負荷推定と演算時間遅れとを考慮した地域分割形負荷周波数制御方式

正員 Vichit Avatchanakorn (東海大)

正員 水谷芳史 (東海大)

1. ま え が き

電力系統の負荷周波数制御 (LFC) は、現在、古典制御に基づく PI 形フィードバック制御からなる周波数偏倚連系線電力制御 (TBC)、定周波数制御 (FFC) などの制御法が実施されている。そして、周波数偏差については、十分な制御効果をあげている。しかしながら、近年、電力系統が大規模化するに伴い、連系線電力潮流は常時変動潮流が大きくなりすぎたり、朝あるいは昼間などの負荷急変時に潮流の変動が目立つなどの問題が表面化してきている⁽¹⁾。

これらの問題を解決するために、現代制御理論を適用した研究が数多く報告されている^{(2)~(10)}。これら従来の手法では、LFC の目標を満足させるため二つの主なる方法が提案されてきた。その一つは、(i)従来の TBC 制御を期待し、地域制御誤差 (ACE) を積分した、いわゆる積分制御を考慮した最適制御である。もう一つは、(ii)最適制御を実施した LFC 系において、電力平衡方程式に基づく微分近似⁽⁷⁾、オブザーバ理論⁽⁷⁾、疑似逆行列、最小二乗法⁽⁸⁾などを用いて負荷変動量を推定し、LFC の制御目標を達成させようとする制御手法である。

しかしながら、(i)においては積分制御を用いることによる制御の速応性が失われたり、行き過ぎが生じるという一般的な欠点がある。また更に、調整用発電所に設けられた発電電力の増加率制限にかかるような比較的大きな負荷変動が生じた場合、リミッタなどからなる適応制御器を用いる必要性がある⁽⁵⁾。(ii)においては、負荷外乱の推定機構を含めた安定性と最適性

とを保証した制御体系の開発がなされていないものと思われる。

本論文は、これらを解決するため各地域で積分制御を用いる代わりに、電力平衡方程式に基づく負荷推定法を開発採用する。従来、提案された文献⁽⁷⁾の電力平衡方程式に基づく負荷推定法による LFC は、連続形制御である。この負荷推定も、連続時間積分を含む形をとっており、離散形 LFC にそのまま採用することは困難と思われる。そこで本論文では、各地域で自地域の情報のみを用い、制御情報伝送時間ならびに制御操作量決定時間からなる遅れ時間 (以下、演算時間遅れと呼ぶ) を考慮し、電力平衡方程式に基づく新しい離散形負荷推定方法を開発している。そして、この負荷推定値を状態変数として取扱い、その値を発電所の出力設定値として用いる出力設定方式を提示する。そして更に、この出力設定方式と演算時間遅れとを考慮し、各地域で最適な出力フィードバック制御を実施する実用的な LFC を提案している。また、調整用発電所に設けられた発電電力の増加率制限にかかるような比較的大きな負荷変動が生じた場合に対して、本手法はリミッタなどからなる適応制御器を用いず、満足した応答を示すことも考察している。

すなわち、本論文で提案する LFC 方式は、(ii)に属する負荷周波数制御方式の一つと考えられ、次のような特徴を有している。

- (1) 離散形制御構造からなる地域分割形 LFC をなしている。
- (2) 制御入力としては従来の ACE の積分値を用いず、地域の負荷変動量を推定し使用する。
- (3) 負荷変動量を推定する場合、演算時間遅れを考慮した簡単な離散構造になっている。
- (4) 負荷変動量の推定機構を含めた状態方程式を構築し、最適制御を実施することによって安定性と最適性を保証している。

Area Decomposition Type Load Frequency Control Considering Power Demand Estimation and Computation Time Delay. By Vichit Avatchanakorn, Member & Yoshibumi Mizutani, Member (Tokai University).

