264　反復勾配法による分散制御を用いた電力ネットワークの系統周波数制御

Distributed Control based on Iterative Gradient Methods
for Load Frequency of Power Networks

○ 加藤 太一郎 (慶應義塾大学)　　滑川 徹 (慶應義塾大学)

Taichiro KATO, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa
Toru NAMERIKAWA, Keio University

This paper deals with a distributed control based on iterative gradient methods for load frequency of power networks including distributed generations, batteries, and renewable energies. The control objective is to minimize the cost function of load frequency control problem, and we apply a distributed control methodology by using iterative gradient methods. Finally, simulation results of distributed large scale power network systems shows the effectiveness of the load frequency control compared with decentralized control and centralized control.

Key Words: Gradient Methods, Distributed Control, Load Frequency, Power Network, Distributed Generator

1.　はじめに

1950 年代の後半以降, 不確実性の下の異なる情報を用いる意思決定問題が研究されてきた. 代表的なものとしてゲーム問題やチーム問題があり, 1970 年代に入り現代制御理論が成熟の時期を迎えたころ分散制御との関わりが強くなり, 分散制御の研究は盛んに行われた[(1)(2)]. それ以降も分散制御の研究は行われてきたが, 近年, 協調制御に関する研究の高まりやセンサネットワーク, MEMS, 生体システムなどに代表される分散制御理論を応用できる新たな大規模システムが多数出現したため, 分散制御への関心が高まっている[(3)(4)(5)].

特に近年, エネルギー問題や地球温暖化が世界的に大きな問題となっており, 省エネルギー, コスト削減の観点から世界中で太陽光発電や風力発電, バイオマス発電, コージェネレーションなどの分散型電源が大量に電力系統に連系されるようになっている. しかし同時に, 分散電源を大量に導入した電力ネットワークの系統周波数変動や電圧変動などの問題が発生するようになり, 安全性を確保した上で, 各発電機をうまく協調させながら, 最適な発電を行う必要がある.

電力システムの最適制御の適用は以前から行われている[(6)]. また最近では, 風力発電や太陽光発電, 大容量蓄電池, ヒートポンプを導入した系統の周波数制御に関しても研究が盛んに行われている[(7)(8)(9)].

本稿では, 分散型電源を導入した分散電力ネットワークシステムに対して, 反復勾配法に基づく分散制御[(3)]を用いた系統周波数制御法を提案する. そして, 反復的に勾配法を用いることによって状態フィードバックゲインを逐次的に更新できることを示す. 利点としては, 新たに系統を加える場合, 新たに加える系統に隣接する系統のコントローラの変更のみで良いことが挙げられる. 最後に分散型電源を導入した電力ネットワークの周波数制御に対して提案手法を応用し, シミュレーションで有効性を示す.

本稿では以下の表記法を用いる. $\mathbb{Z}_+$ は非負の整数の集合である. $\mathbb{R}^n$ は n 次元の実数空間を表す. $\mathbf{E}$ は期待値差作用素である. 行列 A に対して $\mathbf{Tr}\,A$ は A のトレースを表す. 行列 Q に対して $Q>0(Q\geq 0)$ は Q が (半) 正定値行列であることを表わす.

2.　分散システムの表現

本稿では複数の系統からなる電力ネットワークを考える. ここで全ての系統の数を $N(\geq 2)$ とすると i 番目 $(i=1,\cdots,N)$ の電力系統は (1) 式の LTI システムで表されるとする.

$$x_i(t+1)=\sum_{j=1}^{N}A_{ij}x_j(t)+B_iu_i(t)+w_i(t) \tag{1}$$

ただし, 時刻 $t\in\mathbb{Z}_+$, 状態 $x_i(t)\in\mathbb{R}^{n_{xi}}$, $A_{ii}\in\mathbb{R}^{n_{xi}\times n_{xi}}$, $j\neq i$ のとき $A_{ij}\in\mathbb{R}^{n_{xj}\times n_{xj}}$, 入力 $u_i(t)\in\mathbb{R}^{n_{ui}}$, 外乱 $w_i(t)\in\mathbb{R}^{n_{wi}}$ であり, $w_i(t)$ は平均 0 の白色雑音であるとする. 系統 i に与えられる制御入力 u_i は系統 i にのみ与えられるとする.

