

# 琉球大学学術リポジトリ

ランプ負荷外乱にも有効なLQI形負荷周波数制御 ー  
再熱式火力系からなる2地域電力系統への応用ー

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-04-02 キーワード (Ja): キーワード (En): Control Systems, Optimal Control, Power Systems 作成者: 山下, 勝巳, 平良, 毅, 宮城, 隼夫, Yamashita, Katsumi, Taira, Tsuyoshi, Miyagi, Hayao メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/5573">http://hdl.handle.net/20.500.12000/5573</a>

# ランプ負荷外乱にも有効な LQI 形負荷周波数制御 ——再熱式火力系からなる 2 地域電力系統への応用——

山下 勝巳\* 平良 毅\* 宮城 隼夫\*

## LQI-Type Load-Frequency Control with Consideration of Ramp Load Disturbances ——Application to Two-Area Power System with Reheat Steam Turbines——

Katsumi YAMASHITA\*, Tsuyoshi TAIRA\* and Hayao MIYAGI\*

### Summary

This paper presents a new method of designing discrete-type load frequency regulator with the first-order holder improved for ramp load disturbances. An attractive feature of the proposed control scheme is that the first-order holder is used as the hold device and then, in addition to the accumulative quantity of the area control error, the accumulative quantity of time multiplied by the area control error is used as feedback signal. Another feature is that it considers the time delay due to the computation time of the control law and the transmission time of the system data over the telemeter links to the controlling plant. The proposed control scheme is illustrated by digital simulation of a 2-area system provided with reheat steam turbines.

**Key Words:** Control Systems, Optimal Control, Power Systems.

### 1. まえがき

電力系統の負荷周波数制御 (LFC) 問題は、電力需要の増大に伴う系統連系強化が進む今日ではますますその重要性が増し、より高度な制御方式の確立が望まれるところである<sup>(1)</sup>。

近年、このような要請に対処するため、連続的な制御情報を用いる連続形負荷周波数制御方式の研究が数多く報告されている<sup>(2)~(4)</sup>。ところが、情報の伝送方式が離散形情報伝送形式に移行しつつあることから、また、デジタル計算機の制御装置への導入が必要不可欠になってきていることから、離散形負荷周波数制御方式の

確立が非常に重要な課題となっている。しかるに、離散形負荷周波数制御方式に関する研究はあまり見あたらない<sup>(5),(6)</sup>。

筆者らも先に、実用的に有効な種々の離散形負荷周波数制御器を構築してきた<sup>(7)~(10)</sup>。しかしながら、これらの制御器はステップ負荷変動を想定し設計したもので、ランプ負荷変動に対しては必ずしも良好な制御特性を与えるものではない。この問題の一解決策として、地域制御誤差の積算値、更に、その積算値をフィードバック信号に用いる出力帰還の LQI 形負荷周波数制御器を構築した<sup>(11)</sup>。この制御器を用いれば、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対して、周

受付：1987年10月31日

\*工学部電子情報工学科

Dept. of Electronics & Information Engineering, Fac. of Eng.

波数偏差および連系線潮流偏差の定常誤差を除去しうる。しかしながら、定常リップルを除去するまでには至っていない。

本論文では、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対しても、定常誤差および定常リップルを除去しうる一次ホールダをもつ LQI 形負荷周波数制御器を設計する。本制御方式の特長は、LFC の基本特性を満足させるため地域制御誤差の積算値、更に、その積算値をフィードバック信号に導入している点、更に、定常リップルを除去するためホールダを一次ホールダとしている点にある。

本論文では、以上の構成法を近年広く用いら

れている再熱式火力システムより構成される 2 地域電力システムモデルの最適制御に適用し、本制御方式の有効性を周波数偏差および連系線潮流偏差などの時間関係図を用いて明らかにしている。

### 2. 制御方式の決定

LFC 問題における負荷外乱の大きさを通常この種の問題で取り扱われている程度の大きさに限定すると、2 地域電力システムは、図 1 のブロック線図で表わすことができる。