アーワッチャナーコーン ウィシット: 正員, 東海大学工学研究科 博士課程

水谷芳史: 正員, 東海大学工学部電気工学科

(5) 制御操作量の決定において、演算時間遅れを考慮した最適な出力フィードバック制御体系をとることができる。

本手法の有用性を立証するために、図1の4地域くし形モデルシステムを用いてシミュレーション実験を実施している。

2. モデル系統と状態方程式

図1の多地域 LFC 系は各地域で独立した制御装置を有し、比較的各地域間の結合は弱い分散制御系であるので、地域分割しやすい次のような線形システムとして記述される。なお、同図は文献(2)の2地域系を4地域系に拡張したものである。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}^0(t) = & \mathbf{A} \mathbf{X}^0(t) + \hat{\mathbf{B}}_{u1} \mathbf{U}_1^0(t) + \hat{\mathbf{B}}_{u2} \mathbf{U}_2^0(t) \\ & + \cdots + \hat{\mathbf{B}}_{r1} r_1^0(t) + \hat{\mathbf{B}}_{r2} r_2^0(t) \\ & + \cdots + \hat{\mathbf{F}}_1 \Delta P_{d1}^0(t) + \hat{\mathbf{F}}_2 \Delta P_{d2}^0(t) \\ & + \cdots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ただし、 $\mathbf{X}^0$: n 次元状態変数、 $\mathbf{U}_i^0, r_i^0, \Delta P_{di}^0$: 各々地域 i の m_i 次元制御変数、出力設定値、外乱、 $\mathbf{A}$: $(n \times n)$ 状態マトリックス、 $\hat{\mathbf{B}}_{ui}, \hat{\mathbf{B}}_{ri}, \hat{\mathbf{F}}_i$: 各々地域 i の $(n \times m_i)$ 制御、 $(n \times 1)$ 出力設定値、 $(n \times 1)$ 外乱マトリックス

ここで、各地域で観測可能な連系変数と地域変数とをすべて使用して、4地域くし形系の地域 i に対して地域分割を実施すると、状態方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_i^0(t) = & \mathbf{A}_i \mathbf{X}_i^0(t) + \mathbf{B}_{ui} \mathbf{U}_i^0(t) \\ & + \mathbf{B}_{ri} r_i^0(t) + \mathbf{F}_i \Delta P_{di}^0(t) \dots (2) \end{aligned}$$

M_i : 慣性定数 (pu MW·s/Hz), D_i : 負荷ダンピング係数 (pu MW/Hz), T_{ti} : タービン時定数 (s), T_{gi} : ガバナ時定数 (s), R_i^* : 調定率 (Hz/pu MW), T_{ij} : 同期化係数 (pu MW/Hz·s), a_{ij} : i - j 間の系統容量換算定数, Δf_i : 周波数偏差 (Hz), ΔP_{ti} : タービン出力偏差 (pu MW), ΔP_{gi} : ガバナ出力偏差 (pu MW), ΔP_{tieij} : i - j 間の連系線潮流偏差 (pu MW), ΔP_{di} : 負荷変化量 (pu MW), U_i : 最適制御操作量, r_i : 出力設定値 (pu MW), ただし、 $i, j=1, 2, 3, 4$, 添字 0 は省略

図1 4地域くし形連系系統の構成線図

Fig. 1. Block diagram of 4-area longitudinal system.

ただし、 $\mathbf{X}_i^0, \mathbf{U}_i^0, r_i^0, \Delta P_{di}^0$: 地域分割時における各々地域 i の n_i 次元状態変数, m_i 次元制御変数, 出力設定値, 外乱, $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_{ui}, \mathbf{B}_{ri}, \mathbf{F}_i$: 各々地域 i の状態, 制御, 出力設定値, 外乱マトリックス

ここで、(2)式の $\mathbf{X}_i^0$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i^0 = & [\Delta P_{tie1}^0 \cdots \Delta P_{tieil}^0 \Delta f_i^0 \Delta P_{ti1}^0 \\ & \cdots \Delta P_{tih}^0 \Delta P_{gi1}^0 \cdots \Delta P_{gih}^0]^T \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 l : 地域 i と直接連系している地域数, h : 地域 i の発電機数, 添字 0: 実系統

ここで、サンプル周期 T を一定とし、零次ホールドを用いて、(2)式の状態方程式を離散化すると次式の離散形状態方程式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i^0(k+1) = & \Phi_i \mathbf{X}_i^0(k) + \mathbf{H}_{ui} \mathbf{U}_i^0(k) \\ & + \mathbf{H}_{ri} r_i^0(k) + \mathbf{F}_i \Delta P_{di}^0(k) \\ & \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Phi_i = & \exp(\mathbf{A}_i T) \\ \mathbf{H}_{ui} = & \int_0^T \exp(\mathbf{A}_i \tau) d\tau \mathbf{B}_{ui} \\ \mathbf{H}_{ri} = & \int_0^T \exp(\mathbf{A}_i \tau) d\tau \mathbf{B}_{ri} \\ \mathbf{F}_i = & \int_0^T \exp(\mathbf{A}_i \tau) d\tau \mathbf{F}_i \end{aligned}$$

3. 負荷推定と出力設定方式

本章では、LFC の制御目標である周波数偏差 Δf_i ならびに連系線潮流偏差 $\Delta P_{tieij} (j=1, 2, \dots, l)$ を定常状態で零にするため、各地域で電力平衡方程式を構成する。そして、電力平衡方程式に微分近似ならびに平均化手法を適用し、更に演算時間遅れを考慮して負荷変動量を推定する離散形負荷推定方法を提示する。そして更に、この負荷推定値を自地域の調整用発電所における出力設定値としてフィードバックする出力設定方式を提案する。

