

重複情報を含む 2 つのサブシステムの分散制御を用いた 電力ネットワークの系統周波数制御

末廣友晴 滑川徹 (慶應義塾大学)

Decentralized Control of Two Subsystems with Overlapping Information for Load Frequency of Power Networks

*T. Suehiro and T. Namerikawa (Keio Univ.)

Abstract— We propose a decentralized control of two subsystems with overlapping information for load frequency of power networks introducing distributed power generations. The control objective is to minimize the cost function of load frequency control problem. We expand the state space of the system of power networks and propose a decentralized state feedback control of subsystems including estimation and adjustment of estimation error. Then, we show the effectiveness of the load frequency control by using the proposed decentralized control method through the simulation result of decentralized large scale power network systems.

Key Words: Decentralized Control, Distributed Power Generations, Load Frequency, Overlapping Decomposition, Power Network

1 はじめに

1970 年代に状態方程式に基づく現代制御理論が成熟の時期を迎えるが、当時、大規模システムに対する系統的な制御法への期待や需要が高まり、分散制御の研究が盛んに行われるようになった^{1, 2)}。1970 年代以降も分散制御の研究は進められてきた^{3, 4)}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、移動体群のフォーメーション問題など、新たな大規模システムが現れ、そのシステムに対する制御法が期待され、再び分散制御への関心が高まっている^{5, 6, 7, 8)}。

特に、エネルギー問題や地球温暖化が世界的な問題として取り上げられており、太陽光発電や風力発電などの分散型電源の導入が進んでいる。しかし、これらの分散型電源の既存の電力網への導入は、系統の周波数変動や電圧変動を引き起こす要因となり、安全性を保ちながら系統内の発電機をうまく協調させ、発電を行う必要があり、制御技術や IT 技術を駆使したスマートグリッドの構築が考えられている。電力網の制御は以前から行われているが、研究の中心は火力発電や水力発電であった⁹⁾。最近では、風力発電や太陽光発電、大容量蓄電池、ヒートポンプなどの分散型電源を導入した系統の周波数制御に関して、盛んな研究がされている^{10, 11, 12)}。文献¹³⁾では、電力網を情報構造を持つシステムとして状態空間で表現し、反復勾配法を用いた分散制御を電力網に適用し、有効性が示されている。

電力網の分散制御に関しては、系統間の潮流を重複情報として扱い、システムの拡大・縮小を用いると有効であることが示されているが⁴⁾、各系統が自らの情報と潮流のみを扱うものであり、また、当時は分散型電源についての考慮はされていなかった。また、1 つ目のサブシステムが自らの情報のみを扱い、2 つ目のサブシステムからの影響を受けず、2 つ目のサブシステムが 1 つ目のサブシステムからの影響を受け、自らの情報と相手の情報を扱うようなシステムにおいて最適な分散制御則が示されているが⁸⁾、共有できる情報がある場合は考えられておらず、具体的な適用例は示されていない。

そこで、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、重複情報を含む 2 つのサブシステムの分散制御を用いた系統周波数制御法を提案する。周波数制御問題に対して、重複分割によってシステムを拡大し、状態の推定および推定の修正を含んだ状態フィードバックを求める。そして、分散型電源を導入した電力ネットワークモデルに対し提案手法を適用し、シミュレーションにて有効性を示す。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。

2 分散システムの表現および問題設定

本稿では 2 系統からなる電力ネットワークを考える。ここで、電力系統全体は (1) 式の LTI システムで表されるとする。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

ただし、時刻 $k \in \mathbb{Z}_+$ 、状態 $x \in \mathbb{R}^n$ は $x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$, $x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$, $x_3 \in \mathbb{R}^{n_3}$ から構成されており、次を満たすとす。

$$x = [x_1^T, x_2^T, x_3^T]^T \quad (2)$$

$$n = n_1 + n_2 + n_3 \quad (3)$$

また、入力 $u \in \mathbb{R}^m$ は $u_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$, $u_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ から構成されており、 m は次を満たすとす。

$$u = [u_1^T, u_2^T]^T \quad (4)$$

$$m = m_1 + m_2 \quad (5)$$

行列 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ は次のように表される。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_{32} \end{bmatrix} \quad (6)$$

この表現において、電力系統 1 の状態は x_1 、電力系統 2 の状態は x_3 であり、状態 x_2 は 2 系統間の相互作用を表している。また、2 つの制御入力 u_1, u_2 は、それぞれの系統にのみ与えられる。

