, Online Publication, 2014 (DOI:10.1080/00207721.2014.901581)
- A-10 Nguyen Gia Minh Thao, Kenko Uchida and Nam Nguyen-Quang, “An Improved Incremental Conductance-Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Fuzzy Logic for Photovoltaic Systems”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 7, No. 2, pp. 122-131, 2014 (DOI: 10.9746/jcmsi.7.122)
- A-11 Kenji Hirata, Joao Pedro Hespanha and Kenko Uchida, “Real-time Pricing Leading to Optimal Operation under Distributed Decision Makings”, Proc. of the 2014 American Control Conference, 2014 (to appear)

A-12 Ken-Ichi Akao and Shunsuke Managi, “A Tradable Permit System in an Intertemporal Economy”, *Environmental and Resource Economics*, Vol. 55, No. 3, pp. 309–336, 2013 (DOI: 10.1007/s10640-012-9628-5)

・昨年度の報告書に on line publication として記載した文献が印刷されたもの

A-13 Yukihide Kurakawa, “The Optimal Vertical Structure in the Electricity Industry When the Incumbent Has a Cost Advantage”, *Energy Policy*, Vol. 63, pp. 622–627, 2013 (DOI: 10.1016/j.enpol.2013.08.083)

A-14 Hyangryul Bae, Takao Tsuji and Tsutomu Oyama, “A Study on Inverter Control of Distributed Generators in Small-Scale Power Systems in Emergency”, *Proc. of the International Conference on Electrical Engineering*, FP-0610, 2013 (DOI:NA)

A-15 Akira Koide, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama and Frédéric Magoulès, “A State Estimation Method for Reactive Power Control by DGs in Distribution Systems Based on Pseudo Inverse Matrix”, *Proc. of the CIGRE SC C6 COLLOQUIM - Distribution Systems and Dispersed Generation*, S1-7, 2013 (DOI:NA)

B-1 大久保徳雄, 佐藤隆太郎, 滑川徹, “双対分解とゲーム理論に基づくリアルタイムプライシングによる電力網の系統周波数制御”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 49, No. 10, pp. 961–968, 2013 (DOI:NA)

B-2 宮野雄基, 滑川徹, “蓄電システムを含めた電力市場における最適価格設定法と需給制御” *電気学会論文誌 C*, Vol. 133, No. 10, pp. 1855–1863, 2013 (DOI:10.1541/ieejeiss.133.1855)

B-3 藤田佑樹, 大川佳寛, 滑川徹, “状態故障評価行列を用いた電力ネットワークにおけるサイバー攻撃・故障の診断” *計測自動制御学会論文集*, Vol. 49, No. 12, pp. 1131–1138, 2013 (DOI:NA)

B-4 Yuki Fujita, Toru Namerikawa and Kenko Uchida, “Cyber Attack Detection and Faults Diagnosis in Power Networks by Using State Fault Diagnosis Matrix”, *Proc. of the 12th European Control Conference*, pp. 398–403, 2013 (DOI:NA)

B-5 Yuki Miyano and Toru Namerikawa, “Optimal Pricing Algorithm Based on Steepest Descent Method for Electricity Market with Battery and Accumulator”, *Proc. of the 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 73–76, 2013 (DOI:NA)

B-6 Christian Fogelberg and Toru Namerikawa, “Distributed Model Predictive Control of Load Frequency of Power Network”, *Proc. of the SICE Annual Conference 2013*, pp. 2604–2609, 2013 (DOI:NA)

C-1 河野佑, 大塚敏之, “有理型非線形時変システムに対する伝達関数行列の代数的性質”, *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 26, No. 6, pp. 185–192, 2013 (DOI:NA)

C-2 Fatima Tahir and Toshiyuki Ohtsuka, “Tuning of Performance Index in Nonlinear Model Predictive Control by the Inverse Linear Quadratic Regulator Design Method”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 6, pp. 387–395, 2013 (DOI:10.9746/jcmsi.6.387)

C-3 Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Simple Sufficient Conditions for Reachability of

Discrete-Time Polynomial Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 58, No. 12, pp. 3203–3206, 2013 (DOI:10.1016/j.automatica.2013.01.020)

C-4 Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Sufficiency of a Necessary Condition for Local Observability of Discrete-Time Polynomial Systems”, Proc. of the 12th European Control Conference, pp. 1722–1727, 2013 (DOI:NA)

C-5 Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Observability Analysis of Nonlinear Systems Using Pseudo-Linear Transformation”, Proc. of the 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, pp. 606–611, 2013 (DOI:NA)

C-6 Fatima Tahir, Toshiyuki Ohtsuka and Tielong Shen, “Tuning of Nonlinear Model Predictive Controller for the Speed Control of Spark Ignition Engines”, Proc. of the 2013 CACS International Automatic Control Conference, Paper ID #1007, 2013 (DOI:NA)

C-7 Tomoaki Hashimoto, “Probabilistic Constrained Model Predictive Control for Linear Discrete-time Systems with Additive Stochastic Disturbances”, Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6434–6439, 2013 (DOI:10.1109/CDC.2013.6760907)

### **(3-2) 知財出願**

①特許出願件数(国内 0 件)

②CREST 研究機関累積件数(国内 0 件)