電力系統の i と j が連系線で結ばれている時は $(i,j)\in E$ と表記し, 結ばれていない時は以下のように表すことができる.

$$A_{ij}=0 \qquad \text{if } (i,j)\notin E \tag{2}$$

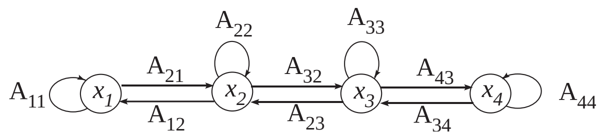

Fig. 1　Example of the system

A_{ij} は電力系統 i の j への影響を表している. 具体例として Fig.1 のような構造の電力ネットワークの A 行列は以下のように表わすことができる.

$$A=\begin{bmatrix}A_{11}&A_{12}&0&0\\A_{21}&A_{22}&A_{23}&0\\0&A_{32}&A_{33}&A_{34}\\0&0&A_{43}&A_{44}\end{bmatrix} \tag{3}$$

以上をまとめると N 個からなる電力ネットワークは (4) 式のように表わすことができる.

$$x(t+1)=Ax(t)+Bu(t)+w(t) \tag{4}$$

ただし, 時刻 $t\in\mathbb{Z}_+$, 状態 $x(t)\in\mathbb{R}^{n_x}$, 入力 $u(t)\in\mathbb{R}^{n_u}$, 外乱 $w(t)\in\mathbb{R}^{n_w}$ であり, $w(t)$ は平均 0 の白色雑音であり, 以下の仮

定を満たすものとする.

$$\mathbf{E}\, w(t)w(s)^T = W\delta_{ts} \tag{5}$$

$$\mathbf{E}\, w(t)x^T(s) = 0, \qquad \text{if } t \geq s \tag{6}$$

$$\delta_{ts} = 1 \ \text{ if } t = s,\ \ \delta_{ts} = 0 \ \ t \neq s \tag{7}$$

また状態ベクトルの全要素が測定できるとする. このシステムは制御入力として以下のような状態フィードバックを用いる.

$$u(t) = -Lx(t) \tag{8}$$

ここで分散配置を考える際, システムと一致する構造をもつフィードバック行列に制限する. 従って電力系統 i の制御入力 $u_i(t)$ の計算は隣接する電力系統の計測値のみが必要となる. ここで N 個の電力系統が制御入力を持つものとし,

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & \dots & L_{NN} \end{bmatrix},\ \ L_{ij} = 0 \ \text{ if } (i,j) \notin E \tag{9}$$

(9) 式を満たすように設計すると, 閉ループ系 $A - BL$ は A と同様の構造となる.

3. 反復勾配法による分散制御

フィードバック行列 L を決めるために, 次式の評価関数を定義する.

$$J(L) = \boldsymbol{E}(|x|_Q^2 + |u|_R^2) \tag{10}$$

ただし $|x|_Q^2 = x^T Qx$, $|u|_R^2 = u^T Ru$ を意味し, $Q, R > 0$ とする. ここではすべての繰り返しを J が降下する方向に L を変えたいので, 明らかに勾配 $\bigtriangledown_L J$ が 0 にならない場合, 以下のようなフィードバック行列を導入する.

$$L_{k+1} = L_k - \gamma \bigtriangledown_L J \tag{11}$$

ここで γ は十分に小さいとする. このフィードバック行列を導入することで勾配を用いて繰り返し計算ができる. 次に, $J(L)$ の勾配は以下の命題 1 で与えられた.

命題 1 [3] A と B 行列に対して, $A - BL$ の固有値がすべて単位円内にあり. 定常確率過程が (4)-(7) 式, (8) 式を満たすとする. その時 (10) で定義される $J(L)$ の勾配は次式で表されれる.

$$\bigtriangledown_L J = 2[RL - B^T P(A - BL)]X \tag{12}$$

X と P は次式のようなリアプノフ方程式を満たすとする. ここで X は, $X = \mathbf{E}xx^T$ とする.

$$X = (A - BL)X(A - BL)^T + W \tag{13}$$

$$P = (A - BL)^T P(A - BL) + Q + L^T RL \tag{14}$$

$\bigtriangledown_L J$ だけなく, 分散的に計算する方法を求めるために随伴システムを導入すると, 命題 2 が与えられる.

命題 2 [3] 命題 1 の条件の下で, 定常確率過程 λ を逆方向に定義する.

$$\lambda(t-1) = (A - BL)^T \lambda(t) - (Q + L^T RL)x(t) \tag{15}$$

$x(t)$ は最初のシステムの状態とする. すると J の勾配は次式のようになる.

$$\bigtriangledown_L J = 2(RL\boldsymbol{E}xx^T + B^T \boldsymbol{E}\lambda x^T) \tag{16}$$

命題 2 だけでは $\bigtriangledown_L J$ の計算は全ての状態の共分散と全ての状態と随伴状態との共分散が決定されている必要があるので, 分散的に求めることができない. しかし, 勾配の適切な予測があればフィードバック行列の分散制御則を決定できる. これを行う時は, Q と R は対角行列と制限し, 状態空間と各電力系統の入力の数をそれぞれ合わせせる. 電力系統 i が隣接する系統の情報のみを用いて λ_i に相当する値を推定できる必要があり以下にそれを示す. 系統 i の随伴状態はまず (17) 式のように表わすことができる.

$$\lambda_i(t-1) = [A_L^T \lambda(t)]_i - [(Q + L^T RL)x(t)]_i \tag{17}$$

(2) 式の仮定および i と j が隣接する場合, それぞれの系統は A_{Lij} の両方とも知ることができると考えられるから, (17) 式は (18) 式のように表わすことができる.

$$\lambda_i(t-1) = \sum_{j\in E_i} (A - BL)_{ji}^T \lambda_j(t) - \Big(Q_i x_i(t) - \sum_{j\in E_i} L_{ji}^T R_j u_j(t)\Big) \tag{18}$$

このことは随伴状態方程式 (17) 式が隣接する系統の情報のみで推定できることを意味する.