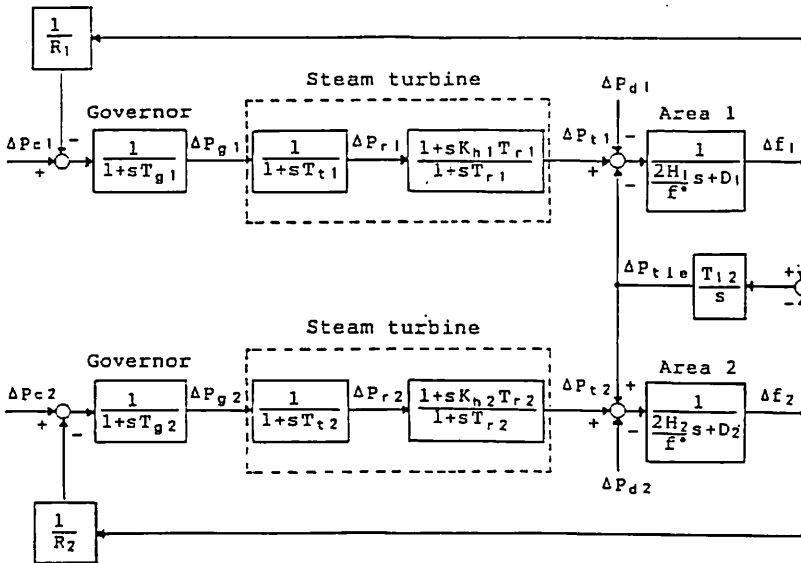


Fig. 1 Block diagram of 2-area reheat thermal system

図 1 の 2 地域電力システムモデルの状態方程式を導出するに際し、状態変数を  $x = [\Delta f_1 \ \Delta P_{t1} \ \Delta P_{r1} \ \Delta P_{g1} \ \Delta P_{te} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{t2} \ \Delta P_{r2} \ \Delta P_{g2}]^T$ 、また、制御変数を  $u = [\Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2}]^T$  とする。このとき、LFC の実用的サンプリング周期  $T_s$  が 2 秒程度で、1 サンプル時間の制御遅れを考慮すれば、制御則の演算時間のために生ずる遅れおよびデータの伝送による遅れを十分加味できることから、2 地域電力システムモデルの状態方程式を次式の微差分方程式で定義す

る。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - T_s) \tag{1}$$

但し、A は  $9 \times 9$  次元の状態定数行列、B は  $9 \times 2$  次元の制御定数行列である。

まず、サンプラとホールド回路を含めたシステムの離散形状態方程式を導く。その際、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対しても、制御量の定常誤差を除去しうる実用的な制御系を構築する必要がある。このとき問題になるのが、

LFC では実用的サンプリング周期が2秒程度と比較的長いため、ランプ負荷変動に対して零次ホールダを用いると定常リップルが生じる点である。ここでは、この点を考慮にいれ、ホールダを一次ホールダとした。また、入力に1サンプリング時間の制御遅れをもたせた、次式の制御入力を定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t-T_s) = & \mathbf{u}(\overline{k-1}T_s) + \{ \mathbf{u}(\overline{k-1}T_s) \\ & - \mathbf{u}(\overline{k-2}T_s) \} (t-kT_s)/T_s \\ & (kT_s \leqq t < \overline{k+1}T_s) \end{aligned} \quad (2)$$

このとき、(2)式の制御入力を(1)式に代入すれば、(1)式に対する解は

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) = & e^{A(t-kT_s)} \mathbf{x}(kT_s) \\ & + \int_{kT_s}^t e^{A(t-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau-T_s) d\tau \\ = & e^{A(t-kT_s)} \mathbf{x}(kT_s) \\ & + \int_{kT_s}^t e^{A(t-\tau)} d\tau \mathbf{B} [ \mathbf{u}(\overline{k-2}T_s) \\ & - (k-1)\mathbf{u}(\overline{k-1}T_s) ] \\ & + \int_{kT_s}^t e^{A(t-\tau)} \tau d\tau \mathbf{B} [ \mathbf{u}(\overline{k-1}T_s) \\ & - \mathbf{u}(\overline{k-2}T_s) ] / T_s \end{aligned} \quad (3)$$

