

電力ネットワークにおける需要供給マッチングのための分散型リアルタイムプライシング

三浦 政司（鳥取大学）

1 背景・目的

エネルギー不足，化石燃料の価格高騰，原子力発電所の安全性問題など，エネルギーに関する諸問題への関心が世界中で高まる中，風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの導入が積極的に進められている。自然エネルギー利用の大きな問題点の一つは，供給量の不安定性である。自然エネルギーによる供給量は天候等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り，解決のための様々な手法が提案・研究されている¹⁾。中でも，実時間における価格調整により消費量と供給量のバランスをとるリアルタイムプライシング(RTP)が注目を集めている²⁾。

リアルタイムプライシングの基本的な原理は，需要量が大きすぎるときは電力価格を上げることで需要量の抑制と供給量の増加を促し，供給量が大きすぎるときは電力価格を下げることで需要量の増加と供給量の抑制を促すというものである。すなわち，リアルタイムプライシングを伴う電力システムは，需給バランスを観測量，電力価格を制御入力とするフィードバック制御系とみなすことができる。この点に着目し，著者らの研究グループは，フィードバック制御理論に基づいてリアルタイムプライシングを具現化するための設計原理を構築する研究に取り組んでいる。特に本研究では，一般的なリアルタイムプライシング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システムを実現することを目指している。図1は集中型と分散型のリアルタイムプライシングの概念図で，赤い線が情報の流れを表している。分散的なリアルタイムプライシングを実現することができれば，集中型と比較してスケール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。

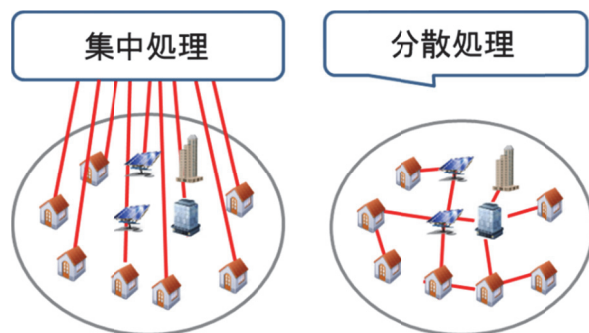


図1. 集中型RTPと分散型RTPにおける情報の流れ

さらに本研究では，分散型リアルタイムプライシングを適用する電力ネットワークとして，地域に分割された電力ネットワークを想定する。これは，各地域内に多数の需要供給家が存在し，地域ごとに需給バランスが求められる一方，送電家によって地域間で電力を融通しあうような電力ネットワークである。このような電力ネットワークは送電ロスの抑制や事故対応時の系統切断の容易性などの面で優れており，電力の自由化が進んだ将来の社会に対応している³⁾。

これまでに見てきたように，本研究の目的は，地域に分割された電力ネットワークにおいて，地域間で電力を融通しつつ地域ごとに供給量と需要量のバランスをとることができるような，分散型のリアルタイムプライシングを構築することである。今回は，*artisoc*を用いたMASによって本研究が提案するリアルタイムプライシングシステムをシミュレーションし，その有効性を確かめた。本稿では次の2節で本研究が提案する価格調整則の概要を示し，それを定式化した数理モデルを3節で説明する。さらに，3節で示した価格調整則を実際のリアルタイムプライシングに応用する際の問題点の一つである需要供給量予測について，4節で説明する。5節では3節と4節で説明したモデルに基づいて*artisoc*で構築したMASを紹介する。そして6節ではMASの結果の一例について紹介する。

2 提案概要

本研究ではリアルタイムプライシング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交渉型価格調整則によるリアルタイムプライシングを提案している。ここで対象となる需要家・供給家・送電家などのエージェントは，地域間を結ぶ送電ネットワークと各地域内のエージェント同士を結ぶ情報ネットワークを構成しているとする。図2はそのようなネットワークの一例であり，灰色の矢印が送電ネットワーク，青点線が情報ネットワークに相当する。

本研究ではまず，各エージェントの需要供給量および送電量を決定変数，エージェントの効用の和を目的関数，地域における需給量のバランスを制約条件としてリアルタイムプライシングを最適化問題として定式化する。そしてラグランジュの未定乗数法を分散化した手続きによって最適化が行われることを考える。各エージェントは自身の効用を大きくしようと行動するため，ラグランジュ乗数に応じて決定変数(需要供給量や送電量)を変化させる。このときのラグランジュ乗数は，電力価格に相当する。電力価格(ラグランジュ乗数)を適切な調整則で決定すれば，制約を満たしつつ目的関数を最大化することができる。ここで本研究では，分散協調制御理論を応用したアルゴリズムによって，各エージェントが情報ネットワーク上におけるローカルな情報のみを用いて適切な電力価格を推定する方法を提案する。次節では本研究が提案する手法を定式化し，シミュレーションを行うための数理モデルを示す。