〈3.1〉 負荷推定方式 ここで、 k 時点における地域 i の負荷を次のように推定する。すなわち、モデル系統における地域 i の電力平衡方程式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^h \Delta P_{tij}^0 - \Delta P_{di}^0 \\ & = M_i \Delta \dot{f}_i^0 + D_i \Delta f_i^0 - \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tieij}^0 \\ & \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 ΔP_{di}^0 は(5)式より実際に観測するものと

して ΔP_{di}^0 に添字 m を付けてある。

(5)式を変形すると、 $k-1$ 時点における ΔP_{ami}^0 は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta P_{ami}^0(k-1) &= (-M_i/T) \{ \Delta f_i^0(k) - \Delta f_i^0(k-1) \} \\ &\quad - D_i \Delta f_i^0(k-1) + \sum_{j=1}^h \Delta P_{tij}^0(k-1) \\ &\quad + \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tieij}^0(k-1) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、本論文では ΔP_{ami}^0 を平滑化するため、前周期の値 $\Delta P_{ami}^0(k-2)$ と次式のように平均化を行う。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{P}_{di}^0(k-1) &= 1/2 \left\{ (-M_i/T) \{ \Delta f_i^0(k) - \Delta f_i^0(k-1) \} \right. \\ &\quad \left. - D_i \Delta f_i^0(k-1) + \sum_{j=1}^h \Delta P_{tij}^0(k-1) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tieij}^0(k-1) \right\} \\ &\quad + (1/2) \Delta \hat{P}_{di}^0(k-2) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ただし、 $\Delta \hat{P}_{di}^0$: 平均化された値

現実の電力系統においては、負荷変動量が一定またはゆっくり変動するので、 k 時点の負荷推定値は $k-1$ 時点の負荷推定値を使用してもよい⁽⁷⁾。この結果、 k 時点の負荷推定値 $\Delta \hat{P}_{di}^0(k)$ は次式となり、本論文ではこれを負荷推定方式として定義する。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{P}_{di}^0(k) &= \Delta \hat{P}_{di}^0(k-1) \\ &= 1/2 \left\{ (-M_i/T) \{ \Delta f_i^0(k) - \Delta f_i^0(k-1) \} \right. \\ &\quad \left. - D_i \Delta f_i^0(k-1) + \sum_{j=1}^h \Delta P_{tij}^0(k-1) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tieij}^0(k-1) \right\} \\ &\quad + (1/2) \Delta \hat{P}_{di}^0(k-1) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

この結果、上式の $\Delta \hat{P}_{di}^0(k)$ を計算するために必要な情報は、 $k-1$ 時点までの情報と k 時点の Δf_i^0 のみで計算できる。 Δf_i^0 は調整用発電所近傍で観測することができるので、この負荷推定法は第4章で論じると同様1サンプル演算時間遅れを考慮した簡単で実用的な離散形負荷推定機構となることが期待される。

〈3・2〉 負荷推定を用いた出力設定方式 (8)式で得られた1サンプル演算時間遅れを考慮した負荷推定値を(4)式の状態方程式に組み込み、出力設定値として用いるため $\Delta \hat{P}_{di}^0(k)$ を新状態変数として次のように表す。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{P}_{di}^0(k+1) &= [C_{ai} \Phi_i + C_{bi}] X_i^0(k) + C_{ai} H_{ui} U_i^0(k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ C_{ai} H_{ri} r_i^0(k) + C_{ai} \Gamma_{di} \Delta P_{di}^0(k) \\ &+ (1/2) \Delta \hat{P}_{di}^0(k) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_{ai} &= [0 \quad (-M_i/2T) \quad 0 \quad 0] \\ C_{bi} &= [(1/2)a_{i1} \dots (1/2)a_{il} (1/2) \quad (M_i/T - D_i) \\ &\quad 1/2 \dots 1/2 \quad 0] \end{aligned}$$

そして、これを(4)式で示す自地域の調整用発電所の出力設定値 $r_i^0(k) = \Delta \hat{P}_{di}^0(k)$ として、次式のようにフィードバックすると、負荷推定値を用いた出力設定方式が構成されたことになる。

$$\begin{aligned} &\left[\begin{array}{c} X_i^0(k+1) \\ \Delta \hat{P}_{di}^0(k+1) \end{array} \right] \\ &= \left[\begin{array}{cc} \Phi_i & H_{ri} \\ C_{ai} \Phi_i + C_{bi} & H_{ai} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} X_i^0(k) \\ \Delta \hat{P}_{di}^0(k) \end{array} \right] \\ &\quad + \left[\begin{array}{c} H_{ui} \\ C_{ai} H_{ui} \end{array} \right] U_i^0(k) + \left[\begin{array}{c} \Gamma_{di} \\ C_{ai} \Gamma_{di} \end{array} \right] \\ &\quad \times \Delta P_{di}^0(k) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、