L は (9) 式の構造をもつという仮定から, 推定するフィードバック行列の更新もまたこの構造を満たさなければならない. 従って, その構造と同等の部分空間に属する勾配 $\bigtriangledown_L J$ を予測する. ここで G を更新する方向とすると, 次式を得る.

$$\begin{aligned} G_{ij} &= (\bigtriangledown_L J)_{ij} \quad \text{ if } (i,j) \in E \\ G_{ij} &= 0 \quad \text{ otherwise} \end{aligned} \tag{19}$$

勾配 G の推定値が 0 でないと仮定すると, $-G$ は $J(L)$ の降下方向となる. このことはフィードバック行列を更新するには系統 i は隣接する系統に対応する行列の勾配のみを決定すればいいことを意味する. よって $(RL\boldsymbol{E}xx^T)_{ij}$ と $(B^T\boldsymbol{E}\lambda x^T)_{ij}$ の両方を隣接する系統の情報から求める必要があり, 命題 2 で与えられた勾配の第 1 項は次式のように表すことができる.

$$(RL\boldsymbol{E}xx^T)_{ij} = -R_i \boldsymbol{E} u_i x_j^T \tag{20}$$

第 2 項は B の構造の仮定より, 次式のように書きなおすことができる.

$$(B^T\boldsymbol{E}\lambda x^T)_{ij} = B_i^T \boldsymbol{E}\lambda_i x_j^T \tag{21}$$

これも隣接する系統の情報から推定することができ, 分散システムのフィードバック行列の更新は分散的に行えることが分かる. 以上をまとめると以下のアルゴリズムが得られる.

Algorithm 1 時刻 t_k において, 状態フィードバックは $u(t) = L^{(k)}x(t)$ とし, 電力系統 i のフィードバック行列を更新する.

1) 隣接する系統同士の状態情報を交換することによって $t = t_k, \dots, t_k + N$ 間の (4) 式の状態を推定することができる.

$$x_i(t+1) = \sum_{j\in E_i} (A - BL)_{ij} x_j(t) + w_j(t) \tag{22}$$

2) 隣接する系統同士の状態の情報を交換することによって, $t = t_k,\ \dots\ , t_k + N$ の間の (17) 式の後方方向の随伴状態 $\lambda_i(t)$ を推定する.

$$\lambda_i(t-1) = \sum_{j\in E_i} (A - BL)_{ji}^T \lambda_j(t) - \Big(Q_i x_i(t) - \sum_{j\in E_i} L_{ji}^T R_j u_j(t)\Big) \tag{23}$$

3) 隣接する電力系統 j すべてを用いて $\boldsymbol{E}u_ix_j^T$ と $\boldsymbol{E}\lambda_ix_j^T$ を次式のように計算する.

$$(\boldsymbol{E}u_ix_j^T)_{est} = \frac{1}{N+1}\sum_{t=t_k}^{t_k+N} u_i(t)x_j(t)^T \tag{24}$$

$$(\boldsymbol{E}\lambda_ix_j^T)_{est} = \frac{1}{N+1}\sum_{t=t_k}^{t_k+N} \lambda_i(t)x_j(t)^T \tag{25}$$

4) i,j の勾配は推定値を用いると次式のようになる.

$$G_{ij} = -2\bigl[R_i(\boldsymbol{E}u_ix_j^T)_{est} + B_i^T(\boldsymbol{E}\lambda_ix_j^T)_{est}\bigr] \tag{26}$$

5) それぞれの隣接する系統 j に対して, あるステップ γ とした時, $L_{ij}^{(k+1)} = L_{ij}^{(k)} - \gamma G_{ij}$ とする.

6) $t_{k+1} = t_k + 1$ とし, k を 1 ずつ増やし, そして 1) に戻る.

ここで N は反復回数とする. この制御系の特性としては系統が線形であることが挙げられ, 既存の系統に新たな系統を導入しても基本的な計算は変わらないので追加が容易となる.

