

将来電力ネットワークにおける分散型リアルタイムプライシングの提案とエージェントシミュレーションによる検証

Multi-Agent Simulation of Distributed Real-Time Pricing System for Future Power Grid

三浦 政司 和田 一真 櫻間 一徳 (鳥取大学)

Masashi Miura, Kazuma Wada, and Kazunori Sakurama (Tottori University)

Abstract: Our research proposed the new distributed optimization method for RTP. It is based on negotiations between players (consumers, suppliers and distributors) through information networks. And we developed a graphical and scalable multi-agent simulator for RTP for further investigations. This paper introduces our approach and simulator briefly.

背景

風力発電や太陽光発電などの自然エネルギー利用の拡大に向けた大きな問題点として供給量の不安定性が挙げられる。自然エネルギーによる発電量は天候などの条件によって大きく変化し、その予測が難しい。一方で、電力系統内の周波数を保つために、系統内での供給量と需要量(消費量)が一致している必要がある。そこで、将来の自然エネルギー利用の割合が大きい電力網においては、供給量予測が難しいという条件下でいかにして供給量と需要量をマッチングさせるかが課題となる。この課題に対する解決策として、実時間における価格調整により供給量と需要量のバランスをとるリアルタイムプライシング(RTP)が有力視されており^[1]、発表者らのグループではRTPを具現化するための設計原理の確立に取り組んでいる。

提案

本研究では一般的なRTP研究において前提とされている集中的な処理を必要とせず、各需要供給家がローカルな情報のみを用いて適切な価格を導出できるような分散型のRTPシステムを提案している^{[2][3]}。分散的なRTPを実現することができれば、スケラビリティやリスク分散などの観点で大きなメリットがある^[4]。また、本研究では地域または電力事業者ごとに分割されたサブネットワークをもつ電力網を想定し、互いに電力を融通しながらサブネットワークごとに需要供給バランスをとるという問題を設定している。図1はこのような電力ネットワークの一例であり、 p_{ri} は各サブネットワーク内の需要供給家エージェント、 d_i はサブネットワーク間の送電家エージェントを表している。このような電力網は電力自由化が進んだ将来の社会に対応している。

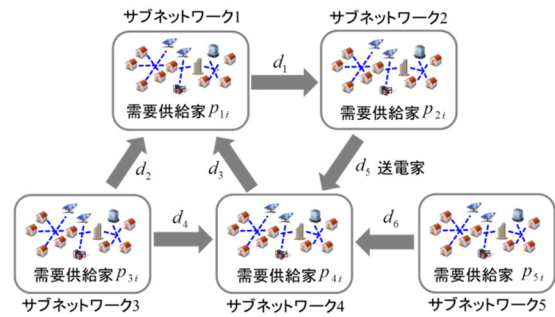


図1 サブネットワークに分割された電力網

モデル

本研究ではRTPの問題を制約付き最適化問題として扱い、分散協調制御の理論を応用した分散型の価格調整則によるRTPを提案している。また、提案する価格調整において必要となる情報交換に際して、情報セキュリティを考慮した情報交換手法の提案もしている。以下に本研究における問題設定および提案する調整則のモデルを示す。

電力ネットワーク

電力ネットワークのモデルは、サブネットワーク間を結ぶ送電家ネットワークとプレイヤー同士を結ぶ情報ネットワークから構成される。送電家ネットワークは図1の灰色の矢印に相当し、送電家によって電気が送電される。情報ネットワークは図1の青点線のようにプレイヤー同士を結んでおり、情報ネットワーク上で隣接するプレイヤーが相互に情報を交換することで適切な電力価格を分散的に導出する。

最適化

RTPの問題を式(1)で示されるような最適化問題としてモデル化する。

$$P: \begin{cases} \text{maximize} & F(x) \\ \text{subject to} & G(x) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで決定変数 x はプレイヤーの需要供給量(または送電量)を並べたベクトルであり, $F(x)$ は全てのエージェントの効用の和である. 効用関数は所望の需要供給量(送電量)において最大値をとる, 上に凸な関数とする. また, $G(x)$ は各サブネットワーク内の総供給量と総需要量の差を成分とするベクトルであり, $G(x)=0$ は全てのサブネットワークにおいて供給量と需要量が一致しているという制約を表す.