$$H_{ai} = [C_{ai} H_{ri} + (1/2)]$$

この結果、(10)式は従来負荷周波数制御の目標を満足させるため、積分制御を導入してきたことによる制御の速応性が失われたり、行き過ぎが生じるという一般的な欠点を解決することが期待される。しかしながら、このように負荷推定値を出力設定に与えただけの系は、一般に安定性ならびに最適性が保証されない。そこで本論文では、次章で提示するように(10)式の負荷推定と演算時間遅れとを考慮した系に、離散形の最適出力フィードバック制御を実施し、安定性ならびに最適性を保証している。

4. 負荷推定と演算時間遅れとを考慮した地域分割形最適出力フィードバック制御

負荷推定値を用いた、出力設定方式の LFC 系(10)式に対して、離散形の最適出力フィードバック制御理論⁽¹¹⁾を適用するため、(10)式における X_i^0 、 U_i^0 、 $\Delta \hat{P}_{di}^0$ の各々の定常状態 X_{fi} 、 U_{fi} 、 ΔP_{afi} を次式とする。

$$\begin{aligned} X_{fi} &= \left\{ \begin{array}{c} 0 \quad 0 \quad \Delta P_{ai1}^0 \dots \Delta P_{aih}^0 \\ \Delta P_{ai1}^0 \dots \Delta P_{aih}^0 \end{array} \right\}^T \dots (11) \\ \Delta P_{afi} &= [\Delta P_{ai}^0], \quad U_{fi} = [0] \end{aligned}$$

そして、次式のような変数変換を(11)式を考慮して、(10)式に対して行くと(13)式を得る。

$$\begin{aligned} X_i &= X_i^0 - X_{fi} \\ \Delta \hat{P}_{di} &= \Delta \hat{P}_{di}^0 - \Delta P_{afi} \\ U_i &= U_i^0 - U_{fi} \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_i(k+1) \\ \Delta \tilde{\mathbf{P}}_{di}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_i & \mathbf{H}_{ri} \\ \mathbf{C}_{ai}\Phi_i + \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{H}_{ai} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i(k) \\ \Delta \tilde{\mathbf{P}}_{di}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ui} \\ \mathbf{C}_{ai}\mathbf{H}_{ui} \end{bmatrix} \mathbf{U}_i(k) \quad (13)$$

実際には、大規模な電力系統を制御する際に、情報伝送時間や制御量決定時間などが存在する。そこで、これらを考慮し、演算時間遅れが1サンプル周期であると仮定すると、制御操作量 $\mathbf{U}_i$ は(14)式のように表すことができる。

$$\mathbf{U}_i(k+1) = \mathbf{V}_i(k) \quad (14)$$

ただし、 $\mathbf{V}_i$: 演算時間遅れを考慮した制御操作量

いま、(13)式ならびに(14)式を用いて、負荷推定と演算時間遅れとを考慮した状態方程式は次式のように構成することができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_i(k+1) \\ \Delta \tilde{\mathbf{P}}_{di}(k+1) \\ \mathbf{U}_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_i & \mathbf{H}_{ri} & \mathbf{H}_{ui} \\ \mathbf{C}_{ai}\Phi_i + \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{H}_{ai} & \mathbf{C}_{ai}\mathbf{H}_{ui} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i(k) \\ \Delta \tilde{\mathbf{P}}_{di}(k) \\ \mathbf{U}_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}^T \mathbf{V}_i(k) \quad (15)$$

ここで、簡単化のため(15)式を次式と置く。

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k+1) = \mathbf{A}_{di}\hat{\mathbf{X}}_i(k) + \mathbf{B}_{di}\mathbf{V}_i(k) \quad (16)$$

ただし、

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k) = [\mathbf{X}_i^T(k) \quad \Delta \tilde{\mathbf{P}}_{di}(k) \quad \mathbf{U}_i^T(k)]^T$$

(16)式の状態方程式に対して、観測方程式および評価関数を各々次式とする。

$$\mathbf{Y}_i(k) = \mathbf{D}_i\hat{\mathbf{X}}_i(k) \quad (17)$$

$$J_i = (1/2) \sum_{k=0}^{\infty} \{ \hat{\mathbf{X}}_i^T(k) \mathbf{Q}_i \hat{\mathbf{X}}_i(k) + \mathbf{V}_i^T(k) \mathbf{R}_i \mathbf{V}_i(k) \} \quad (18)$$

