

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

大久保徳雄（慶應義塾大学） 滑川徹（慶應義塾大学）

Game Theoretic Real-Time Pricing based on Dual Decomposition and its Application to Load Frequency Control of Power Networks

*N. Okubo (Keio University) and T. Namerikawa (Keio University)

Abstract— This paper deals with game theoretic real-time pricing method based on dual decomposition and its application to load frequency control of power networks. This pricing method aims to solve the constrained optimization problem consist of each player's utility and social welfare under selfish players. Selfish player's decision is a Nash equilibrium solution considering their own cost function. We show this method can lead their own decision to social welfare maximization. Finally we show the effectiveness for Load frequency control by some simulation results.

Key Words: Game Theory, Dual Decomposition, Real-Time Pricing, Smart Grid, Load Frequency Control

1 はじめに

省エネルギー化を見越した再生可能エネルギーの電力系統への導入が盛んに検討されている。しかし、電圧変動や周波数変動といった現象を引き起こす要因となるため、供給量と需要量を効率的に調整する必要がある。このような問題に対するアプローチとして、細かい時間間隔で電力価格を調整することで需給バランスを保つリアルタイムプライシングという試みが注目されている¹⁾²⁾。

プライシング手法に関する研究は一般に最適化理論を利用しており、価格の調整則にゲーム理論を考慮した手法³⁾⁴⁾がある。ゲーム理論を考慮することによって、電力網における需要家、供給家といったプレイヤーに対し、自身の利益のみではなく、安定した電力供給につながる系統周波数、潮流変動といった、系統内における公共的な利益をも考慮して最適化問題を設計できるというメリットが存在する。

本稿では、ゲーム理論を考慮したプライシング手法を発展させるため、双対分解に注目したリアルタイムプライシング手法を提案する。このことにより、従来法において議論されていなかった制約条件を考慮しつつ公共利益の最適化を達成することができる。

2 双対分解とゲーム理論

本稿で扱う最適化問題を(1)式のように定式化する。以降、(1)式を原問題と呼ぶ。 x_i はプレイヤー*i*の状態量、 z は公共利益に関するパラメータ、 $J_i(x_i)$ は各プレイヤーの利益を表す関数、 $J(z)$ は公共利益を表す関数とする。また、 x は、 x_i を要素に持つベクトル量とする。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} \quad & \sum_{i=1}^n J_i(x_i) + J(z) \\ \text{s.t.} \quad & z = H(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n H_i(x_i) \\ & g_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、原問題に関して以下の仮定を置く。

仮定 1. $J_i(\cdot) \in C^2$, $J(\cdot) \in C^2$ は狭義の凹関数とする。

$g_j(\cdot) \in C^2$ は凹関数、 $H_i(\cdot)$ は線形関数とする。

(1) 式のラグランジュ関数 $L(\mathbf{x}, \lambda)$ をおき、双対問題として書き換えると、以下のように書き換えられる。

$$\min_{\lambda} \max_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^n J_i(x_i) + [J \circ H](\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(\mathbf{x}) \quad (2)$$

なお、 $[J \circ H]$ は J と H の合成関数である。(2) 式について、 $L(\mathbf{x}, \lambda) = \sum_{i=1}^n J_i(x_i) + [J \circ H](\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(\mathbf{x})$ である。このとき、以下のような双対問題の鞍点解と原問題の最適解は一致する。

$$L(\mathbf{x}, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}^*, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}^*, \lambda) \quad (3)$$

本稿では原問題を解くにあたって、プレイヤー i は、自身の利益のみの最大化を行う利己的プレイヤーを想定する。ただし、付加コスト π_i を与えることで、 $J_i(x_i) + \pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ の最適化を行うとする。

各プレイヤーが自身の利益のみを最大化するため、そのままでは原問題全体の最適化が達成されない。そのため、適切に $\pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ を設定する手法を考えたい。付加コストが加えられた際の各プレイヤーの利益を表す関数を $C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ として、以下のように定義する。

$$C_i(x_i, x_{-i}, \lambda) = J_i(x_i) + \pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda) \quad (4)$$