電力系統 1 は状態 x_1 および状態 x_2 を測定できるとし、電力系統 2 は状態 x_1 , 状態 x_2 , 状態 x_3 のすべてを計測できるとする. このシステムに対して, 電力系統 1 は状態 x_1 , 状態 x_2 をもとに制御入力を決定し, 電力系統 2 は状態 x_1 , 状態 x_2 , 状態 x_3 をもとに制御入力を決定するような分散的な状態フィードバックを用いる. ここで, フィードバック制御則を求めるために, 次のような評価関数を定義する.

$$J(x_0, u) = \sum_{k=0}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) \quad (7)$$

ただし, x_0 はシステムの初期状態, $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は半正定, $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は正定とし, $Q_1 \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, $Q_2 \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$, $Q_3 \in \mathbb{R}^{n_3 \times n_3}$, $R_1 \in \mathbb{R}^{m_1 \times m_1}$, $R_2 \in \mathbb{R}^{m_2 \times m_2}$ を用いて次のように表せるとする.

$$Q = \text{diag}\{Q_1, Q_2, Q_3\}, \quad R = \text{diag}\{R_1, R_2\} \quad (8)$$

3 重複情報を含む 2 つのサブシステムの分散制御

3.1 システムの拡大

フィードバック制御則を求めるために, システムの拡大を行う. (1) 式のシステムを φ として φ に対応する評価関数 (7) 式の組み合わせを (φ, J) と表現する. (φ, J) に対して拡大したシステムの組み合わせ $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ を考える. まず, 状態 x を 2 つの重複する要素に分割する.

$$\tilde{x}_1 = (x_1^T, x_2^T)^T, \quad \tilde{x}_2 = (x_2^T, x_3^T)^T \quad (9)$$

また, \tilde{x} を次のように表す.

$$\tilde{x} = (\tilde{x}_1^T, \tilde{x}_2^T)^T \quad (10)$$

拡大したシステム $\tilde{\varphi}$ は次のように表される.

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}u(k) \quad (11)$$

$\tilde{x}(t) \in \mathbb{R}^{\tilde{n}}$ はシステム $\tilde{\varphi}$ の状態であり, $\tilde{A} \in \mathbb{R}^{\tilde{n} \times \tilde{n}}$, $\tilde{B} \in \mathbb{R}^{\tilde{n} \times m}$ は定数行列である. $\tilde{n} = n_1 + 2n_2 + n_3$ である. 対応する評価関数は,

$$\tilde{J}(\tilde{x}_0, u) = \sum_{k=0}^{\infty} (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + u^T \tilde{R} u) \quad (12)$$

を設定する. \tilde{x}_0 はシステム $\tilde{\varphi}$ の初期状態, $\tilde{Q} \in \mathbb{R}^{\tilde{n} \times \tilde{n}}$ は半正定, $\tilde{R} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は正定とし, $\tilde{Q}_1 \in \mathbb{R}^{(n_1+n_2) \times (n_1+n_2)}$, $\tilde{Q}_2 \in \mathbb{R}^{(n_2+n_3) \times (n_2+n_3)}$, $\tilde{R}_1 \in \mathbb{R}^{m_1 \times m_1}$, $\tilde{R}_2 \in \mathbb{R}^{m_2 \times m_2}$ を用いて次のように表せるとする.

$$\tilde{Q} = \text{diag}\{\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2\}, \quad \tilde{R} = \text{diag}\{\tilde{R}_1, \tilde{R}_2\} \quad (13)$$

ここで, 次のような線形変換を考える.

$$\tilde{x} = Vx \quad (14)$$

$V \in \mathbb{R}^{\tilde{n} \times n}$ は列フルランクとする. この V を用いて, システムの拡大・縮小を定義をする.

定義 1 ⁴⁾ 次のようなとき, $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ は (φ, J) を含む.

$$\tilde{x}_0 = Vx_0 \quad (15)$$

であるような V が存在して次の 2 式を満たす.

$$x(t; x_0, u) = U\tilde{x}(t; \tilde{x}_0, u), \quad \text{for all } t \geq 0 \quad (16)$$

$$J(x_0, u) = \tilde{J}(x_0, u) \quad (17)$$

ただし, U は V の一般化逆行列 ($U = (V^T V)^{-1} V^T$) であり, U, V は $UV = I$ を満たす.