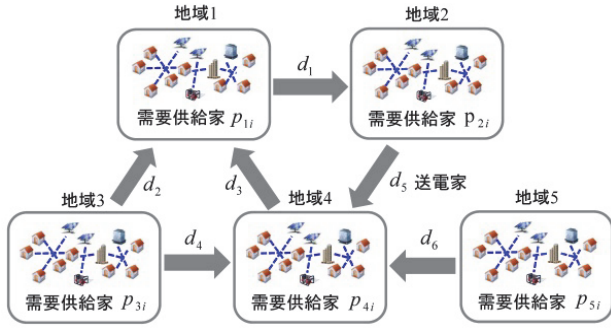


図2. 想定するネットワークの例

3 モデル

本節ではリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化問題として定式化し，エージェント行動や提案する価格調整則の数理モデルを示す．

3.1 電力ネットワーク

図2に示すような地域に分割されたネットワークを想定し，各地域における需要供給量がバランスをとるようリアルタイムプライシングにより価格を調整することを考える．地域数を $n \in \mathbb{N}$ とし，地域集合を $\mathcal{R} = \{1, 2, \dots, n\}$ とする．ある地域 $r \in \mathcal{R}$ には $n_r \in \mathbb{N}$ の需要供給家が含まれるとし，その集合を $\mathcal{P}_r = \{1, 2, \dots, n_r\}$ とする． \mathcal{P}_r に含まれる i 番目の需要供給家の需要量または供給量を $x_{ri} \in \mathbb{R}$ とする．ここで x_{ri} が負の場合は需要量を，正の場合は供給量を意味する．地域間にはある地域から別の地域へ電力を送電する送電家があり，その集合を $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, m\}$ ， $m \in \mathbb{N}$ とする．地域 $r \in \mathcal{R}$ を送電側とする送電家の集合を $\mathcal{D}_r^+ \subset \mathcal{D}$ とし，地域 $r \in \mathcal{R}$ を受電側とする送電家の集合を $\mathcal{D}_r^- \subset \mathcal{D}$ とする．また，送電家 $k \in \mathcal{D}$ の送電量を $\bar{x}_k \in \mathbb{R}$ とあらわす． $k \in \mathcal{D}_r^-$ のとき地域 r から見た送電家 k は消費量が \bar{x}_k の需要供給家と同等であり， $k \in \mathcal{D}_r^+$ のとき地域 r から見た送電家 k は供給量が \bar{x}_k の需要供給家と同等である．

3.2 最適化問題

2.1 節で示した電力ネットワークにおけるリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化問題として定式化する．需要供給家の需要供給量と送電家の送電量をまとめて決定変数として扱い，

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \in \mathbb{R}^v$$

と表す．ここで x_r は地域 $r \in \mathcal{R}$ に含まれる需要供給家の需要供給量で， $x_r = (x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rn_r})$ であり，決定変数ベクトルの次数は $v = \sum_{r=1}^n n_r + m$ である．目的関数を $F(x)$ ，制約関数を $G(x)$ とすると，最適化問題は

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

と表記できる．

目的関数 $F(x) \in \mathbb{R}$ は需要供給家と送電家の効用の和であり，それぞれの効用を $U_{ri}(x_{ri}) \in \mathbb{R}$ ， $\bar{U}_k(\bar{x}_k) \in \mathbb{R}$

と表記すると，

$$F(x) = \sum_{r=1}^n \left(\sum_{i=1}^{n_r} U_{ri}(x_{ri}) \right) + \sum_{k=1}^m \bar{U}_k(\bar{x}_k) \quad (2)$$

とかける．制約関数 $G(x) \in \mathbb{R}^n$ は需給バランスに相当し，その r 番目の要素 $G_r(x) \in \mathbb{R}$ は地域 r の供給量の総和から消費量の総和を差し引いた値であり，下記のように書ける．

$$G_r(x) = \sum_{i=1}^{n_r} x_{ri} + \sum_{k \in \mathcal{D}_r^+} \bar{x}_k - \sum_{k \in \mathcal{D}_r^-} \bar{x}_k \quad (3)$$