ここで、 $-i$ は相手プレイヤーの意で、 $-i = \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, n\}$ の集合を表すとする。各プレイヤーは、関数 $C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ の最適化を行う。また、ラグランジュ乗数に関して最適化を行うオペレーターを定義する。各プレイヤーは関数 $C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ 、各オペレーターは関数 $\mathcal{O}_j(\mathbf{x}, \lambda_j^*)$ の最適化をそれぞれ行う。

$$\max_{x_i} C_i(x_i, x_{-i}, \lambda) = J_i(x_i) + \pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda) \quad (5)$$

$$\min_{\lambda_j} \mathcal{O}_j(\mathbf{x}, \lambda_j^*) = \lambda_j g_j(\mathbf{x}) \quad (6)$$

このときの問題は、 n 人の最大化プレイヤーと、 m 人の最小化プレイヤーにより構成されるゲーム問題と考え

ることができる。各コスト関数の最適解は以下に定義するナッシュ均衡に収束する。

$$C_i(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda^*) \geq C_i(x_i, x_{-i}, \lambda^*) \quad (7)$$

$$O_j(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda_j^*) \leq O_j(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda_j) \quad (8)$$

以上の問題設定の下で、本論文の主要結果として以下の定理 1 が得られる。

定理 1

仮定 1 が成り立ち、プレイヤー i に対する付加コスト関数 $\pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ が与えられたとする。(7) 式で定義される $C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ 及び、(8) 式で定義される $O_j(x, \lambda_j)$ のナッシュ均衡解が双対問題 (2) 式の鞍点解となる必要十分条件は、以下の (9) 式を満たす連続な任意関数 $F_i(x_{-i}, \lambda)$ が存在することである。

$$\begin{aligned} \pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda) = & [J \circ H](x_i, x_{-i}) + \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(x_i, x_{-i}) \\ & + F_i(x_{-i}, \lambda) \end{aligned} \quad (9)$$

Proof.

必要性

背理法を用いて必要性を示す。(9) 式を満たす $\pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ が与えられた、各プレイヤーの利益を表す関数 $C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ に関して、 (x_i, x_{-i}, λ^*) が以下の不等式を満たすと仮定する。

$$C(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda^*) < C(x_i, x_{-i}, \lambda^*) \quad (10)$$

式変形をしていくと以下ようになる。

$$\begin{aligned} & J_i(x_i^*) + J_{-i}(x_{-i}^*) + [J \circ H](x_i^*, x_{-i}^*) \\ & + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* g_j(x_i^*, x_{-i}^*) \\ < & J_i(x_i) + J_{-i}(x_{-i}) + [J \circ H](x_i, x_{-i}) \\ & + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* g_j(x_i, x_{-i}) \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式は、鞍点解の条件 $L(x, \lambda^*) \leq L(x^*, \lambda^*)$ と矛盾する。そのため、(9) 式を満たす、 $F_i(x_{-i}, \lambda)$ が存在すれば、ナッシュ均衡と鞍点解は一致する。

同様に、各オペレーターのコスト関数 $O_j(x, \lambda_j)$ に対しても (x, λ_j) が以下の不等式を満たすと仮定する。

$$O_j(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda_j^*) > O_j(x_i^*, x_{-i}^*, \lambda_j) \quad (12)$$

同様に式変形をしていくと以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n J_i(x_i^*) + [J \circ H](x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* g_j(x^*) \\ > & \sum_{i=1}^n J_i(x_i^*) + [J \circ H](x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(x^*) \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式は、鞍点解の条件 $L(x^*, \lambda^*) \leq L(x^*, \lambda)$ と矛盾する。以上より必要性は示された。

十分性

ナッシュ均衡と鞍点解が一致すれば、(9) 式を満たす、 $F_i(x_{-i}, \lambda)$ が存在することを示したい。仮定 2 より、原問題は凸最適化問題となり、KKT 条件を満たす最適解が一意に定まる。 $(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}, \bar{\lambda})$ をナッシュ均衡解とすると、勾配は 0 になるから、

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i(x_i, x_{-i}, \lambda)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (J_i(\bar{x}_i) + \pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