$(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ が (φ, J) を含んでいるとき, $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ は (φ, J) の拡大, (φ, J) は $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ の縮小であると表現する.

M, N, M_Q, N_R は適切な次元の補助行列を用いて, $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ と (φ, J) に関する行列を次のように関連付ける.

$$\tilde{A} = VAU + M \quad (18)$$

$$\tilde{B} = VB + N \quad (19)$$

$$\tilde{Q} = U^T QU + M_Q \quad (20)$$

$$\tilde{R} = R + N_R \quad (21)$$

このとき, システムの包含の条件は, 次の定理で表される.

定理 1 ⁴⁾ $(\tilde{\varphi}, \tilde{J})$ が (φ, J) を含むのは, 次の 2 つのうちどちらかを満たすときである.

(i) 次の 4 式を満たす.

$$MV = 0 \quad (22)$$

$$N = 0 \quad (23)$$

$$V^T M_Q V = 0 \quad (24)$$

$$N_R = 0 \quad (25)$$

(ii) $i = 1, 2, \dots, \tilde{n}$ に対して次の 5 式を満たす.

$$UM^i V = 0 \quad (26)$$

$$UM^{i-1} N = 0 \quad (27)$$

$$M_Q M^{i-1} V = 0 \quad (28)$$

$$M_Q M^{i-1} N = 0 \quad (29)$$

$$N_R = 0 \quad (30)$$

今回は定理 1 の (i) を満たすように, 次のように行列を選択する.

$$V = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}I_2 & \frac{1}{2}I_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$N = 0, \quad M = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}A_{12} & -\frac{1}{2}A_{12} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}A_{22} & -\frac{1}{2}A_{22} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}A_{22} & \frac{1}{2}A_{22} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}A_{32} & \frac{1}{2}A_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$N_R = 0, \quad M_Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}Q_2 & -\frac{1}{4}Q_2 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{4}Q_2 & \frac{1}{4}Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

I_1, I_2, I_3 は x_1, x_2, x_3 に対応する次元の単位行列とする。このとき、システム $\tilde{\varphi}$ の行列 \tilde{A}, \tilde{B} は次のようになる。

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} \\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{11} & \tilde{B}_{12} \\ \tilde{B}_{21} & \tilde{B}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} \quad (35)$$

3.2 2つのサブシステムの分散制御

拡大したシステム $\tilde{\varphi}$ に対し、次のようなシステム $\tilde{\varphi}_D$ を対応させる。

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}_D \tilde{x}(k) + \tilde{B}_D u(k) \quad (36)$$

ただし、 \tilde{A}_D, \tilde{B}_D は次のように表されるとする。

$$\tilde{A}_D = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & 0 \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 \\ A_{21} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\tilde{B}_D = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{11} & 0 \\ \tilde{B}_{21} & \tilde{B}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} \quad (38)$$

システム $\tilde{\varphi}_D$ に対応する評価関数は (17) 式とする。サブシステム 1 の状態を \tilde{x}_1 , サブシステム 2 の状態を \tilde{x}_2 とする。サブシステム 1 が \tilde{x}_1 のみを観測し、サブシステム 2 が \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 を観測するときのシステム $\tilde{\varphi}_D$ における最適な分散制御則は次の定理で表される。

定理 2⁸⁾ X を以下のリカッチ方程式の一意に決まる解とする。

$$X = \tilde{Q} + \tilde{A}_D^T X \tilde{A}_D - \tilde{A}_D^T X \tilde{B}_D (\tilde{R} + \tilde{B}_D^T X \tilde{B}_D)^{-1} \tilde{B}_D^T X \tilde{A}_D \quad (39)$$

\tilde{K} を以下のように定義する。

$$\tilde{K} = (\tilde{R} + \tilde{B}_D^T X \tilde{B}_D)^{-1} \tilde{B}_D^T X \tilde{A}_D \quad (40)$$

同様に、 Y を以下のリカッチ方程式の一意に決まる解とする。

$$Y = \tilde{Q}_2 + \tilde{A}_{22}^T Y \tilde{A}_{22} - \tilde{A}_{22}^T Y \tilde{B}_{22} (\tilde{R}_2 + \tilde{B}_{22}^T Y \tilde{B}_{22})^{-1} \tilde{B}_{22}^T Y \tilde{A}_{22} \quad (41)$$