3.3 分散最適化アルゴリズム

式(1)を満たす最適解を $x^* \in \mathbb{R}^v$ とすると，時間 $t \in \mathcal{R}$ の経過に対して

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x^* \quad (4)$$

と収束するような，分散的な x の更新則を設計する．これまでの研究によって，ラグランジュの未定乗数を分散化した方法として以下に示すような更新則が得られている⁴⁾．

まず，ラグランジュの未定乗数

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{R}^n$$

を導入し，ラグランジアンを(5)のように定義する．

$$L(x, \lambda) = F(x) + \lambda^T G(x) \quad (5)$$

ここで未定乗数 λ は電力価格に相当し， r 番目の要素 $\lambda_r \in \mathbb{R}$ は地域 r における電力価格を示す．決定変数と未定乗数の更新則は，以下に示す手順Aのように与えられる．

<手順A>

A-i. 初期値 $x^{[0]} \in \mathbb{R}^v$ ， $\lambda^{[0]} \in \mathbb{R}^n$ と正数 α ， β を与え，ステップ $s = 0$ とする．

A-ii. ステップ s における初期値を $x_{ri}[0] = x_{ri}^{[s]}$ とし，

$$\begin{aligned} x_{ri}[k+1] &= x_{ri}[k] + \alpha \frac{\partial L}{\partial x_{ri}}(x[k], \lambda^{[s]}) \\ &= x_{ri}[k] + \alpha \left(\frac{\partial U_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}[k]) + \lambda_r^{[s]} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

に従って決定変数 x_{ri} の更新を行い，次のステップの初期値 $x_{ri}^{[s+1]}$ を

$$x_{ri}^{[s+1]} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_{ri}[k] \quad (7)$$

とする。

A-iii. 下記の式にしたがって λ の更新を行う。

$$\begin{aligned} \lambda_r^{[s+1]} &= \lambda_r^{[s]} - \beta \frac{\partial L}{\partial \lambda_r}(x^{[s+1]}, \lambda^{[s]}) \\ &= \lambda_r^{[s]} - \beta G_r(x^{[s+1]}) \end{aligned} \quad (8)$$

A-iv. ステップを s から $s+1$ に更新し、A-iiへ戻る。

ここで、式(6)は分散的であるのに対して、式(8)は地域全体の需給バランス情報である $G_r(x^{[s+1]})$ を用いているため、分散的とは言えない。そこで、地域内において構成されたエージェント(需要供給家および送電家)間の情報ネットワークを通して、各エージェントが分散的に λ の推定値に関する情報を交換することで λ を分散的に求めるような方法を提案する。これは、エージェント同士の交渉によって価格が調整される交渉型リアルタイムプライシングのプロセスに相当する。更新則は、地域 r に含まれる需要供給家 $i \in \mathcal{P}_r$ が持つ $\lambda_r^{[s]}$ の推定値を $\hat{\lambda}_{ri}^{[s]}$ 、推定のための状態変数を $\theta_{ri}[k]$ 、情報ネットワークにおけるエージェント i の隣接集合を \mathcal{N}_i とし、適当な正数 c 、 γ を用いて以下のように表される。

$$\begin{cases} \theta_{ri}[0] = \hat{\lambda}_{ri}^{[s]} - cx_{ri}^{[s+1]} \\ \theta_{ri}[k+1] = \theta_{ri}[k] - \gamma \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\theta_{ri}[k] - \theta_{rj}[k]) \\ \hat{\lambda}_{ri}^{[s+1]} = \lim_{k \rightarrow \infty} \theta_{ri}[k] \end{cases} \quad (9)$$

エージェントが送電家の場合も、同様の式で表すことができる。この更新則は各エージェントが自身の情報と隣接集合からの情報のみを用いる分散的なものであり、合意制御によって全ての i について状態変数 $\theta_{ri}[k]$ を一致させる。参考文献⁴⁾の議論により、各地域の情報ネットワークが連結の場合、合意した収束値 $\lim_{k \rightarrow \infty} \theta_{ri}[k]$ は $s+1$ ステップ目の価格 $\lambda_r^{[s+1]}$ と等しくなる。

3.4 需要供給量予測の必要性

地域全体の情報が必要であり分散的でない式(8)の更新則の代わりに、地域内のエージェント間の情報ネットワークを通して式(9)に従って分散的に価格交渉を行うリアルタイムプライシングシステムについて考える。情報ネットワークを介した価格交渉には一定の時間が必要であるため、 $\lambda_r^{[s+1]}$ を算出するための価格交渉は $s+1$ ステップの開始時刻よりも前の時刻で開始されなければならない。 s ステップ目の開始時刻を t_s 、 $s+1$ ステップ目に用いる価格を決めるために s ステップ目のうちに行う交渉の開始時刻を τ_s とすると、更新

