

「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」

H24 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 (慶応義塾大学理工学部、准教授)

② 研究項目

・分散制御と統合メカニズム

(3) 実時間最適化グループ

① 主たる共同研究者: 大塚 敏之 (大阪大学大学院基礎工学研究科、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

§2. 研究実施内容

本研究は、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:高速最適化計算を、全研究期間を通した課題としている。H24年度は課題1および課題2の検討から開始し、電力需給システムの工学的メカニズムとモデリング、そして電力供給に関する経済問題について、基礎的な知識を得ること、またそれを研究チームで共有することを目的として研究を進めた。チームメンバーで分担して、環境・社会・経済及び物理・工学システム分野の視点から既存の電力システムの実際及びエネルギー需給システムの理論・モデリング、さらには解決すべき課題について調査および文献サーベイを行い、月1回のペースで報告・検討会を行った。その結果、次年度の課題に向けてチーム共有の基礎的な知見を得ることができた。本チームを構成する三つのグループを中心に実施された研究の具体的内容を以下に記す。

「統合メカニズム」グループでは、環境・経済・社会システムから、物理・工学システムから、さらに数理システムからの統合メカニズムへのアプローチを展開した。環境・経済・社会システムからのアプローチでは、工学系基本テキスト(Schweppe et al., 1988)の理解、電力オークションに関わるゲーム理論の文献サーベイ、需要者のプライスレスポンスに関する社会実験およびその研究動向に関する調査を行った。物理・工学システムからのアプローチでは、特に需要者に近い配電システムに着目し、逆潮流に起因した電圧管理問題への対策を検討した。特に大量の太陽光発電を含む配電システムの電圧分布を効率的に管理するために、限られた計測情報から分散型電源の制御状態を推定する手法を検討した。また配電システム側の設備構成のあり方に応じて、電力供給の信頼度が増減すると考えられるため、その解析技術に関しても検討した。数理システムからのアプローチでは、既存の電力システムの数理モデルとネットワークの構成要素としての需要者の数理モデルに関するサーベイを行い、次世代エネルギー需給システムのモデリングのための基礎知識を収集・整理した。その過程で、定常運転状態を表わすモデルとその定常運転状態の近傍での線形化モデルに基づく二つの方向でのモデリングと統合メカニズムの検討を行った。定常運転状態については、個々のエージェントが選択する最適運転状態を需要・供給バランスを満たす公共の最適解へと導く価格策定方策の提案と、この制御系の安定性解析法を導いた。一方、定常運転状態の回りでの線形化モデルを用いて、より早い変動要因を含むネットワークの最適統合メカニズムを目標に検討を進めた。需要者の離散時間系の線形モデルを用いたメカニズムデザインの有効性を明らかにすると共に、LQG制御理論に基づく連続時間系のリアルタイムプライシングとメカニズムデザインの可能性について一定の成果を得た。同時に次年度に向けた課題を抽出することができた。

「分散制御」グループでは、三つの具体的な課題を検討した。(1) 分散制御による電力ネットワークの系統周波数制御では、分散型電源を導入した電力ネットワークに対して、直線探索付き反復勾配法に基づく系統周波数制御を提案した。風力発電、蓄電池群、ヒートポンプ群等の分散型電源を導入した電力ネットワークの負荷周波数制御(LFC)に対して提案制御則を適用し、従来制御則に対し評価関数の低減化や周波数変動の抑制など制御性能の向上が達成されていることを

シミュレーションで示した。(2) リアルタイム料金設定による分散的負荷平準化では、発電量平準化を目的とした前日市場における価格設計問題を扱った。まず需要者、供給者、電力市場の3種類の参加者を想定した前日市場のモデル設計を行った。最急降下法を基に分散的に解くアルゴリズムを提案し、シミュレーションで発電量平準化が行われること、需給量が一致することを示した。続いて上記のモデルにバッテリーや蓄電所を加えたモデル設計を行った。最急降下法を基にしたアルゴリズムを提案し、蓄電システムの導入により社会全体の利益が導入前に比べ増加することを確認し、シミュレーションで発電量平準化が行われること、需給量が一致すること、そして社会全体の利益が増大することを示した。(3) リアルタイムプライシングによる電力網の分散型系統周波数制御では、電力市場に参加する需要者、供給者といったプレイヤーが利己的にふるまうことを前提に、電力網の系統周波数制御問題を扱い、その目的を達成するためのリアルタイムプライシング手法を提案した。従来の手法においては制約条件を考慮した分散化は行われていなかったが、本提案手法ではそれを可能にした。また、負荷平準化を目指した大幅な価格更新を行っても、旧来市場の固定価格で得られるはずの利益と比較して、市場に参加するプレイヤーにとって損とはならない一定以上の利益を保証できないという従来手法の問題を克服し、本提案手法はそのようなプライシング手法が設計可能であることも併せて示した。