全てのプレイヤーが x_i をナッシュ均衡となるように選択すると、KKT 条件の一つが満たされる。よって、 $\pi_i(x_i, x_{-i}, \lambda)$ に関する以下の等式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \pi_i(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}, \lambda)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left([J \circ H](\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}) + \sum_{j=1}^m \bar{\lambda}_j g_j(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

次に、ラグランジュ乗数 λ が、同様にナッシュ均衡解を満たすとすると、 λ に関する勾配が 0 となるので、

$$\frac{\partial O_j(x, \lambda_j)}{\partial \lambda_j} = g_j(x) = 0 \quad (16)$$

これもやはり、KKT 条件を満たしている。以上より、十分性も示され、必要十分条件であることが示された。□

3 鞍点解へと至るアルゴリズム

鞍点解へと至るアルゴリズムを考える。各変数に経済的な意味を持たせるために以下の仮定を設ける。

仮定 2. 状態量 x とラグランジュ乗数 λ は常に正とする。

仮定 1 および仮定 2 が成り立つとき、状態量、及びラグランジュ乗数の最適解を求める手法として、アロー＝ハーヴィッチの Gradient Method の定差方程式による表現が知られている⁶⁾。 $\gamma_i > 0$ 、 $\gamma_j > 0$ はステップサイズである。

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= \max \left\{ 0, x_i(t) + \gamma_i \left(J_i'(x_i(t)) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\partial [J \circ H](x(t))}{\partial x_i(t)} + \lambda^T(t) g'(x(t)) \right) \right\} \\ \lambda_j(t+1) &= \max \{ 0, \lambda_j(t) - \gamma_j g_j(x(t)) \} \end{aligned} \quad (17)$$

定差方程式 (17) 式を、仮定 2 を考慮し、ベクトル x 、 λ を用いて書き直すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t) + R_p(G'(x(t)) + \lambda^T(t)g'(x(t))) \\ \lambda(t+1) &= \lambda(t) - R_o g(x(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、 $G(x(t)) = \sum_{i=1}^n J_i(x_i(t)) + [J \circ H](x(t))$ である。行列 $R_p = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n)$ 、 $R_o = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_m)$ とする。(18) 式に示すアルゴリズムに従って、各プレイヤー及びオペレーターが状態量を更新する結果、状態量 x 及びラグランジュ乗数 λ は鞍点解 (x^*, λ^*) 近傍へと収束する。ただし、近傍は定数 $\epsilon > 0$ が与えられたとき、(19) 式で定義される。

$$\|x(t) - x^*\|^2 + \|\lambda(t) - \lambda^*\|^2 \leq \epsilon \quad (19)$$

4 電力網の系統周波数制御

提案手法の有効性をシミュレーションにより確認する。今回のシミュレーションで考えるプレイヤーは、需要家 (Consumer), 供給家 (Generator), ISO (Operator) の3プレイヤーとする。なお, Fig.1 に電力網モデルと各プレイヤーのやり取りを示す。

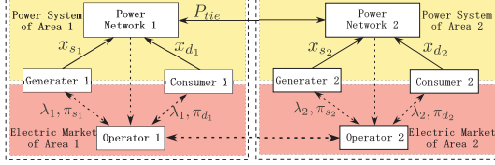


Fig. 1: Power Network and Players

4.1 電力網および各プレイヤーのモデル化

電力網モデルは (20) ~ (24) 式のように定式化した。(20) 式, (21) 式はそれぞれエリア i の潮流偏差, 周波数偏差の動特性を表している。(21) 式のうち, P_{gi} は LFC 発電機の出力偏差, x_{s_i} は LFC 発電機以外の供給電力量 w_i は風力発電出力であり, 発電量の合計は $S_i^{total} = P_{gi} + x_{s_i} + w_i$ となる。 x_{d_i} は電力需要量である。(22) 式, (23) 式はそれぞれエリア i のタービンとガバナの動特性を一次遅れ系で模擬したものであり。(24) 式はエリア i の LFC 出力指令値の動特性である。

$$\dot{P}_{tie_i} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} T_{ij}(f_j - f_i) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{f}_i &= -\frac{D_i}{M_i} f_i + \frac{1}{M_i} P_{gi} + \frac{1}{M_i} x_{s_i} - \frac{1}{M_i} x_{d_i} \\ &\quad + \frac{1}{M_i} P_{tie_i} + \frac{1}{M_i} w_i \end{aligned} \quad (21)$$