また、 \tilde{J} を以下のように定義する。

$$\tilde{J} = (\tilde{R}_2 + \tilde{B}_{22}^T Y \tilde{B}_{22})^{-1} \tilde{B}_{22}^T Y \tilde{A}_{22} \quad (42)$$

このとき、分散制御則は次のようになる。

$$u_1(k) = -\tilde{K}_{11} \tilde{x}_1(k) - \tilde{K}_{12} \eta(k) \quad (43)$$

$$u_2(k) = -\tilde{K}_{21} \tilde{x}_1(k) - \tilde{K}_{22} \eta(k) + \tilde{J}(\eta(k) - \tilde{x}_2(k)) \quad (44)$$

$$\eta(k+1) = (A_K)_{21} \tilde{x}_1(k) + (A_K)_{22} \eta(k) \quad (45)$$

である。ただし、 $A_K = A_D - B_D \tilde{K}$ である。 $\eta(k)$ は \tilde{x}_1 から計算される $\tilde{x}_2(k)$ の推定値である。

3.3 状態フィードバック制御則の縮小

求めた状態フィードバック制御則を状態と推定の部分に分けて表すと、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & 0 \\ \tilde{K}_{21} & \tilde{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{22} - \tilde{J} \end{bmatrix} \eta(k) \quad (46)$$

$$\eta(k+1) = (A_K)_{21} \tilde{x}_1(k) + (A_K)_{22} \eta(k) \quad (47)$$

元のシステムとの対応関係を考えると、上記の分散制御則は次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (\tilde{K}_{11})_1 & (\tilde{K}_{11})_2 & 0 & 0 \\ (\tilde{K}_{21})_1 & (\tilde{K}_{21})_2 & \tilde{J}_1 & \tilde{J}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{22} - \tilde{J} \end{bmatrix} \eta(k) \quad (48)$$

$$\eta(k+1) = (A_K)_{21} \tilde{x}_1(k) + (A_K)_{22} \eta(k) \quad (49)$$

状態に関する部分を元のシステムに縮小させると、

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (\tilde{K}_{11})_1 & (\tilde{K}_{11})_2 & 0 \\ (\tilde{K}_{21})_1 & (\tilde{K}_{21})_2 & \tilde{J}_1 & \tilde{J}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{22} - \tilde{J} \end{bmatrix} \eta(k) \quad (50)$$

$$\eta(k+1) = (A_K)_{21} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + (A_K)_{22} \eta(k) \quad (51)$$

となる。

4 電力ネットワークの系統周波数制御

4.1 電力網モデル

本稿で用いる系統モデルを Fig.1 に示す。このモデルは電力網の周波数制御のうち、負荷周波数制御に該当するモデルであり、数分から 10 数分程度の動作点からの偏差を扱う。Area1 を風力発電を含む電力系統、Area2 をマイクログリッド群としている。このモデルは、発電機モデル、連系線モデル、火力プラントモデル、マイクロガスタービンモデル、蓄電池モデル、負荷変動モデル、風力出力変動モデル及びコントローラシステムモデルによって構成される。

4.1.1 発電機モデル

電力系統における需要と供給の関係は、発電機の機械的入力の変化量 $\Delta P_m(t)$ と電気的出力の変化量 $\Delta P_e(t)$ の関係であり、(52) 式によって表される。

$$M \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \Delta P_m(t) - \Delta P_e(t) \quad (52)$$

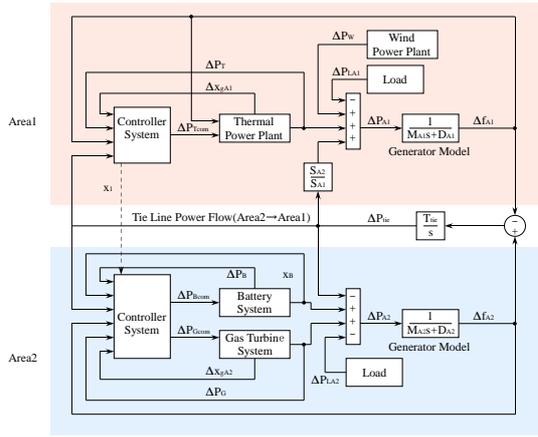


Fig. 1: Power Network Model

M は発電機の慣性定数であり、 $\Delta f(t)$ は発電機の回転速度偏差である。また、系統の周波数が変化すると回転機負荷の回転数が変化し、消費電力が変化する。これを負荷の周波数特性といい、(53) 式によって表される。

$$\Delta P_e(t) = \Delta P_L(t) + D\Delta f(t) \quad (53)$$

$\Delta P_L(t)$ は負荷変動であり、 D は負荷の周波数特性を表す係数である。さらに、系統内の発電機がすべて完全な同期運転を行っているとして仮定すると、発電機モデルは Fig.2 に示すような系統内のすべ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。 M_{eq} は等価的な 1 台の発電機の慣性定数である。