ただし、 $\mathbf{Y}_i$: 観測変数、 $\mathbf{D}_i$: 観測マトリックス

評価の重み $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i$ は各々 $\mathbf{Q}_i \geq 0, \mathbf{R}_i > 0$ とする。そして、観測変数は自地域の Δf_i ならびに自地域と直接連系している $\Delta P_{i \in l_j} (j=1, 2, \dots, l)$ とする。

ここで、制御操作量 $\mathbf{V}_i(k)$ は出力フィードバックであるという制限を考慮して(21)式の形で与えられるものとする。そして、(21)式を(16)式に代入して(18)式を書き換えると次式を得る。

$$J_i = (1/2) \sum_{k=0}^{\infty} \{ \hat{\mathbf{X}}_i^T(0) [\hat{\Phi}_i^{kT} \hat{\mathbf{Q}}_i \hat{\Phi}_i^k] \hat{\mathbf{X}}_i(0) \} \quad (19)$$

ただし、

$$\hat{\Phi}_i = \mathbf{A}_{di} - \mathbf{B}_{di}\mathbf{G}_i\mathbf{D}_i$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{Q}_i + \mathbf{D}_i^T \mathbf{G}_i^T \mathbf{R}_i \mathbf{G}_i \mathbf{D}_i$$

LFC 問題で対象とする外乱に対し、文献(9)で論じられているように(19)式の平均的コスト関数 $\hat{J}_i(\mathbf{G}_i)$

を定義する。ただし、 $\mathbf{K}_i = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\Phi}_i^{kT} \hat{\mathbf{Q}}_i \hat{\Phi}_i^k$ である。

$$\hat{J}_i(\mathbf{G}_i) = (1/2) \text{tr} \mathbf{K}_i \quad (20)$$

ここで、 $\hat{\Phi}_i$ が漸近安定であるならば、文献(11)に基づき安定性の拘束条件の基で(20)式を最小化すると、地域 i における最適な離散形制御操作量 $\mathbf{V}_i(k)$ は次式により求まる。

$$\mathbf{V}_i(k) = -\mathbf{G}_i\mathbf{D}_i\hat{\mathbf{X}}_i(k) \quad (21)$$

ただし、 $\mathbf{G}_i$: 最適離散形出力フィードバックゲイン

なお、地域分割する際に、二つ以上の地域と直接連系している分割系統は連系変数間が従属変数となり、特異システムとなる。そこで、本論文では文献(3)に基づき係数 C を(2)式の $\mathbf{A}_i$ に導入して、系を安定化可能系に修正し、(21)式と同様に出力フィードバック制御操作量 $\mathbf{V}_i^c(k)$ を次式のように算出する。

$$\mathbf{V}_i^c(k) = -\mathbf{G}_i^c\mathbf{D}_i\hat{\mathbf{X}}_i(k) \quad (22)$$

各地域でも同様に制御操作量 $\mathbf{V}_i(k)$ または $\mathbf{V}_i^c(k)$ を求め、これらを全系で実施すると(付1)式のように全系の方程式が構成される。

この結果、制御操作量の決定において演算時間遅れを考慮した各地域で最適な地域分割出力フィードバック制御体系をとることができ、この本手法を本論文では負荷推定と演算時間遅れとを考慮した地域分割出力フィードバック手法と名づける。

なお、上述の制御法において(14)式の演算時間遅れを無視した場合の制御を、本論文では負荷推定を考慮した地域分割出力フィードバック手法と名づける。

5. 4 地域くし形連系モデルへの適用と考察

本論文で提案する負荷推定と演算時間遅れとを考慮した地域分割出力フィードバック手法を、各地域で調整用発電所として非再熱式火力系からなる図1の4地域くし形連系モデルに適用する。

全系における状態変数の選定は地域分割が実施しやすいよう、(23)式のように選定する。なお、各変数に対する実系統を表す添字0は以下省略している

$$\mathbf{X} = [\Delta f_1 \quad \Delta P_{t1} \quad \Delta P_{g1} \quad \Delta P_{tie12} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{t2} \quad \Delta P_{g2} \quad \Delta P_{tie23} \quad \Delta f_3 \quad \Delta P_{t3} \quad \Delta P_{g3} \quad \Delta P_{tie34} \quad \Delta f_4 \quad \Delta P_{t4} \quad \Delta P_{g4}]^T \quad (23)$$

ここで、(2)式に従い地域3を例として地域分割を行うと、分割系統の状態方程式は次式ようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}_3(t) = \mathbf{A}_3 \mathbf{X}_3(t) + \mathbf{B}_{u3} U_3(t) + \mathbf{B}_{r3} r_3(t) + \mathbf{F}_3 \Delta P_{d3}(t) \dots \dots \dots (24)$$