や予測を行うタイミングは図3で示すタイムラインのようになる。

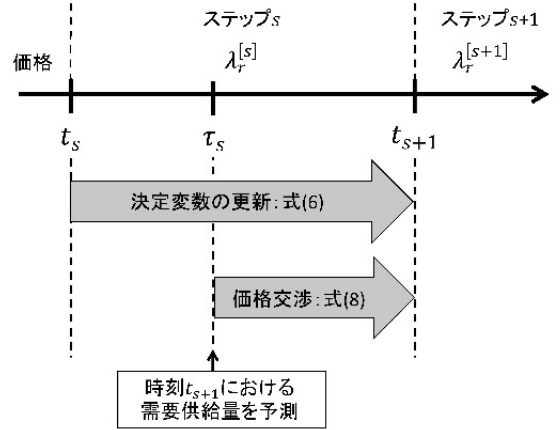


図3. 決定変数更新と価格交渉のタイムライン

ここで、時刻 τ_s で開始する価格交渉のための初期値を決定する際に時刻 t_{s+1} におけるエージェント i の需要供給量(i が送電家の場合は送電量)の値が必要である。すなわち、時刻 τ_s において、将来の時刻である時刻 t_{s+1} のときの i の需要供給量を予測して価格交渉をはじめなければならない。これは、ある時刻において提示されている価格に対して、各エージェントの需要供給量の収束値を予測することに相当する。このように、本節で見た交渉型リアルタイムプライシングを実行する際には、将来時点の需要供給量、すなわち需要供給量の収束値を予測することが必要となる。次節ではそのための基本的な手法を紹介する。

4 需要供給量予測

3.3節で示した交渉型リアルタイムプライシングにおける分散最適化には、3.4節で示したように、ある時刻において提示されている価格に対する各エージェントの需要供給量の収束値を予測する必要がある。本節では各エージェントの効用関数が上に凸な2次関数であることを仮定して、逐次線形回帰を用いて需要供給量の収束値を予測する方法を提案する。

地域 r に含まれる需要供給家 $i \in \mathcal{P}_r$ の効用関数が上に凸な2次関数であるとき、効用関数は適当な実数パラメータ $A_{ri}, B_{ri}, C_{ri} \in \mathbb{R}$ を用いて

$$U_{ri}(x_{ri}) = A_{ri}(x_{ri} - B_{ri})^2 + C_{ri} \quad (10)$$

と書くことができる。ここで A_{ri} は需要供給量に対する効用の感度を表すパラメータで、 $A_{ri} < 0$ である。また、 B_{ri} は最大効用を与える需要供給量を表し、 C_{ri} は最大効用を表す。ある価格 $\lambda_r^{[s]}$ が提示された場合の式(6)による更新の収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ について、式(6)より下記が成り立つ。

$$\frac{\partial U_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}^{[s+1]}) + \lambda_r^{[s]} = 0 \quad (11)$$

式(10)および式(11)より、提示価格 $\lambda_r^{[s]}$ と需要供給量の

収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ の間には、式(12)のような線形の関係が成り立つ。

$$x_{ri}^{[s+1]} = -\frac{1}{2A_{ri}}\lambda_r^{[s]} + B_{ri} \quad (12)$$

そこで、エージェント i に価格 $\lambda_r^{[s]}$ が提示された場合の需要供給量収束値の予測値を $\hat{x}_{ri}^{[s+1]} \in \mathbb{R}$ として、次の式(13)に従って予測を行うとする。

$$\hat{x}_{ri}^{[s+1]} = a_{ri}^{[s]}\lambda_r^{[s]} + b_{ri}^{[s]} \quad (13)$$

式(12)と式(13)を比べると分かるように、 $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ はそれぞれ $-1/(2A_{ri})$ と B_{ri} に対応した係数である、ここでは、ステップが更新される度に過去の提示価格とそれに対する需要供給量収束値の組に対して最小二乗法を用いて $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ を求める。