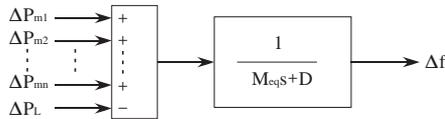


Fig. 2: Equivalent Generator Model

4.1.2 連系線モデル

Area2 から Area1 への潮流 $P_{tie}(t)$ は、直流法を用いると (54) のようになる。

$$P_{tie}(t) = \frac{1}{X_T}(\delta_{A2}(t) - \delta_{A1}(t)) \quad (54)$$

X_T は連系線のリアクタンスであり、 $\delta_{A1}(t)$ 、 $\delta_{A2}(t)$ は連系線両端の位相角である。よって $P_{tie}(t)$ の偏差 $\Delta P_{tie}(t)$ は Area1、Area2 の周波数偏差 $\Delta f_{A1}(t)$ 、 $\Delta f_{A2}(t)$ を用いると (55) 式のようにになる。

$$\Delta P_{tie}(t) = \frac{T_{tie}}{s}(\Delta f_{A2}(t) - \Delta f_{A1}(t)) \quad (55)$$

T_{tie} は同期化係数であり、50Hz 系統の場合 $T_{tie} = 100\pi/X_T$ である。

4.1.3 火力プラントモデル

本稿で用いる火力プラントモデルは、主蒸気系、プラント制御系、給水・燃料制御系の模擬はせず、タービン・ガバナ系を模擬したガバナ制御系のみからの構成とし、系統内のすべての火力発電機群を 1 台のモデルで模擬する。火力発電機のガバナ制御系モデルを Fig.3 に示す。

$\Delta P_{Tcom}(t)$ は発電量変更指令値、 R_{A1} は速度調達率、 T_{gA1} はガバナの時定数、 T_T はタービンの時定数である。

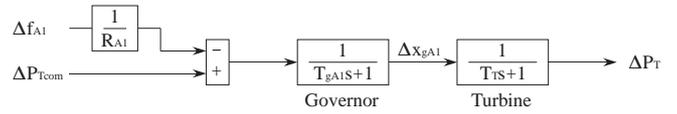


Fig. 3: Thermal Power Plant Model

4.1.4 マイクロガスタービンモデル

本稿で用いるマイクロガスタービンモデルは、火力プラントモデルと同様にタービン・ガバナ系を模擬したガバナ制御系のみからの構成とするが、ガバナフリー運転はしないものとし、系統内のすべてのマイクロガスタービン群を 1 台のモデルで模擬する。 $\Delta P_{Gcom}(t)$ は発電量変更指令値、 T_{gA2} はガバナの時定数、 T_G はタービンの時定数である。火力プラントに比べてマイクロガスタービンは応答性能が早く、 T_G が T_T より小さい。

4.1.5 蓄電池モデル

本稿で用いる蓄電池モデルは、一次遅れの伝達関数により蓄電池、インバータの遅れを模擬する。 $\Delta P_{Bcom}(t)$ は発電量変更指令値、 T_B はインバータの時定数である。また、電池の充電状態 $x_B(t)$ は充放電量 $\Delta P_B(t)$ と充放電効率 K_B を用いて次のように表される。

$$\dot{x}_B(t) = -K_B\Delta P_B(t) \quad (56)$$

4.1.6 負荷変動モデル

本稿で用いる負荷変動モデルは外乱として扱い、白色ノイズによって発生させたランダム変動のうち、負荷周波数制御が担当する対象周期以外の成分を除いたものを負荷変動とした。ゲインにより大きさを調節する。負荷変動モデルを Fig.4 に示す。