「実時間最適化」グループでは、実時間最適化の初期検討として、簡単なモデルに対する小規模な問題を定式化し、数値シミュレーションを行った。具体的には、複数地域のそれぞれを代表する需要者と供給者のモデルを設定し、それらに対して電力価格を提示するユーティリティー(公益事業体)による需給バランスと負荷周波数変動の制御を考えた。需要者と供給者は、それぞれ効用関数とコスト関数に基づいて電力の消費量と供給量を決定するとし、さらに、各地域の発電機は、需給バランスと地域間の送電量とに依存した非線形ダイナミクスに支配されるとした。そして、需要者と供給者の総利益を最大化し、同時に発電機の相边角・相边角速度と需給差を最小化する評価関数を設定した。特に、各時刻の状態に基づく数値的最適化によってフィードバック制御を実現するために、つねに一定時間未来までの応答を最適化するモデル予測制御問題を考えた。非線形モデル予測制御に対しては、繰り返し探索を必要としない効率的な最適化アルゴリズムが当グループによって開発されており、ある程度の規模の問題は実時間で解けるようになっている。

今回、10地域の電力ネットワークを想定して数値シミュレーションを行ったところ、ユーティリティーによる実時間の価格提示によって、発電機の周波数変動を抑制しつつ需給バランスが達成できた。また、モデル予測制御における1回の制御入力(電力価格)更新にかかる計算時間は0.5msであった。原理的には、この計算時間がサンプリング周期(電力価格の更新周期)より大きければフィードバック制御が実現できることになる。したがって、今後、モデルが大幅に複雑化・大規模化したとしても、実時間最適化の実現可能性は十分にある。また、最適化アルゴリズムの改良やモデル低次元化を進めることで、扱える問題のクラスはさらに拓がることになる。本研究成果に関しては、2013年5月開催のシステム制御情報学会研究発表講演会で発表予定である。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Ken-Ichi Akao, Tapan Mitra and Gerhard Sorger, “Some rationalizability results for dynamic games”, *International Journal of Economic Theory*, Vol. 8, No. 4, pp. 361-379, 2012 (DOI: 10.1111/j.1742-7363.2012.00195.x)
2. Ken-Ichi Akao and Gerhard Sorger, “On the sustainability of a common property resource: An implication from dynamic game theory”, *Institute for Research in Contemporary Political and Economic Affairs Working Paper Series 1201*, Waseda University, No. 1201, pp. 1-15, 2012
3. Ken-Ichi Akao, “Preference constraint for sustainable development”, *Environmental Economics and Policy Studies*, Online publication, 2012 (DOI: 10.1007/s10018-012-0053-3)
4. Ken-Ichi Akao and Shunsuke Managi, “A tradable permit system in an intertemporal economy”, *Environmental and Resource Economics*, Online publication, 2013 (DOI: 10.1007/s10640-012-9628-5)
5. Takao Tsuji, “A Study on Power Supply Reliability of Microgrid with Renewable Energy Considering Dynamic Behavior”, *Proc. of the International Conference on Mechatronics (REM)*, D3-72, 2013
6. 加藤 太一郎, 祓川 悠, 滑川 徹, “直線探索付き反復勾配法を用いた分散制御による電力ネットワークの系統周波数制御”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 49, No. 2, pp. 222-228, 2013
7. MingHui Wang, Kenko Uchida, “Consensus Problem in Multi-Agent Systems with Communication Channel Constraint on Signal Amplitude”, *The SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 1, pp. 7-13, 2013
8. Yutaka Tsubota, Genki Baba, Kenko Uchida, Toru Jintsugawa, Yosuke Nakanishi, “Reference Governor for Output Smoothing of Renewable Energy Generation”, *Proc. of 9th Asian Control Conference*, 2013 (accepted)

9. Nguyen Gia Minh Thao, Kenko Uchida, "Control The Photovoltaic Grid-Connected System Using Fuzzy Logic and Backstepping Approach", Proc. of 9th Asian Control Conference, 2013 (accepted)