4. 電力ネットワークの系統周波数制御

4.1 電力系統モデル

想定する電力ネットワークを以下の Fig.2 とする. 4 つの電力系統の構成は同じと仮定し, 系統内にはガスタービン発電機, 風力発電があり, これらの発電設備により電力需要に対して電力供給を行う. 電力系統の周波数制御として TBC 方式を用い, 他系統との潮流を考慮し系統周波数の周波数変動 Δf を零に近づけるようにガスタービン発電機出力を制御する. Fig.2 の電力ネットワークを周波数解析モデルに適用すると Fig.3 のように表すことができる. 本稿では一つの系統容量を 40MW として, 単位法における基準値としている.

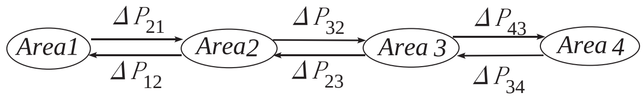

Fig. 2 Power networks of the system

本稿では需要側に分散配置された大容量負荷は消費電力制御を行うため可制御とみなし, 可制御負荷として電気温水器 (ヒートポンプ等) 及び蓄電池 (電気自動車等) を用いる. それぞれ系統容量の 5%, 15% とする. また本稿ではヒートポンプ群 , 電気蓄電池群を 1 次遅れ系で模擬し, ヒートポンプ群及び蓄電池群の容量に関しては考えないものとし, 全ての可制御群が一定の特性の動作をするものとする. ここで時定数 T_H は 4[s] とし, T_E は 0.2[s] とする.

Fig.3 中の ΔP_{gi}, Δx_{gi}, ΔP_{W_i}, ΔP_{Li}, ΔP_{Ei}, ΔP_{Hi}, ΔP_{tie_i} はそれぞれエリア i のガスタービン発電機の出力電力, ガスタービンのガバナー入力, 風力発電出力電力, 可制御負荷以外の全ての負荷消費電力, 蓄電池システム群の充放電の電力, ヒートポンプ群の消費電力, 連系線潮流の変動とする. (27) 式の ΔP_i はエリア i の発電電力と消費電力の供給誤差を表す. 系統内で発生した供給誤差より Fig.4 に示すブロックで周波数変動 Δf が計算できる. ここではエリアごとの発電機がすべて完全同期運転を行っていると仮定すると, Fig.4 にのように系統内の全ての発電機を統合した 1 台の等価的なモデルで表現することができる [10].

$$\Delta P_i = \Delta P_{gi} + \Delta P_{Wi} - \Delta P_{Li} + \Delta P_{tie\ i} + \Delta P_{Ei} - \Delta P_{Hi} \tag{27}$$