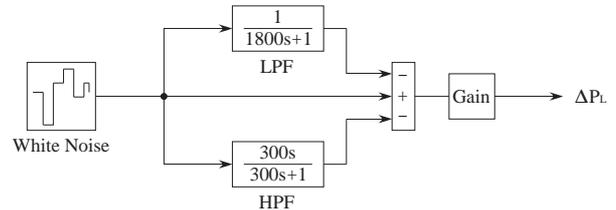


Fig. 4: Load Change Model

4.1.7 風力発電出力変動モデル

本稿で用いる風力発電出力変動モデルは負荷変動モデルと同様に外乱として扱う。白色ノイズによって発生させたランダム変動にローパスフィルタをかけたものを風力発電出力変動とした。ゲインにより大きさを調節する。風力発電出力変動モデルを Fig.5 に示す。

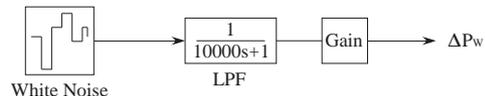


Fig. 5: Wind Power Plant model

4.1.8 コントローラモデル

各コントローラシステムでは、計測される状態を元に、地域要求量の積分値 $U_{A1}(t)$ 、 $U_{A2}(t)$ を計算する。Area1 は FFC 方式、Area2 は TBC 方式で計算する。

$$\dot{U}_{A1}(t) = -K_{A1}f\Delta f_{A1}(t) \quad (57)$$

$$\dot{U}_{A2}(t) = -K_{A2}f\Delta f_{A2}(t) - \Delta P_{tie}(t) \quad (58)$$

ただし, K_{A1} , K_{A2} は系統定数, f は基準周波数, $\Delta f_{A1}(t)$, $\Delta f_{A2}(t)$ は周波数偏差である.

Area2 のコントローラシステムでは, 発電量変更指令値 $\Delta P_{A2com}(t)$ を決定し, マイクロガスタービン, 蓄電池にそれぞれの定格出力 S_G , S_B の比で振り分けるようにした.

$$\Delta P_{Gcom}(t) = \frac{S_G}{S_G + S_B} \Delta P_{A2com}(t) \quad (59)$$

$$\Delta P_{Bcom}(t) = \frac{S_B}{S_G + S_B} \Delta P_{A2com}(t) \quad (60)$$

4.2 電力網モデルの状態空間表現

前節で設定した電力網モデルを状態空間表現で表すと (61) 式ようになる.

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + H w(t) \quad (61)$$

ただし,

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_{A1}(t) \\ \Delta P_T(t) \\ \Delta x_{gA1}(t) \\ U_{A1}(t) \\ \Delta P_{tie}(t) \\ \Delta f_{A2}(t) \\ \Delta P_G(t) \\ \Delta x_{gA2}(t) \\ x_B(t) \\ \Delta P_B(t) \\ U_{A2}(t) \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_{A1}(t) \\ u_{A2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{Tcom}(t) \\ \Delta P_{A2com}(t) \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$w(t) = \begin{bmatrix} w_{A1}(t) \\ w_{A2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_W(t) - P_{LA1}(t) \\ \Delta P_{LA2}(t) \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} A_{c11} & A_{c12} & 0 \\ A_{c21} & 0 & A_{c23} \\ 0 & A_{c32} & A_{c33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_{A1}}{M_{A1}} & \frac{1}{M_{A1}} & 0 & 0 & \frac{S_{A2}}{M_{A1} S_{A1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{1}{T_T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{gA1} R_{A1}} & 0 & -\frac{1}{T_{gA1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{A1} f & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -T_{tie} & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{tie} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_{A2}} & -\frac{D_{A2}}{M_{A2}} & \frac{1}{M_{A2}} & 0 & 0 & \frac{1}{M_{A2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_G} & \frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gA2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{A2} f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} B_{c11} & 0 \\ -\frac{1}{T_{gA1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{gA1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_G}{T_{gA2}(S_G + S_B)} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_B}{T_B(S_G + S_B)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{t11} & 0 \\ 0 & H_{c32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_{A1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (67)$$

である. サンプル時間 T で離散化すると, 次のようになる.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Hw(k) \quad (68)$$

制御目的は (69) 式の評価関数を最小化することとし, Area1 のコントローラシステムでは, 発電量変更指令値 $\Delta P_{Tcom}(t)$ を $x_1(t)$, $x_2(t)$ から決定し, Area2 のコントローラシステムでは, 発電量変更指令値 $\Delta P_{A2com}(t)$ を $x(t)$ から決定するものとする. 評価関数における設定は, $Q = \text{diag}\{100 \ 0 \ 0 \ 10 \ 10 \ 100 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0 \ 10\}$, $R = 5I$ とした.

$$J(x_0, u) = \sum_{k=0}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) \quad (69)$$

前章で導出した分散制御則を用いるために, 前章の (31) 式 ~ (33) 式で定義される行列を用いて外乱部分を除いたシステムの拡大をすと, 拡大後のシステム, 評価関数は次のようにあらわされる.