ただし、

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \Delta P_{tie23} & \Delta f_3 & \Delta P_{t3} & \Delta P_{g3} & \Delta P_{tie34} \\ 0 & -T_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{a_{23}}{M_3} & -\frac{D_3}{M_3} & \frac{1}{M_3} & 0 & \frac{a_{34}}{M_3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{t3}} & \frac{1}{T_{t3}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{g3} R_3^*} & 0 & -\frac{1}{T_{g3}} & 0 \\ 0 & -T_{34} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{B}_{u3} = \mathbf{B}_{r3} = [0 \ 0 \ 0 \ 1/T_{g3} \ 0]^T$$

$$\mathbf{F}_3 = [0 \ -1/M_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

地域3の分割系統(24)式は二つの地域と直接連系しているため、従属変数が発生し安定化可能系とはならない。そこで、文献(3)に従って $\mathbf{A}_3$ に係数 C を導入し、系を安定化可能系に修正すると次式となる。

$$\dot{\mathbf{X}}_3(t) = \mathbf{A}_3^c \mathbf{X}_3(t) + \mathbf{B}_{u3} U_3(t) + \mathbf{B}_{r3} r_3(t) + \mathbf{F}_3 \Delta P_{d3}(t) \dots \dots \dots (25)$$

ただし、

$$\mathbf{A}_3^c = \mathbf{A}_3 + \mathbf{C}_3$$

$$\mathbf{C}_3 = \text{diag}[C_{11} \ 0 \ 0 \ 0 \ C_{55}]$$

$$C = C_{11} = C_{55}, \ C < -|\varepsilon| < 0$$

なお、 ε は計算誤差であり、 10^{-4} 程度である。

ここで、本手法を実行するため(25)式に対し(8)式の負荷推定を行い、出力設定方式(10)式を実施する。そして、変数変換(12)式を行い、(14)式の演算時間遅れを考慮して状態方程式(15)式を再構成する。そして更に、離散形最適出力フィードバック制御(22)式を実施する。

いま、図1の4地域くし形連系モデルに本手法を適用すると、地域1と4とは1地域としか直接連系していないので、分割系統は完全可制御系となり、(21)式より制御操作量を算出する。地域2と3とは2地域と直接連系しているので、上述したように $\mathbf{A}_i$ マトリックスに係数 C を導入して(25)式より制御操作量を算出し、これらを全系で実施する。

本論文におけるシミュレーションは、表1の定数をを用いる。ケース1は4地域とも系統容量とパラメータが同じで、ケース2は各地域の系統容量比5:10:2:0.8でパラメータも異なる系である。なお、本論文では、実用的なLFCに許容と思われるサンプル周期

表1 各ケースの定数

Table 1. Data of each case.

ケース 1	ケース 2
$T_{ij}=0.545$	$T_{12}=1.0, T_{23}=0.4, T_{34}=0.7$
$a_{ij}=1.0$	$a_{12}=2.0, a_{23}=5.0, a_{34}=0.4$
$D_i=0.00833$	$D_1=0.006, D_2=0.00833$
$M_i=0.166$	$D_3=0.005, D_4=0.006$
$T_{ti}=0.3$	$M_1=0.2, M_2=0.167, M_3=0.15$
$T_{gi}=0.08$	$M_4=0.2, T_{t1}=0.25, T_{t2}=0.3$
$R_i^*=6.0$	$T_{t3}=0.25, T_{t4}=0.25, T_{g1}=0.1$
$R_i=I$	$T_{g2}=0.08, T_{g3}=0.1, T_{g4}=0.1$
$Q_i=I$	$R_1^*=2.22, R_2^*=4.5, R_3^*=2.22$
$R=I, Q=I$	$R_4^*=2.22, R_i=I, Q_i=I, R=I, Q=I$

期 T として 0.5 秒を選定する。

係数 C の大きさは、 $-1.0 < C < -|\varepsilon|$ の範囲で J が最小で、かつ一定値を示したので、本論文では係数 C の値として $C = -0.01$ を採用した。

〈5・1〉 発電電力の増加率制限を無視した場合

本節では、図1において発電機の発電電力増加率制限を考慮しない線形の場合について検討する。

図2は、各地域で(8)式に示す負荷推定値を出力設定値に与えただけの状態において、地域3に 0.01 pu MW のステップ状負荷を加えた場合の Δf_3 の過渡特性である。ケース1は、十分良い減衰性を示しているが、ケース2は振動的である。すなわち、負荷推定値を出力設定値として与えただけの場合は安定性が保証されていないことを示している。

図3は、図2と同じような 0.01 pu MW のステップ状負荷を地域3に与えたときの Δf_3 ならびに ΔP_{tie23} の過渡特性である。ただし、(a)図は負荷推定を考慮した地域分割出力フィードバック手法、(b)図は(a)図の制御ゲインを用いてシミュレーション時に1サンプル遅れを擬似的に導入した場合、(c)図は本手法で、(a)~(c)図はケース1の場合である。(d)図はケース2に対し本手法を実施した場合である。制御系の演算時間遅れが無視し得る場合、(a)図に示すように十

図2 負荷推定値を出力に直接与えただけの場合に対する応答

Fig. 2. Response for case of directly feedback only demand estimation.