$$\dot{P}_{gi} = -\frac{1}{T_{d_i}} P_{gi} + \frac{1}{T_{d_i}} x_{gvi} \quad (22)$$

$$\dot{x}_{gvi} = -\frac{1}{R_{g_i} T_{g_i}} f_i - \frac{1}{T_{g_i}} P_{gi} + \frac{1}{T_{g_i}} x_{gvi} \quad (23)$$

$$\dot{U}_{AR_i} = K_i P_{tie_i} - B_i K_i f_i \quad (24)$$

ベクトル $z_i = [\theta_i \ f_i \ P_{gi} \ x_{gvi} \ U_{AR_i}]^T$ を定義し, サンプル時間 T で離散化し, (25) 式とする。ただし \mathcal{N}_i はエリア i と隣接しているエリアの集合を表す。電力網モデルに関して設定したパラメータを Table 1 に示す。

$$\begin{aligned} z_i(t+1) &= E_i z_i(t) + C_i x_{s_i}(t) - C_i x_{d_i}(t) \\ &\quad + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij} z_j(t) + C_i w_i(t) \end{aligned} \quad (25)$$

次に, 社会厚生関数を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}_d, \mathbf{x}_s} \quad & \sum_{i=1}^2 v_i(x_{d_i}(t)) - \sum_{i=1}^2 c_i(x_{s_i}(t)) \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 z_i^T(t+1) Q_i z_i(t+1) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & z_i(t+1) = E_i z_i(t) + C_i x_{s_i}(t) - C_i x_{d_i}(t) \\ & + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij} z_j(t) + C_i w_i(t) \\ & \mathbf{x}_s - \mathbf{x}_d + \mathbf{w} = 0 \end{aligned}$$

Table 1: Parameters

エリア 1 系統容量 PW_1 [MW]	200
エリア 2 系統容量 PW_2 [MW]	200
エリア間同期化力定数 T_{12} [puMW]	0.5
エリア 1 慣性定数 M_1 [puMW·sec/Hz]	0.25
エリア 2 慣性定数 M_2 [puMW·sec/Hz]	0.25
エリア 1 ダンピング定数 D_1 [puMW·Hz]	0.1
エリア 2 ダンピング定数 D_2 [puMW·Hz]	0.1
エリア 1 タービン時定数 T_{d1} [sec]	1.0
エリア 2 タービン時定数 T_{d2} [sec]	1.0
エリア 1 ガバナ時定数 T_{g1} [sec]	0.2
エリア 2 ガバナ時定数 T_{g2} [sec]	0.2
エリア 1 速度調速率 R_1 [Hz/puMW]	2.4
エリア 2 速度調速率 R_2 [Hz/puMW]	2.4

$x_{s_i}(t)$, $x_{d_i}(t)$ の決定は利己的プレイヤーによりなされる。(26) 式のうち, 原問題の $[J \circ H]$ に相当する部分は, $-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n z_i^T(t+1) Q_i z_i(t+1)$ であるが, 定理 1 に従って, (27), (28) 式と計算できる。以降, (27), (28) 式を付加コストと呼び, 電力価格と別に考える。

$$\begin{aligned} \pi_{s_i}(t) &= -\left(E_i z_i(t) + \frac{1}{2} C_i x_{s_i}(t) - C_i x_{d_i}(t)\right. \\ &\quad \left. + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij} z_j(t)\right)^T Q_i C_i x_{s_i}(t) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \pi_{d_i}(t) &= \left(E_i z_i(t) + C_i x_{s_i}(t) - \frac{1}{2} C_i x_{d_i}(t)\right. \\ &\quad \left. + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij} z_j(t)\right)^T Q_i C_i x_{d_i}(t) \end{aligned} \quad (28)$$