一般的に、 N 組のデータ (X_l, Y_l) 、 $l = 1, 2, \dots, N$ に対して最小二乗法を用いて得られる回帰直線は式(14)のようになる⁵⁾。

$$\begin{cases} Y = aX + b \\ a = \frac{N \sum_{l=1}^N X_l Y_l - \sum_{l=1}^N X_l \sum_{l=1}^N Y_l}{N \sum_{l=1}^N X_l^2 - (\sum_{l=1}^N X_l)^2} \\ b = \frac{\sum_{l=1}^N X_l \sum_{l=1}^N Y_l - \sum_{l=1}^N X_l Y_l \sum_{l=1}^N Y_l}{N \sum_{l=1}^N X_l^2 - (\sum_{l=1}^N X_l)^2} \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 X を $\lambda_r^{[s]}$ 、 Y を $\hat{x}_{ri}^{[s+1]}$ と考えると、式(14)の第2式、第3式を用いて $a_{ri}^{[s]}$ と $b_{ri}^{[s]}$ を計算することができる。しかし式(14)の表現のままだと0ステップ目から現在のステップに至るまでの全ての提示価格と需要供給量収束値のデータが必要になってしまう。そこで、和記号の部分を実個別に考え、式(15)~(18)のような逐次更新できるパラメータを用いて、最新のデータのみを用いる方法を採用する。

$$u_{xri}^{[s]} = \sum_{l=1}^s x_{ri}^{[l]} \quad (15)$$

$$u_{\lambda ri}^{[s]} = \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_{ri}^{[l]} \quad (16)$$

$$\sigma_{\lambda ri}^{[s]} = \sum_{l=0}^{s-1} (\lambda_{ri}^{[l]})^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} = \sum_{l=1}^s x_{ri}^{[l]} \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_{ri}^{[l]} \quad (18)$$

これらの逐次計算が可能なパラメータと式(14)を用いて、次に示すような手順Bによって式(13)の係数を逐次更新することができる。

<手順B>

B-i. $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ の他に逐次更新されるパラメータ $u_{xri}^{[s]}$ 、 $u_{\lambda ri}^{[s]}$ 、 $\sigma_{xri}^{[s]}$ 、 $\sigma_{x\lambda ri}^{[s]}$ を準備し、初期値を

$$a_{ri}^{[0]} = b_{ri}^{[0]} = u_{xri}^{[0]} = u_{\lambda ri}^{[0]} = \sigma_{xri}^{[0]} = \sigma_{x\lambda ri}^{[0]} = 0$$

とする。

B-ii. ステップ s において式(13)に従って需要供給量を予測し、式(9)で示される価格交渉をはじめめる。

B-iii. ステップ s の終わりに各パラメータを更新する。ステップ s において提示された価格 $\lambda_r^{[s]}$ 、その価格における需要供給量の収束値 $x_r^{[s+1]}$ を用いて、各パラメータを以下のように更新する。

$$u_{xri}^{[s+1]} = u_{xri}^{[s]} + x_{ri}^{[s+1]} \quad (19)$$

$$u_{\lambda ri}^{[s+1]} = u_{\lambda ri}^{[s]} + \lambda_{ri}^{[s]} \quad (20)$$

$$\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} = \sigma_{\lambda ri}^{[s]} + (\lambda_{ri}^{[s]})^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} = \sigma_{x\lambda ri}^{[s]} + x_{ri}^{[s+1]} \lambda_{ri}^{[s]} \quad (22)$$

$$a_{ri}^{[s+1]} = \frac{s\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} - u_{xri}^{[s+1]} u_{\lambda ri}^{[s+1]}}{s\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} - (u_{\lambda ri}^{[s+1]})^2} \quad (23)$$

$$b_{ri}^{[s+1]} = \frac{\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} u_{xri}^{[s+1]} - \sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} u_{\lambda ri}^{[s+1]}}{s\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} - (u_{\lambda ri}^{[s+1]})^2} \quad (24)$$

B-iv. ステップの更新にあわせて、B-iiへ戻る。

上記の手順で各ステップにおける需要供給量の収束値を予測することができ、式(9)で示す分散的な価格交渉が可能となる。分散的な価格交渉によって各エージェントは適切な価格を得ることができ、各エージェントの効用を最大化しつつ需要供給バランスをとる分散最適化を実現することができる。

5 artisocによるMAS

3節および4節で示したモデルに従ってMASを行うシミュレータをartisocによって構築した。図4はシミュレータ全体のキャプチャ画面である。エージェント数や各種ゲインをコントロールパネルで設定してシミュレーションをスタートすると、ネットワークが自動で生成されて、3.3節の手順Aに従って需要供給量や送電量(決定変数)の更新がはじまる。一定の時間が進むとシミュレーションは交渉モードに入り、3.3節の式(9)に従って価格交渉がはじまって、その収束値として推定価格が得られる。本来は図3で示したタイムラインのように、決定変数の更新のプロセスの途中で価格交渉のプロセスがはじまるが、シミュレータ上ではあるステップの決定変数の更新プロセスが終わってから交渉