(a) 演算時間遅れを考慮しない場合(ケース1)

(b) 演算時間遅れを疑似的にもたせた場合(ケース1)

(c) 本手法(ケース1)

(d) 本手法(ケース2)

図3 本手法と各種制御手法との応答の比較

Fig. 3. Response comparison of proposed control and each control method.

分良好な LFC 特性を得ることができるが、演算時間遅れが無視できない場合、(b)図に示すように特性が振動的となり、最適性や安定性が保証されていない。これに対し、1 サンプル周期の演算時間遅れを考慮して、最適制御ゲインを算出した(c)図の本手法では、(a)図の特性とほぼ同様な十分良好な LFC 特性を示している。また(d)図に示すように、系統容量の異なるケース2に対しても本手法は十分良好な LFC 特性を得ることができた。なお、サンプル周期 $T=0.5$ 秒以下でも

(a)

(b)

図4 (a)TBC と(b)演算時間遅れを考慮し、積分制御を用いた地域分割出力フィードバック手法との応答(ケース1)

Fig. 4. Response of (a) TBC, (b) integral type area-decomposition output feedback method considering computation time delay (case 1).

同様に、本手法は十分良好な応答特性を示した。

図4(a)は従来の TBC 制御(付録2参照)、(b)図は文献(10)に論じられた演算時間遅れを考慮し、積分形積分制御を行った地域分割出力フィードバック手法における各々の Δf_3 および ΔP_{tie23} の特性である。(b)図は、(a)図より振動は少なく、減衰性も強く、LFC 特性を十分満足しているが、図3(c)の本手法と比較すると、本手法のほうが減衰性に対しはるかに優れた特性を示している。

図5は $0.01 \sin(2\pi/T_s)t$ (pu MW) の正弦波状負荷を地域3に加えた場合の Δf_3 ならびに ΔP_{tie23} の特性である。ただし、(a)図は本手法、(b)図は従来の TBC 制御、(c)図は本手法における負荷推定の結果で、いずれも周期 T_s は15秒である。(a)図の本手法は、(b)図と比較して Δf_3 ならびに ΔP_{tie23} の変動性を小さく抑えることができ、有効な制御となっている。(c)図は、十分良好な推定結果を示している。なお、 $T_s=30, 60$ 秒においても、これらの傾向は更に顕著に現れる。

〈5・2〉発電電力の増加率制限を考慮した場合

実際の調整用発電所においては、増加率制限内でしか出力を出すことができない。そこで、これを検討するため、図1の調整用発電所は非再熱火力であるの

図 5 正弦波状負荷外乱に対する応答(ケース 1)
Fig. 5. Response under sinusoidal load disturbance (case 1).

図 6 ステップ状負荷外乱に対する発電電力の増加率制限を考慮した場合の応答
Fig. 6. Response under step load disturbance for case of considering GRC.

で、本論文では $|\dot{\Delta P}_{tie}| \leq 0.1/60 \text{ pu MW/s}$ なる発電電力の増加率制限 (GRC) を、各地域の調整用発電所に図 1 のように設ける⁽⁵⁾。そして、本論文では本手法

をこの発電電力の増加率制限を考慮した図 1 に適用し、その有効性について検討を行う。

図 6 は地域 3 において、増加率制限にかかるような

比較的大きなステップ状負荷 $\Delta P_{d3}=0.03 \text{ pu MW}$ を加えた場合の Δf_3 , ΔP_{tie23} , ΔP_{i3} の過渡特性である。(a),(c)図は各々ケース1とケース2に対する本手法, (b)図はケース1において演算時間遅れを考慮し, 積分制御を用いた地域分割出力フィードバック手法である。(a)図と(b)図とを比較すると, (b)図は発散し, (a)図は速やかに収束し, 十分良い特性を示している。更に(c)図に示すように, ケース2に対しても本手法は十分良い特性である。

6. む す び

本研究は, 負荷周波数制御問題に対して, 第1章で示した(1)~(5)の特徴を有する離散形の負荷推定と演算時間遅れとを考慮した地域分割出力フィードバック手法を提示し, その特性を検討した。この結果, 次のような成果を得た。