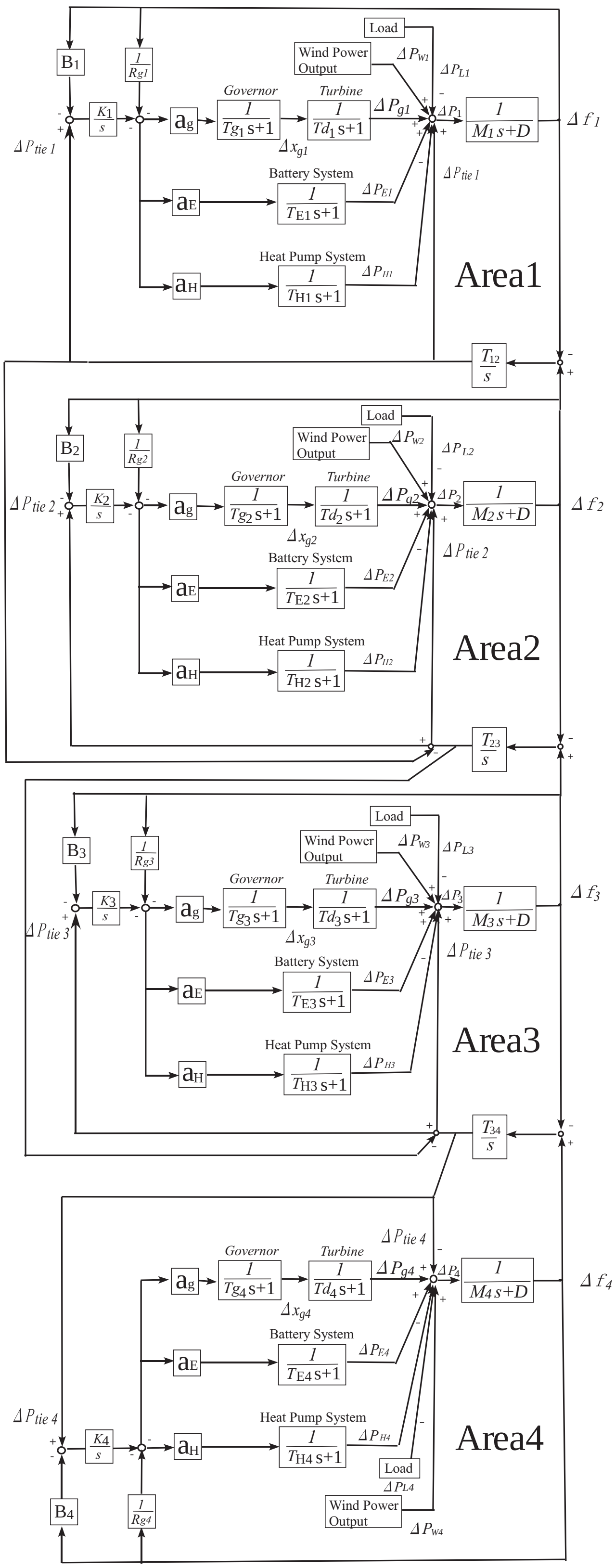

Fig. 3 Frequency analysis model

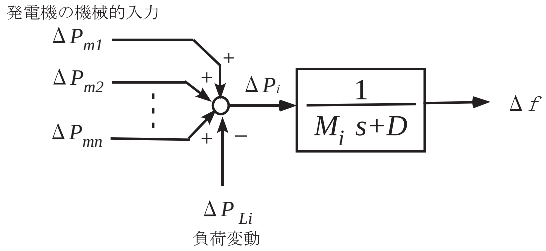

Fig. 4 Equivalent generator model of multi-generator system

エリア i の潮流変動は隣接するエリアを j とすると, $\Delta P_{tie_i} = T_{ij}(\Delta f_j - f_i)$ と表わされ, 地域要求量 (AR) は $AR_i = \Delta P_{tie_i} - B_i \Delta f_i$ で表わされるものとし, $U_{AR_i} = \int AR_i \, dt$ と定義する. また LFC 信号は PI 制御によって求め, 各発電機の比率で振り分けるようにした. a_g, a_E, a_H はそれぞれガスタービン, 蓄電池群, ヒートポンプ群の系統容量の比率とし $a_g + a_E + a_H = 1$ を満たす. ここで B_i, T_{ij}, R_g はそれぞれ周波数バイアス, 同期化係数, 速度調定率とする.

4.2 電力ネットワークの状態空間表現

N 系統 $(1 \leq i \leq N)$ からなる電力系統を状態空間表現すると (28) 式のようになる. ここで $x_c(t) = [x_1^T(t), \cdots, x_N^T(t)]^T \in R^{7N}$, $u_c(t) = [u_1^T(t), \cdots, u_N^T(t)]^T \in R^{7N}$, $A_c = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix}$, $B_c = \mathrm{diag}[B_{11}, \cdots, B_{NN}]$ とする.

$$\dot{x} = A_c x(t) + B_c u(t) + w(t) \tag{28}$$

各行列要素の構成は以下で与えられる.

$$x_i = \begin{bmatrix} \Delta P_{tie_i} \\ \Delta f_i \\ \Delta P_{g_i} \\ \Delta x_{vg_i} \\ \Delta P_{E_i} \\ \Delta P_{H_i} \\ U_{AR_i} \end{bmatrix}, \; B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{gi}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Ei}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{Hi}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{29}$$

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -\sum_{j \in E_i} T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_i} & -\frac{D}{M_i} & \frac{1}{M_i} & 0 & \frac{1}{M_i} & -\frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{di}} & \frac{1}{T_{di}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{gi}R_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 & 0 & \frac{a_g K_i}{T_g} \\ 0 & -\frac{1}{T_{Ei}R_{gi}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Ei}} & 0 & \frac{a_E K_i}{T_E} \\ 0 & -\frac{1}{T_{Hi}R_{gi}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Hi}} & \frac{a_H K_i}{T_H} \\ 1 & -B_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{30}$$

$$A_{ij} = A_{ji} = \begin{bmatrix} 0 & T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{if} \;\; (i,j) \in E \tag{31}$$

$$A_{ij} = \mathbf{0} \quad \text{if} \;\; (i,j) \notin E \tag{32}$$

ここで, A_{ij} は他系統との干渉項となっている. また (28) 式を離散時間で扱うため, サンプリング時間 $T_s = 1.0$[s] として $A = \exp(A_c T_s)$, $B = \int_0^{T_s} \exp(A\tau) d\tau \cdot B_c$ として変換した.

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \tag{33}$$

本稿では Fig.2 のような電力ネットワークについて制御を行う. $w(t)$ は白色雑音とし, $10^{-4} \times I$ の大きさで与える. 白色雑音は外乱として状態に加わるとし, 負荷変動, 風力発電の変動, その他の白色性の雑音を想定している. 制御目的は次式の評価関数を最小化することを目的とし, 制御入力は $u = -Lx$, $Q = 0.1 \times I$, $R = I$ とする.

$$J(L) = \boldsymbol{E}(|x|_Q^2 + |u|_R^2) \tag{34}$$

シミュレーションでは全てのコントローラが全く同一の情報を得る場合, つまり集中制御と見なせる場合 (Centralized Control), 及びコントローラが隣接する系統の情報を交換し使用できる場合 (Distributed Control), コントローラ間の情報交換がない場合 (Decentralized Control) で比較する. Decentralized Control とは Fig.5 のように構成される分散制御でコントローラ間の情報交換がない. 一方 Distributed Control は Fig.6 のような構造でコントローラ間でプラント情報の交換を行う分散制御のことを指す. ここでは Decentralized Control と Distributed Control は状態フィードバックゲインを反復的に計算し, 逐次的にゲインを更新する. Centralized Control は固定最適フィードバックゲインを用いる. また反復時間 N は 5 とする. シミュレーション条件は以下の Table 1 とする.