となる。従って、離散形状態方程式はサンプリング時刻  $\overline{k+1}T_s$  での  $\mathbf{x}(\overline{k+1}T_s)$  を与える式を導出すればよいことから、(3)式より次式となる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi \mathbf{x}(k) + \Psi_1 \mathbf{u}(k-1) + \Psi_2 \mathbf{u}(k-2) \quad (4)$$

$$\text{但し, } \Phi = e^{AT_s}, \Psi_1 = [e^{AT_s} - I] A^{-1} B - \Psi_2$$

$$\Psi_2 = [T_s I - \{e^{AT_s} - I\} A^{-1}] A^{-1} B / T_s$$

なお、上式では便宜上、 $\mathbf{x}(kT_s)$  を  $\mathbf{x}(k)$  に、 $\mathbf{u}(\overline{k-1}T_s)$  を  $\mathbf{u}(k-1)$  に、そして  $\mathbf{u}(\overline{k-2}T_s)$  を  $\mathbf{u}(k-2)$  に書き換えている。

次に、LFC に要求される基本特性、すなわち、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対しても周波数および連系線潮流を規定値に維持しうる制御器を構成するため、地域制御誤差  $\Delta ACE_1(k) = \beta_1 \Delta f_1(k) + \Delta P_{tie}(k)$ ,  $\Delta ACE_2(k) = \beta_2 \Delta f_2(k) - \Delta P_{tie}(k)$  の積算値

$$\mathbf{x}_1(k+1) = [x_{11}(k+1) \ x_{12}(k+1)]^T \quad (5)$$

$$\text{但し, } x_{11}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} \Delta ACE_1(m)$$

$$x_{12}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} \Delta ACE_2(m)$$

更に、その積算値

$$\mathbf{x}_2(k+1) = [x_{21}(k+1) \ x_{22}(k+1)]^T \quad (6)$$

$$\text{但し, } x_{21}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} x_{11}(m)$$

$$= \sum_{m=0}^{k+1} (k+2-m) \Delta ACE_1(m)$$

$$x_{22}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} x_{11}(m)$$

$$= \sum_{m=0}^{k+1} (k+2-m) \Delta ACE_2(m)$$

を導入する。(5)、(6)式をそれぞれ行列形式で示すと、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1(k+1) = & \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{C} \mathbf{x}(k+1) \\ = & \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{C} \Phi \mathbf{x}(k) + \mathbf{C} \Psi_1 \mathbf{u}(k-1) \\ & + \mathbf{C} \Psi_2 \mathbf{u}(k-2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_2(k+1) = & \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{C} \mathbf{x}(k+1) \\ = & \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{C} \Phi \mathbf{x}(k) \\ & + \mathbf{C} \Psi_1 \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{C} \Psi_2 \mathbf{u}(k-2) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{但し, } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \beta_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

となる。このとき、新しく状態変数を  $\tilde{\mathbf{x}}(k)^T = [x(k)^T \ x_1(k)^T \ x_2(k)^T \ \mathbf{u}(k-1)^T \ \mathbf{u}(k-2)^T]^T$  と定義すれば、(4)、(7)および(8)式より

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\Phi} \tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\Psi} \mathbf{u}(k) \quad (9)$$

$$\text{但し, } \tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \Psi_1 & \Psi_2 \\ \mathbf{C} \Phi & \mathbf{I} & \mathbf{O} & \mathbf{C} \Psi_1 & \mathbf{C} \Psi_2 \\ \mathbf{C} \Phi & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{C} \Psi_1 & \mathbf{C} \Psi_2 \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{I} & \mathbf{O} \end{bmatrix}, \tilde{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{O} \\ \mathbf{O} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{O} \end{bmatrix}$$

で示す拡大系が得られる。

また、拡大系の評価関数としては  $\tilde{\mathbf{x}}(k)$  および  $\mathbf{u}(k)$  の二次形式の和で定義された次式を採用す