のプロセスを計算する。シミュレータの画面には自動構成されたネットワークが空間として表示される他、目的関数の値、各地域の需給バランス、各エージェントが推定した価格などがグラフとして表示される。

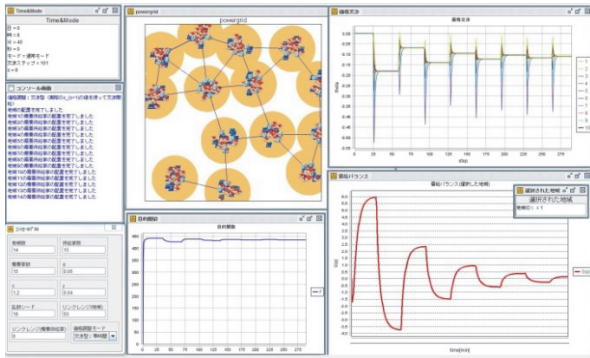


図4. シミュレータの画面キャプチャ

5.1 コントロールパネル

図5に示したコントロールパネルからは地域数、供給家数、需要家数、ゲインパラメータ、乱数シード、リンクレンジ、価格調整モードのパラメータを設定することができる。

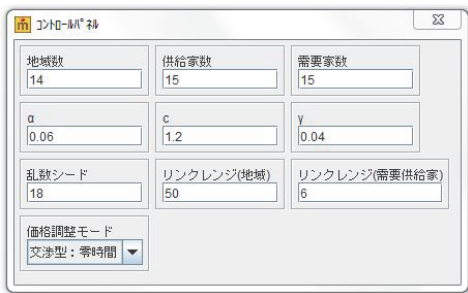


図5. コントロールパネル

ここで、ゲインパラメータ α は式(6)で、 c と γ は式(9)で使われている定数である。乱数シードはネットワークの自動生成に用いる乱数のシードを意味する。同じネットワーク構造のもとでシミュレーションを繰り返したいときは乱数シードの値を変えずに実行し、異なるネットワーク構造でのシミュレーションを行う場合は乱数シードを変更して実行すればよい。リンクレンジ(地域)とリンクレンジ(需要供給家)はそれぞれ送電ネットワークと情報ネットワークを構成する際の隣接かそうでないかを定めるパラメータである。リンクレンジを大きくすると、平均次数の高いネットワークが生成される。価格調整モードは、価格調整の初期値として用いる値を切り替える。「零時間」は交渉が決定変数更新の時間間隔に比べて極めて小さい時間で終了するとした場合に相当し、 $s+1$ ステップ目の価格を推定する価格調整の初期値に、 $s+1$ ステップ目の初めの状態の決定変数を使用する。「予測無」の場合は価格交渉に有限の時間を必要とするが、4節で示したような予測を行わない場合に相当する。このとき、 $s+1$ ステップ目の価格を推定する価格調整の初期値に、 s ステップ目の初めの状態の決定変数を使用する。「予測有」は4節で説明した逐次線形回帰を用いて需要供給量予測を適用した場合に相当する。

5.2 空間(ネットワーク)

シミュレーションの開始時に、コントロールパネルから設定された地域数とエージェント数に応じて送電ネットワークおよび情報ネットワークが自動で生成される。まず、2次元空間上に設定された数の地域がランダムで配置され、リンクレンジ(地域)で設定した距離より近い地域同士が送電ネットワークで結ばれる。マップ出力上では、送電ネットワークは青い線で表示される(図6左)。同様にして、各地域に需要供給家がランダムで配置され、リンクレンジ(需要供給家)で設定した距離より近い需要供給家同士が情報ネットワークで結ばれる。マップ出力上では、情報ネットワークは赤い線で表示される(図6右)。

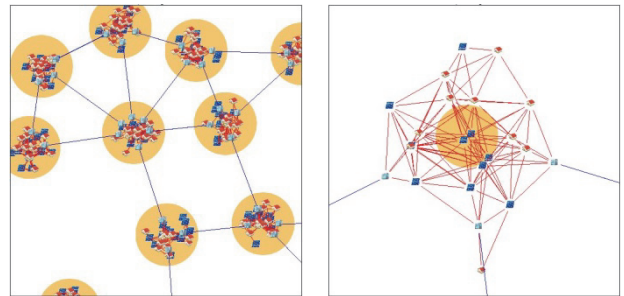


図6. ネットワーク(マップ出力)