Table 1 Parameters of Powernetwork

Parameter	Symbol	Value	Unit
inertia constant	M	0.20	puMW・s/Hz
damping constant	D	0.26	puMW/Hz
governer time constant	T_g	0.20	s
gas turbine constant	T_d	5.0	s
BESS time constant	T_E	0.20	s
HP time constant	T_H	4.5	s
Regulation constant	R_g	2.5	Hz/pu MW
Synchronising coefficient	T_{ij}	0.50	pu MW

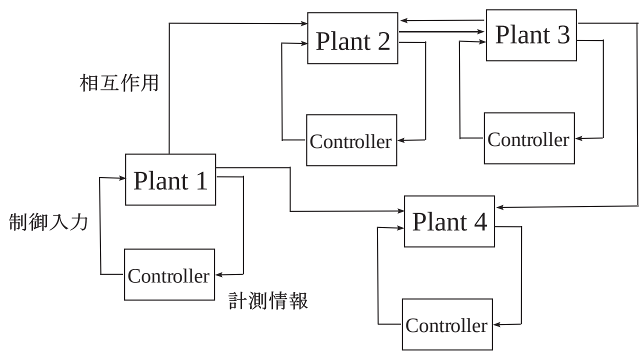

Fig. 5 Decentralized Control

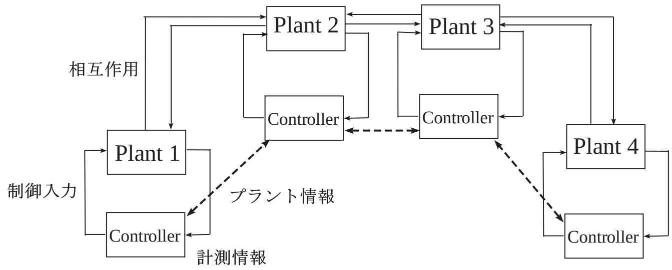

Fig. 6 Distributed Control

4.3　シミュレーションによる検証

4.3.1　Centralized Control, Decentralized Control と Distributed Control との比較

本節では Centralized Control と Decentralized Control と Distributed Control の比較を行う．シミュレーションは Matlab 2007a の環境で, サンプリング時間 1[s] の固定ステップで 500[s] 行った．シミュレーション結果は Fig.7-Fig.12 となっており, Fig.7-Fig.9 の緑の一点鎖線は Centralized Control, 赤の破線は Decentralized Control, そして青の実線は Distributed Control を表している．Fig.7 はエリア 1 から 4 の連系線潮流変動, Fig.8 はエリア 1 から 4 の周波数変動, Fig.9 はエリア 1 から 4 のガスタービンの出力変動, Fig.10 はエリア 1 から 4 の蓄電池群の出力の変動, Fig.11 はエリア 1 から 4 のヒートポンプ群の電力消費変動の結果である．Centralized Control, Decentralized Control, Distributed Control のいずれも各状態量を安定化できている．連系線潮流変動は各エリアの状態への雑音, 負荷変動に対して応援電力を送り出し相手系統の周波数制御に協力しており, 周波数変動は各エリアとも良好に安定化されており, ガスタービン, 可制御負荷は安定的に出力変動できていることが分かる．Decentralized Control と Distributed Control を比較すると Distributed Control の方が性能が良くなっている．Fig.12 はそれぞれ Distributed Control の逐次的に更新されたフィードバックゲインを表している．

4.3.2　評価関数を用いた解析

Centralized Control と Decentralized Control と Distributed Control の評価関数の比較結果を Fig.13 とする．結果としては Decentralized Control, Distributed Control, Centralized Control, の順に評価関数が低くなっている．評価関数からは Centralized Control が一番性能が良くなっていることが分かる．しかし電力ネットワークが大規模化するほど全てのコントローラが同一の情報を得る集中型の制御を行うことは難しくなるので, 分散的に制御することが望まれる．Distributed Control と Decentralized Control を比較すると前者の方が性能が良くなっている．しかし実際には Distributed Control は情報交換をするコストなども考える必要があると考えられる．