需要家の効用関数に関してモデル化する。エリア i の需要家の効用を表す関数は, $v_i(x_{d_i}(t))$ であり, 付加コスト $\pi_{d_i}(t)$ 及び価格 $\lambda_i(t)$ が与えられたとき, 以下の最適化問題を解くと考えられる。

$$\begin{aligned} \max_{x_{d_i}} \quad & v_i(x_{d_i}(t)) - \lambda_i(t) x_{d_i}(t) + \left(E_i z_i(t) - \frac{1}{2} C_i x_{d_i}(t)\right. \\ & \left. + C_i x_{s_i}(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij} z_j(t)\right)^T Q_i C_i x_{d_i}(t) \end{aligned} \quad (29)$$

付加コスト π_{d_i} を考慮しないと以下ようになる。

$$\max_{x_{d_i}} v_i(x_{d_i}(t)) - \lambda_i x_{d_i}(t) \quad (30)$$

(29) 式より以下のように需要量の更新則を決定する。

$$\begin{aligned} x_{d_i}(t+1) &= x_{d_i}(t) + \gamma_{di} \left(v'_i(x_{d_i}(t)) - \lambda(t) \right. \\ &\quad \left. + C_i^T Q_i E_i z_i(t) + C_i^T Q_i C_i x_{s_i}(t) \right. \\ &\quad \left. - C_i^T Q_i C_i x_{d_i}(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} C_i^T Q_i E_{ij} z_j(t) \right) \end{aligned} \quad (31)$$

供給家のコスト関数についても同様にモデル化する。エリア i の供給家のコストを表す関数は, $c_i(x_{s_i}(t))$ であり, 付加コスト $\pi_{d_i}(t)$ 及び価格 $\lambda_i(t)$ が与えられたと

き、以下の最適化問題を解くと考えられる。

$$\begin{aligned} \max_{x_{s_i}} \lambda_i(t)x_{s_i}(t) - c_i(x_{s_i}(t)) - \left(E_{ij}z_j(t) + \frac{1}{2}C_i x_{s_i}(t) \right. \\ \left. - C_i x_{d_i}(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} E_{ij}z_j(t) \right)^T Q_i C_i x_{s_i}(t) \quad (32) \end{aligned}$$

付加コスト π_{s_i} を考慮しないと以下ようになる。

$$\max_{x_{s_i}} \lambda x_{s_i}(t) - c_i(x_{s_i}(t)) \quad (33)$$

(32) 式より以下のように需要量の更新則を決定する。

$$\begin{aligned} x_{s_i}(t+1) = x_{s_i}(t) + \gamma_{si} \left(\lambda(t) - c'_i(x_{d_i}(t)) \right. \\ \left. - C_i^T Q_i E_{ij}z_j(t) - C_i^T Q_i C_i x_{s_i}(t) \right. \\ \left. + C_i^T Q_i C_i x_{d_i}(t) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} C_i^T Q_i E_{ij}z_j(t) \right) \quad (34) \end{aligned}$$

最後に、ISO の電力価格の更新則は以下で与えられる。

$$\lambda(t+1) = \lambda(t) + \gamma_{oi}(x_{d_i}(t) - x_{s_i}(t) - w_i(t)) \quad (35)$$

4.2 シミュレーション結果

各エリアの風力発電出力は Fig.2 のように変動したとする。エリア 1 の場合、0[sec] から 1100[sec] 付近まで大きな出力変動がある。対策を練らなければ過剰供給となってしまう、その偏差を打ち消すように LFC 発電機出力を制御しなければならない。風力発電の出力変動の

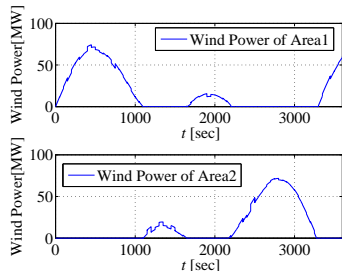


Fig. 2: Wind Power of each Area

系統への影響を抑えるように、電力需給のバランスを調整させたい。需要家 i の効用関数、供給家 i のコスト関数を以下のように設定する。

$$v_i(x_{d_i}(t)) = a_i \log x_{d_i}(t), \quad c_i(x_{s_i}(t)) = \frac{1}{2}b_i x_{s_i}^2(t) \quad (36)$$