5.3 時系列グラフ

シミュレーションを開始すると、目的関数、需給バランス、価格交渉の3つグラフが表示される。ここで目的関数のグラフは式(2)で示される、全てのエージェントの効用の和 $F(x)$ の時系列グラフである。需給バランスのグラフ(図7)は式(3)で示される、ある地域の需給バランス $G_r(x)$ の時系列グラフである。マップ出力で各地域をクリックすると、需給バランスのグラフで表示する地域を切り替えることができる。



図7. 需給バランス $G_r(x)$ の時系列グラフ

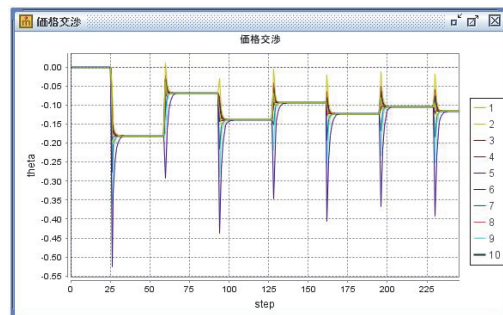


図8. 状態変数 θ_{ri} [k]の時系列グラフ

価格交渉のグラフ(図8)は式(9)で示される価格推定のための状態変数 θ_{ri} の時系列グラフであり、1番目～10番目のエージェントのものが示されている。一定の間隔で価格交渉が行われ、収束値を提示価格として用いる。

5.4 初期値と更新/交渉の周期

今回構築したシミュレータでは、決定変数およびラグランジュ乗数(価格)の初期値は全て0とした。また、手順A-ii. 式(6)の更新ステップを0.25分とし、A-iii. 式(8)に相当する価格更新の周期を1時間とした。

6 シミュレーション結果

5節で紹介したシミュレータを用いてMASを行い、提案する手法によって目的関数を最大に保ちつつ地域ごとの需給バランスをとることができるかどうかを検証した。今回のシミュレーションケースでは、地域数を15とし、各地域に需要供給家を20配置して図9のようなネットワークを構築した。効用関数は各エージェントに対して適当な上に凸な2次関数を用意し、ゲインパラメータには適当な正数を設定した。ケースIでは、各エージェントが4節で示した需要供給量予測を行うとした。すなわち、過去の価格に対する需要供給量の値を用いて式(13)の回帰直線を逐次更新し、次のステップ初めの需要供給量を予測して価格調整の初期値に用いた。比較のためのケースIIでは状態量予測を行わず、1時間ごとの、価格調整をはじめめる時点における需要供給量を代わりに用いた。

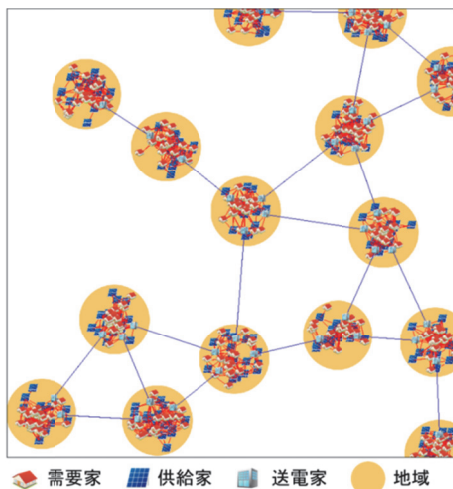


図9. シミュレーションケースのネットワーク

上記のような条件のもとに数値シミュレーションを行った結果を以下に示す。時系列グラフは、artisocを用いたシミュレータからデータを出力したものを、あらためて別のグラフ描画ソフトに読み込んで作成したものである。図10はケースIにおける、ある地域の価格交渉経過を示すグラフであり、横軸は経過時間、縦軸は式(9)における価格推定のための状態変数 $\theta_{ri}[k]$ の値である。各ステップにおいて各エージェントの状態変数が同一の値に速やかに収束していることが分かる。ケースIでは価格交渉を開始するための初期値に、予測した需要供給量を用いている。