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}u(k) \quad (70)$$

$$\tilde{J}(\tilde{x}_0, u) = \sum_{k=0}^{\infty} (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + u^T \tilde{R} u) \quad (71)$$

ただし, それぞれの行列, 状態などは前章で定義されているものとする. 拡大したシステム $\tilde{\varphi}$ に対し, 次のようなシステム $\tilde{\varphi}_D$ を対応させ, このシステムに対し 2 つのサブシステムの分散制御則を求め, 元のシステムに対応するように縮小させ, 分散制御則を導出する. ただし, \tilde{A}_D , \tilde{B}_D は (37) 式, (38) 式のように表される.

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}_D \tilde{x}(k) + \tilde{B}_D u(k) \quad (72)$$

シミュレーションは提案した分散制御則を適用した時の電力の変動, 周波数の変動を確認し, 比較として提案した分散制御則と他の分散制御則, および集中制御則を適用した場合の評価関数の値を比べるものとした. シミュレーションのパラメータは Table 1 のように設定した.

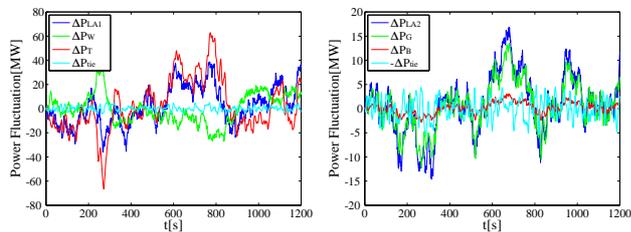
Table 1: Simulation Parameter

基準周波数 f [Hz]	50
Area1 系統容量 S_{A1} [MW]	3000
Area1 慣性定数 M_{A1} [s]	10
Area1 負荷周波数特性定数 D_{A1} [p.u.]	1
Area1 系統定数 K_{A1} [% MW]	0.1
Area1 火力プラントタービン時定数 T_T [s]	9
Area1 火力プラントガバナ時定数 T_{gA1} [s]	0.25
Area1 火力プラント速度調達率 R_{A1}	0.05
Area2 系統容量 S_{A2} [MW]	900
Area2 慣性定数 M_{A2} [s]	10
Area2 負荷周波数特性定数 D_{A2} [p.u.]	2
Area2 系統定数 K_{A2} [% MW]	0.1
Area2 ガスタービン時定数 T_G [s]	1
Area2 ガスタービンガバナ時定数 T_{gA2} [s]	1
Area2 蓄電池インバータ時定数 T_B [s]	1
Area2 ガスタービン定格容量 S_G [MW]	900
Area2 蓄電池定格容量 S_B [MW]	200
Area2 蓄電池充放電効率 K_B	0.94
同期化力定数 T_{tie} [s]	2.0
サンプル時間 T [s]	1

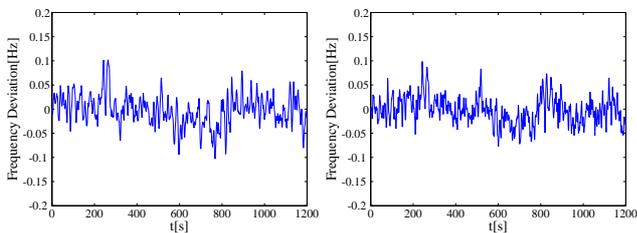
4.3 シミュレーションによる検証

4.3.1 電力変動と周波数偏差

シミュレーションは Matlab R2011a で、1200[s] まで行った。提案手法を適用したときの電力の変動と周波数偏差はそれぞれ Fig 6, Fig 7 のようになった。Fig 6 の (a) については、青色の線は Area1 の負荷変動、黄緑色の線は風力発電出力変動、赤色の線は火力発電出力変動、水色の線は Area1 と Area2 間の潮流変動を表している。Fig 6 の (b) については、青色の線は Area2 の負荷変動、黄緑色の線はガスタービン発電出力変動、赤色の線は蓄電池出力変動、水色の線は Area1 と Area2 間の潮流変動を表している。外乱である負荷、風力発電出力の変動に合わせて制御可能な火力発電、ガスタービン、および蓄電池の出力が変動しており、電力需給の不均衡を調整し、安定化しているのがわかる。潮流変動は各エリアの状態に対して応援電力を送り出し相手システムの周波数制御に協力しているのがわかる。また、Fig 7 より周波数変動は各エリアとも ± 0.2 [Hz] の内に保たれ、安定化されているのがわかる。