ここで、 $a_1 = a_2 = 1.73 \times 10^6$, $b_1 = b_2 = 1.73 \times 10^2$ とした。また、 $Q_1 = Q_2 = 2.0 \times 10^8 \times I_5$ として重みづけした。サンプリング周期は $T = 0.01$ [sec], ステップサイズは全て $\gamma = 0.001$ とした。

シミュレーション結果は、Fig.3 ~ Fig.6 のようになった。結果を表示するにあたり、2 種類のパターンを比較した。パターン 1 は付加コストに π_i と λ を考慮した (29) 式, (32) 式, パターン 2 は λ の調整のみを考慮した (30) 式, (33) 式をそれぞれ用いている。

Fig.3 はエリア 1 における周波数の変動の様子を表しており、パターン 1 のほうが、より周波数偏差を抑えられている。よって、定理 1 の付加コストは公共利益の最

適化に貢献していることが分かる。Fig.4 はエリア 1 における需給バランスの偏差 $x_{s_i}(t) + w_i(t) - x_{d_i}(t)$ を表しており、この値の絶対値が小さければ小さいほど、系統内の予備電力が少なく済むことを示しているため、0 付近に収束していることが望ましい。パターン 1 は外乱による周波数偏差を打ち消しつつ、均衡状態へと向かっている。よって、定理 1 は原問題の等式制約を考慮していることが分かる。Fig.5 はエリア 1 における需要家の金銭的利益 (29) 式および、(30) 式の値を表しており、パターン 1 のほうが大きいことが分かる。よって、定理 1 で新たに付加されたコスト π_i が利益の妨げとなることはない。Fig.6 はエリア 1 における電力価格の変動を表わしており、外乱が無いければ両手法とも均衡状態に収束していることが分かる。

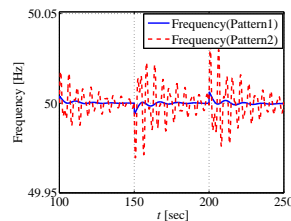


Fig. 3: Load Frequency

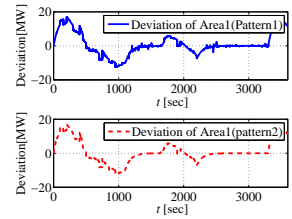


Fig. 4: Deviation

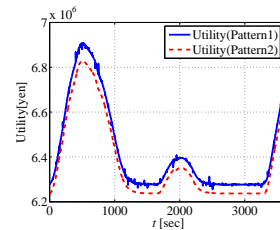


Fig. 5: Utility

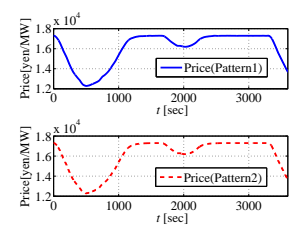


Fig. 6: Price

5 まとめ

本稿では、電力網におけるリアルタイムの価格調整問題に対して、双対分解とゲーム理論に基づく手法を提案した。結果は電力網の不安定性が従来法よりも効果的に抑制できており、金銭的利益にも影響を及ぼさない手法であることが分かった。今後の課題としては、最適制御理論を考慮した、区間最適化問題への拡張等がある。

参考文献

- 1) A. W. Berger, F. C. Schweppe, Real Time Pricing to Assist in Load Frequency Control, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.4, No.3, 920/926 (1989)
- 2) A. Jokić, M. Lazar, and P. van den Bosch, Real-Time control of power systems using nodal prices, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.31, No.9, 522/530 (2009)
- 3) T. Tanaka, A. Cheng, C. Langbort, A Dynamic Pivot Mechanism with Application to Real Time Pricing in Power Systems, American Control Conference, 3705/3711 (2012)
- 4) 大久保 徳雄, 滑川 徹, ゲーム理論に基づくリアルタイムプライシングによる負荷周波数制御, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-12-54, 29/34 (2012)
- 5) 滑川 徹, スマートグリッドのための分散予測制御, 計測と制御, Vol.51, No.1, 62/68 (2012)
- 6) K. J. Arrow, L. Hurwicz, and H. Uzawa, Studies in linear and nonlinear programming, Stanford University Press, (1958)