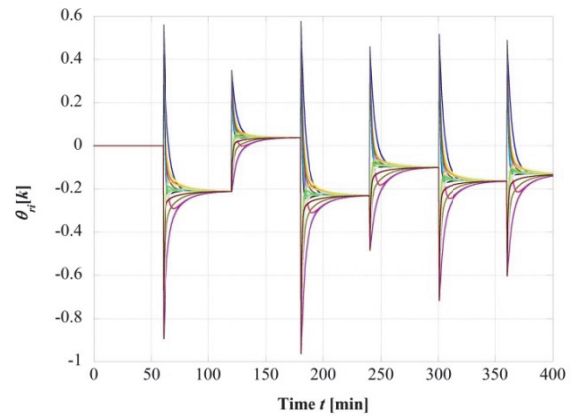


図10. 状態変数 $\theta_{ri}[k]$ の時系列グラフ(ケースI)

図11にはケースIIにおける各地域の制約関数 $G_r(x)$ の時間変化を示す。 $G_r(x)$ が正の場合は電力過剰、負の場合は電力不足を意味する。図11のグラフから分かるように、ケースIの場合は各地域の制約関数 $G_r(x)$ がゼロに収束し、需給バランスがとれた状態を実現できている。一方、ケースIIにおける $G_r(x)$ の時間変化は図12のようになり、発散している。これは、需要供給量予測を行わないことで適切な価格調整ができなかったためである。これらの結果より、本研究が提案する交渉型リアルタイムプライシングの手法および逐次線形回帰法による予測手法の有効性を確認することができた。

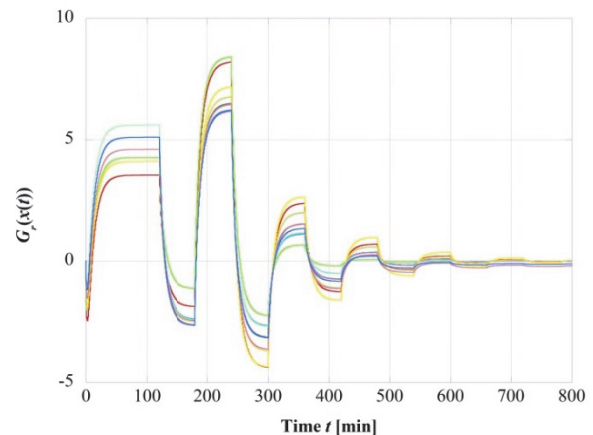


図11. 需給バランス $G_r(x)$ 時系列グラフ(ケースI)

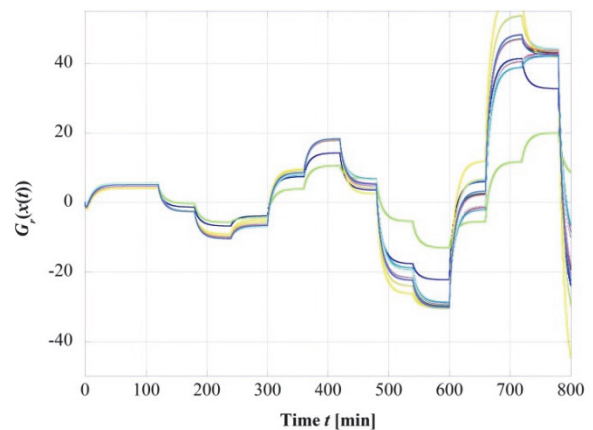


図12. 需給バランス $G_r(x)$ 時系列グラフ(ケースII)

7 おわりに

本稿ではリアルタイムプライシング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に基づく交渉型価格調整則を提案した。また、有限の交渉時間を想定した場合に問題となる、需要供給量予測についても、必要性の確認と逐次線形回帰を用いた方法を提案した。そして artisoc を用いて、提案する手法を地域分割型電力ネットワークに適応した場合の MAS を構築し、シミュレーションを実行した。その結果、提案手法の有効性を確認することができた。今後は提案するシステムのより詳しい振る舞いを調べるため、様々なネットワーク規模や構造、様々なゲインパラメータのもとでのシミュレーションを行う必要がある。その際に、今回構築した artisoc によるシミュレータを活用する予定である。

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) E. Bitar, P. P. Khargonekar, and K. Poolla, "Systems and control opportunities in the integration of renewable energy into the smart grid," in The 18th IFAC World Congress, 2011.
- 2) W. Berger and F. C. Schweppe, "Real time pricing to assist in load frequency control," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 920-926, 1989
- 3) A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, 2010.
- 4) 桜間一徳, 三浦政司, "マルチエージェントシステムの制約付き分散最適化とリアルタイムプライシングへの応用," 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2014.
- 5) 中川徹, 小柳義夫, "最小二乗法による実験データ解析," 東京大学出版会, pp.30, 1982.