(a)Area1 (b)Area2
Fig. 6: Power Fluctuation



(a)Area1 (b)Area2
Fig. 7: Frequency Deviation

4.3.2 評価関数を用いた比較

$k=800$ [s] のときの評価関数の値は Fig 8 のようになった。ここで、Fig 8 において、C は提案手法、Cc は集中型制御手法、Co は文献⁴⁾の分散制御手法、Cd は提案手法において推定項に関する部分を削除した分散制御手法、Cp は集中型制御手法のフィードバック行列のうち、Area1 の制御入力で Area2 の状態に関係する部分を削除した分散制御手法である。提案手法は集中型制御手法に続いて評価関数の値が小さくなっていて、分散制御手法のうち一番性能が良くなっているのがわかる。集中型制御手法は性能は良いが、電力ネットワークが大規模複雑化すると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。

5 おわりに

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、重複情報を含む 2 つのサブシステムの分散制御を用いた系統周波数制御法を提案した。この手法は、状態の推定および推定の修正を含んでいるの

が特徴である。シミュレーションにて、分散型電源を導入した電力ネットワークモデルに対し提案手法を適用し、安定化できることを示し、集中制御則と他の分散制御則との比較を行い、分散制御手法における提案手法の有効性を検証した。

今後の課題としては、系統の数を増やした場合についての検討や制約の考慮などが挙げられる。

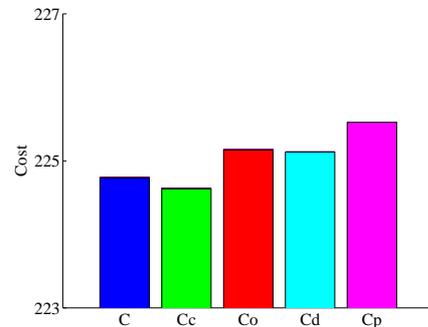


Fig. 8: Cost(k=800)

参考文献

- 1) Y. C. Ho and K. C. Chu, Team Decision Theory and Information Structures in Optimal Control Problems-Part I, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **AC-17-1**, 15/22 (1972)
- 2) D.D. Siljak, Stability of large-scale systems under structural perturbations, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **2-5**, 657/663 (1972)
- 3) 池田 雅夫, 分散制御と大規模システム: 再訪と最近の発展, *計測と制御*, **46-11**, 841/846 (2007)
- 4) M. Ikeda, D.D. Siljak, and D.E. White, Decentralized Control with Overlapping Information Sets, *Journal of optimization theory and Applications*, **34-2**, 280/310 (1981)
- 5) A. Rantzer, Linear Quadratic Team Theory Revisited, in *Proceedings of the American Control Conference*, 1637/1641 (2006)
- 6) M. Rotkowitz, Information structures preserved under nonlinear time-varying feedback, in *Proceedings of the American Control Conference*, 4207/4212 (2006)
- 7) M. Rotkowitz and S. Lall, A characterization of convex problems in decentralized control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **51-2**, 274/286, (2006)
- 8) J. Swigart and S. Lall, An explicit state-space solution for a decentralized two-player optimal linear-quadratic regulator, in *Proceedings of the American Control Conference*, 6385/6390 (2010)
- 9) Charles E.Fosha and Olle I.Elgerd, The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-89-4**, 563/578 (1970)
- 10) 高木 雅昭, 山本 博巳, 山地 憲治, 系統連系されたプラグインハイブリッド車の充電制御による風力発電連系可能量の評価, *電気学会論文誌 B*, **128-12**, 1513/1521, (2008)
- 11) 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*, **128-7**, 953/960 (2008)
- 12) 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*, **130-3**, 338/346 (2010)
- 13) 加藤 太一郎, 滑川 徹, 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, 第 53 回自動制御連合講演会, 1085/1090 (2010)