(1) 本論文で提案した負荷推定法は1サンプル演算時間遅れを考慮した簡単な推定法で, その推定は良好な結果を示した。更に, 負荷推定値を出力設定値として与え, 状態方程式を再構成する本手法は負荷推定機構を含めて安定化, 最適化を保証する。

(2) 本手法は, 出力設定方式と最適出力フィードバック制御とにおいて, 1サンプル演算時間遅れを考慮した実用的なLFCを構成でき, その特性は十分良い制御効果を示した。

(3) 演算時間遅れを考慮し, 積分制御を行った地域分割出力フィードバック手法と比べて, 本手法は積分制御が速応性に欠けるという欠点を解決することができ, LFC特性を改善することができた。

(4) 発電電力の増加率制限を考慮した場合に対しても, 本手法は適応制御器や評価関数に発電量偏差の時間微分を組込む手法などを用いなくて, 十分良い特性をあげることができ, 大きな成果を得た。

(5) 他地域の情報や状態量を全く必要とせず, 自地域の状態量のみを用いて本手法は構成できる。

今後の問題としては, 非線形性の強い再熱火力系, 超電導エネルギー貯蔵装置, 燃料電池などを考慮した複合系に対して, 本手法の適用を検討していきたい。

末筆ながら, 本論文作成にあたり, 多大な御援助を賜りました本学大学院主任教授 松元 崇博士にお礼

申し上げます。

(昭和62年9月30日受付, 同63年7月26日再受付)

文 献

- (1) 電気学会: 電気学会技報(II)部, No. 40 (昭 51)
- (2) C. E. Fosha & O. I. Elgerd: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-89, 4, 563 (1970)
- (3) 水谷: 電学論B, 98, 971 (昭 53-12)
- (4) 水谷: 同上B, 101, 17 (昭 56-1)
- (5) 水谷・後藤: 同上B, 47, 399 (昭 60-4)
- (6) アーワッチャナーコーン・水谷, 他: 電気学会電力技術研資, PE-87-134 (昭 62)
- (7) S. M. Miniesy & E. V. Bohn: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-91, 1910 (1972)
- (8) 長谷部, 他: 電気学会電力技術研資, PE-86-17 (昭 61)
- (9) 白井・大塚: 電学論B, 99, 417 (昭 54-7)
- (10) 後藤: 電気学会電力技術研資, PE-86-14 (昭 61)
- (11) 谷萩: システムと制御, 16-8, 659 (昭 47)

付 録

1. 全系の状態方程式

l 地域からなるくし形連系系において, 各地域で本手法(21)式あるいは(22)式を実施したときの全系の離散状態方程式は次式となる。

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{X}}(k+1) &= \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{X}}(k) + \hat{\mathbf{B}}_{d1} \mathbf{V}_1(k) + \hat{\mathbf{B}}_{d2} \mathbf{V}_2^c(k) \cdots \\ &\quad + \hat{\mathbf{B}}_{d(l-1)} \mathbf{V}_{l-1}^c(k) + \hat{\mathbf{B}}_{di} \mathbf{V}_i(k) \\ &= (\mathbf{A}_d - \hat{\mathbf{B}}_d \mathbf{G} \mathbf{D}) \hat{\mathbf{X}}(k) \cdots \cdots \cdots (\text{付1})\end{aligned}$$

ただし, $\mathbf{A}_d$ は $\mathbf{A}$ マトリックスを離散化し, 各地域で負荷推定値と演算時間遅れとを導入したマトリックスである。また, $\hat{\mathbf{B}}_{di} = [0, 0, \dots, 0, \mathbf{B}_{di}^T, 0, \dots, 0]^T$ であり, $\hat{\mathbf{B}}_{di}$ における $\mathbf{B}_{di}$ の位置は $\hat{\mathbf{X}}$ における $\hat{\mathbf{X}}_i$ に対応する位置に配置したもので, $\hat{\mathbf{B}}_d = [\hat{\mathbf{B}}_{d1}, \hat{\mathbf{B}}_{d2}, \dots, \hat{\mathbf{B}}_{d(l-1)}, \hat{\mathbf{B}}_{di}]$ である。また更に, $\mathbf{G}$ および $\mathbf{D}$ は各々 $\mathbf{G}_i$ ならびに $\mathbf{D}_i$ より同様に構成する。

2. TBC について

TBC 制御の積分ゲインとして, 本論文では, 文献(4)の連続形地域分割出力フィードバック手法に基づき, 各地域で(付2)式に示す自地域におけるACEの積分量のみを観測して, 得られた制御ゲインを使用した。ただし, $\beta_i = D_i + (1/R_i^*)$

$$\text{ACE} = \beta_i \Delta f_i + \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tieij} \cdots \cdots (\text{付2})$$