プレイヤー行動

各プレイヤーは, 式(2)に示すように, 限界効用が価格と釣り合うまで需要供給量(送電量)を変化させる. ここで U は各プレイヤーの効用関数, λ_r はサブネットワーク r における価格, 添字 ri はサブネットワーク r の i 番目のプレイヤーを表す. k と s はそれぞれプレイヤー行動のステップ数と価格調整のステップ数を表し, α は適当な正の定数である.

$$x_{ri}[k+1] = x_{ri}[k] + \alpha \left(\frac{\partial U_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}[k]) + \lambda_r^{[s]} \right) \quad (2)$$

価格 λ_r を式(3)に示すような調整則で更新すれば, ちょうどラグランジュの未定乗数法で(1)の問題を解くアルゴリズムと等しくなり, 制約を満たしつつ目的関数を最大化することができる. なお, β は適当な正の係数であり, 適切に選ばないと価格更新が収束しない場合がある.

$$\lambda_r^{[s+1]} = \lambda_r^{[s]} - \beta G_r(x^{[s+1]}) \quad (3)$$

ここで, 式(3)の更新則では, グローバルな情報である $G_r(x^{[s+1]})$ を必要としており, 分散的ではない. そこで本研究では, 協調分散制御における平均合意プロトコルを応用した式(4)に示す方法で各プレイヤーが適切な推定価格 $\hat{\lambda}_i$ を導出するような価格調整則を提案する. θ_i は推定のための状態変数, h は繰り返し計算のステップ数, ε は適当な定数である. また, \mathcal{N}_i はプレイヤー i の隣接集合である.

$$\begin{cases} \theta_i[0] = \hat{\lambda}_i^{[s]} - c x_i^{[s+1]} \\ \theta_i[h+1] = \theta_i[h] - \varepsilon \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\theta_i[h] - \theta_j[h]) \\ \hat{\lambda}_i^{[s+1]} = \lim_{h \rightarrow \infty} \theta_i[h] \end{cases} \quad (4)$$

式(4)において, 状態変数の初期値 $\theta_i[0]$ は各プレイヤーの需要供給量(送電量)の情報を含むが, これはプライバシー情報であり, 隣接プレイヤーと交換するのは情報セキュリティの観点から望ましくない. そこで, セキュリティを考慮した情報交換の手法として, 式(4)第一式における x_i を式(5)にしたがってマスキングされた値 \bar{x}_i に置き換える. ここで γ_{ij} は乱数を用いて生成されるランダムな数であり, ϕ はマスキングノイズのスケールを表す正の定数である.

$$\bar{x}_i = x_i - \phi \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \gamma_{ij} + \phi \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \gamma_{ji}$$

シミュレーション

本研究で提案する分散型 RTP の有効性を確認し, 様々な条件下でのシステムの振る舞いを詳細に調べるために, エージェントシミュレーションプラットフォーム「artiso」を用いたシミュレータを開発した. 図2のシミュレータの動作画面を示す.

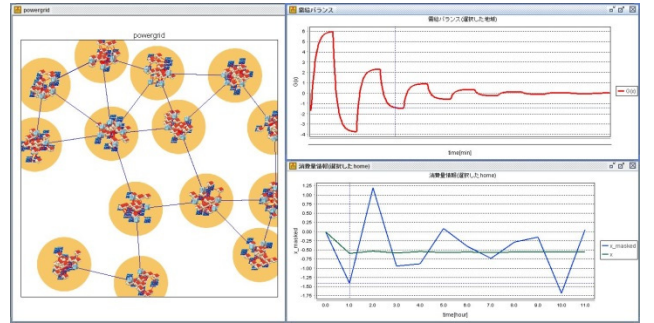


図2 シミュレーションの動作画面

図2にはサブネットワーク数14, プレイヤーエージェント数420の条件下で行ったシミュレーション結果が表示されている. 右上の赤線グラフはあるサブネットワークにおける総供給量と総需要量の差 (G_r) の時系列, 右下のグラフはあるプレイヤーの需要供給量 (x_i ・緑線) とマスキングされた値 (\bar{x}_i ・青線) の時系列を示しており, サブネットワーク内の需給バランスをとりつつ, 情報セキュリティを確保できていることがわかる. このように, エージェントシミュレーションによって本研究の提案の有効性を検証することができた.

謝辞

本研究の一部は, JST CREST の助成を受けた. 記して, 謝意を表したい.

参考文献

- [1] J. Momoh, “Smart Grid -Fundamentals of Design and Analysis,” Wiley-IEEE Press 2012
- [2] M. Miura, Y. Tokunaga and K. Sakurama, “Graphical and Scalable Multi-Agent Simulator for Real-time Pricing in Electric Power Grid” The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.399-404, 2015
- [3] K. Sakurama and M. Miura, “Complete Distributed Optimization with Constraints on Networked Multi-Agent Systems,” the 14th European Control Conference, pp.634-639, 2015
- [4] D. P. Bertekas, J. N. Tsitsiklis, “PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTATION,” Athena Scientific, 1997