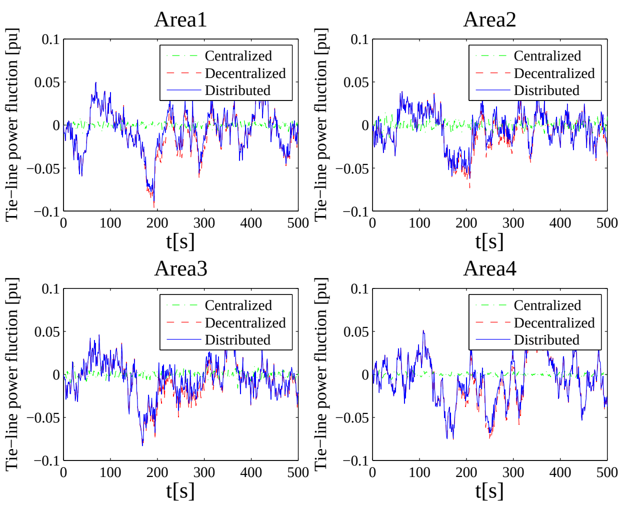

Fig. 7　Tie line power flow

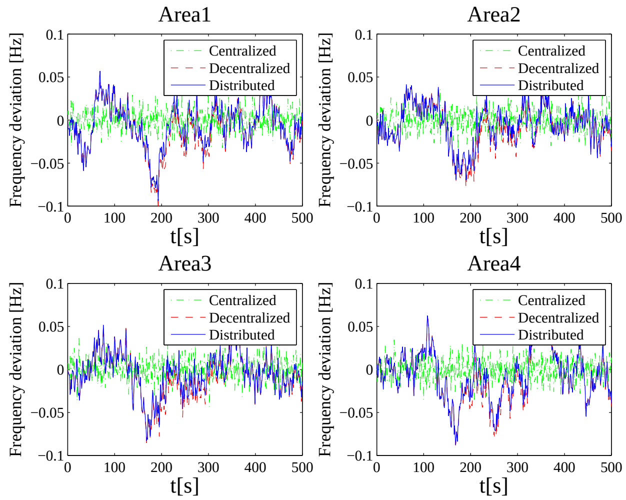

Fig. 8　System frequency

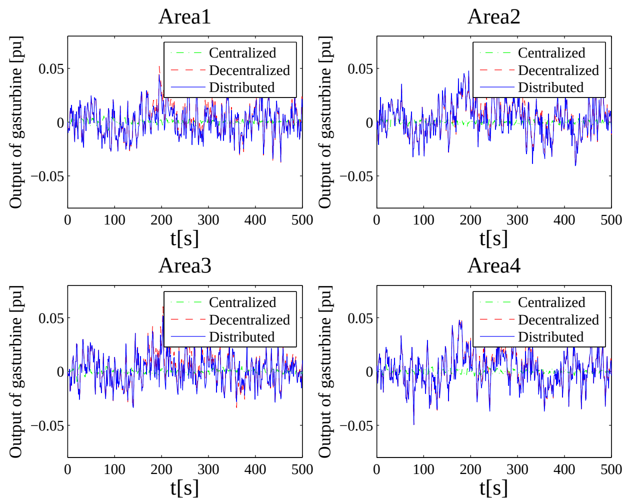

Fig. 9　Output power of gas turbine

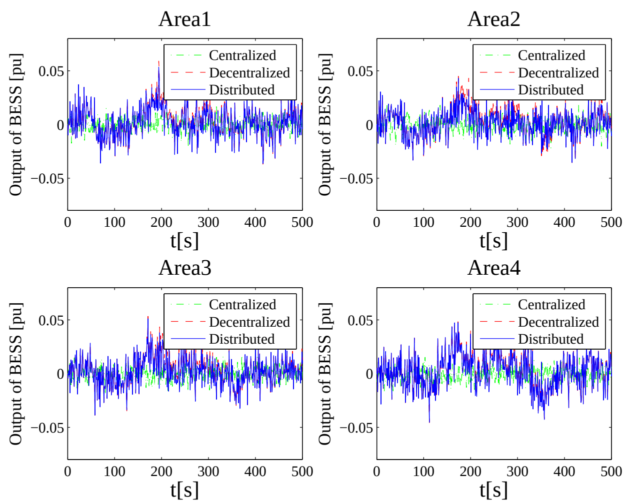

Fig. 10　Battery energy storage system

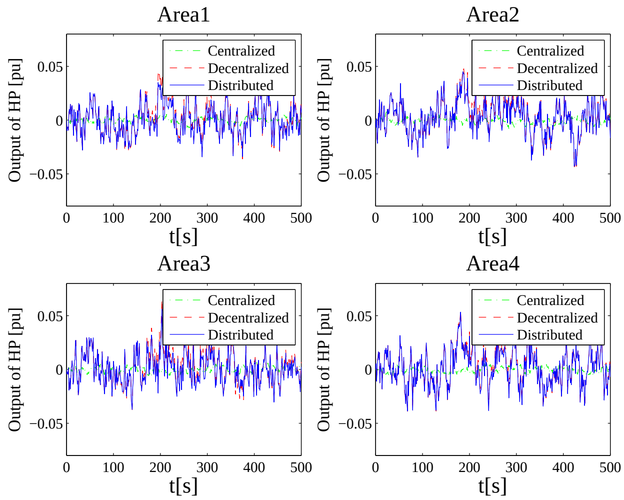

Fig. 11　Heat pump based water heater

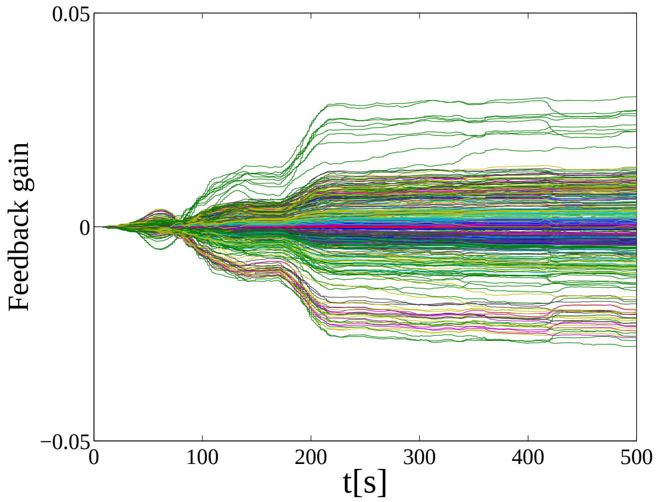

Fig. 12　Feedback gain of distributed control

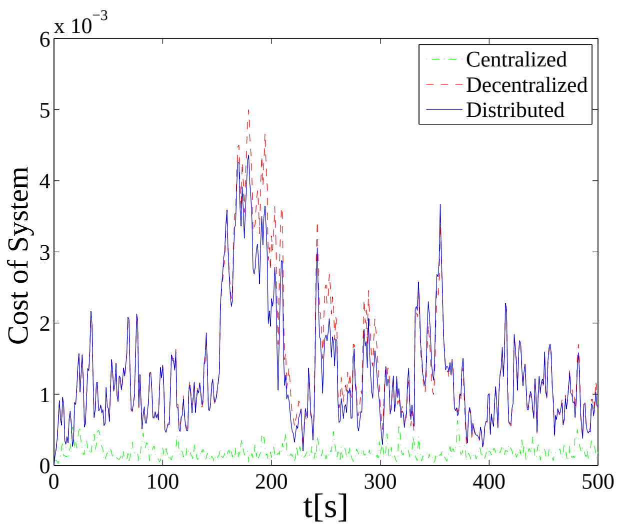

Fig. 13　Cost of centralized control and decentralized control and distributed control

5.　おわりに

本稿では, 分散型電源を導入した電力ネットワークシステムに対して, 反復勾配法に基づく分散制御を用いた系統周波数制御を行った．具体的には勾配法を反復的に用いることによって逐次的に状態フィードバックゲインを更新し, 負荷変動, 風力発電の出力変動, を想定した白色性雑音に対して安定化できることを示し, Centralized Control と Decentralized Control, および Distributed Control の比較を行い反復勾配法を用いた分散制御の有効性を検証した．

提案した手法の利点としては, 新たに系統を加える場合, 新たに加える系統に隣接する系統のコントローラの変更のみで良いことが挙げられる．今後の課題としてはより現実的な制約を考えていく必要がある．

文　献

(1) Yu-Chi Ho and Kai-Ching Chu, Team decision theory and information structures in optimal control problems-Part 1, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 17, No.1, (1972), 15-22.

(2) Nils R. Sandle and Michael Athans, Solution of some nonclassical LQG stochastic decision problems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 19, No. 2, (1974), 108-116.

(3) Karl Martensson and Anders Rantzer, Gradient methods for iterative distributed control synthsis, *Proceeding of 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, (2009), 549-554.

(4) M.Rotkowitz and S.Lall, A Characterization of Convex Problems in Decentralized Control, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 51, No. 2, (2006), 274-286.

(5) A.Rantzer, Linear Quadratic Team Theory Revisited, *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control Conference*, (2006), 1637-1641.

(6) Charles E. Fosha e Olle I.Elgerd, The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory, *IEEE Transactionss on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 4, (1970).

(7) 有田 征史, 横山 明彦, 多田 泰之, FFC-TBC 系統連系での蓄電池による連系線潮流変動抑制に関する基礎検討, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 7, (2008).

(8) 入江 寛, 横山 明彦, 多田 泰之, 大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 3, (2010).

(9) 千住 智信, 德留 元樹, 興那 篤史, 船橋 俊久, 小規模系統び分散配置された可制御負荷による系統周波数制御法, 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 9, (2009).

(10) P. Kunder, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, (1994).