る。

$$PI = \sum_{k=0}^{\infty} \{ \tilde{x}(k)^T Q \tilde{x}(k) + u(k)^T R u(k) \} \quad (10)$$

但し、 $Q$  は  $\tilde{x}(k)$  に対する評価の重みで半正定値対称行列、 $R$  は  $u(k)$  に対する評価の重みで正定値対称行列。

故に、最適制御は(9)式の制約下で(10)式を最小化することにより、次式のように与えられる。

$$u(k) = -F \tilde{x}(k) \quad (11)$$

$$\text{但し、} F = (R + \tilde{\Psi}^T P \tilde{\Phi})^{-1} \tilde{\Psi}^T P \tilde{\Phi}$$

なお、行列  $P$  は次式のリカッチ方程式の解である。

$$P = Q + \tilde{\Phi}^T P \tilde{\Phi} - \tilde{\Phi}^T P \tilde{\Psi} (R + \tilde{\Psi}^T P \tilde{\Psi})^{-1} \tilde{\Psi}^T P \tilde{\Phi} \quad (12)$$

### 3. 例題計算および結果の考察

前章で提案した手法の有効性を立証するため、図1の再熱式火力システムより構成される2地域電力システムモデルを用いる。表1は、このモデル系統のパラメータを示したものである。表2に示される最適フィードバック  $F$  は(12)式を解くことにより求められるが、ここでは(10)式の重み行列  $Q$  および  $R$  を単位行列として計算している。

Table 1 System Parameters.

$H_1 = 5s$	$D_1 = 8.33 \times 10^{-3} \text{ puMW/Hz}$
$R_1 = 2.4 \text{ Hz/puMW}$	$T_{11} = 0.3s$
$T_{g1} = 0.08s$	$T_{r1} = 10.0s$
$K_{h1} = 0.5$	$\beta_1 = D_1 + 1/R_1 = 0.425 \text{ puMW/Hz}$
(i=1, 2)	
$f^* = 60 \text{ Hz}$	$T_{12} = 0.545 \text{ puMW/Hz} \cdot s$
$T_s = 2.0s$	

Table 2 Optimal feedback gain vector F

フィードバック利得 F	$u_1(K)$	$u_2(K)$
$\Delta f_1(K)$	0.0417	-0.0728
$\Delta P_{11}(K)$	0.9645	0.4679
$\Delta P_{r1}(K)$	-0.5310	-0.1779
$\Delta P_{g1}(K)$	-0.0190	0.0221
$\Delta P_{tie}(K)$	0.7404	-0.7404
$\Delta f_2(K)$	-0.0728	0.0417
$\Delta P_{12}(K)$	0.4679	0.9645
$\Delta P_{r2}(K)$	-0.1779	-0.5310
$\Delta P_{g2}(K)$	0.0221	-0.0191
$\sum_{m=0}^K \Delta ACE_1(m)$	0.6282	-0.1134
$\sum_{m=0}^K \Delta ACE_2(m)$	-0.1134	0.6282
$\sum_{m=0}^K (K+2-m) \Delta ACE_1(m)$	0.1636	-0.0221
$\sum_{m=0}^K (K+2-m) \Delta ACE_2(m)$	-0.0221	0.1636
$\Delta P_{c1}(K-1)$	0.4713	0.0163
$\Delta P_{c2}(K-1)$	0.0163	0.4713
$\Delta P_{c1}(K-2)$	-0.4220	0.1166
$\Delta P_{c2}(K-2)$	0.1166	-0.4220

#### (3.1) ランプ負荷外乱が生じた場合の制御効果

図3には、図2に示される  $\Delta P_{d1} = t / 3000$  (puMW) のランプ負荷外乱が生じた場合の周波数偏差  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ , 連系線潮流偏差  $\Delta P_{tie}$ , 制御入力  $\Delta P_{c1}$ ,  $\Delta P_{c2}$  の応答波形を示している。図3の実線は最適制御の応答を、また、点線は無制御の応答を示したものである。図3より最適利得をもつ本制御器を用いれば、周波数偏差および連系線潮流偏差が大幅に抑制され

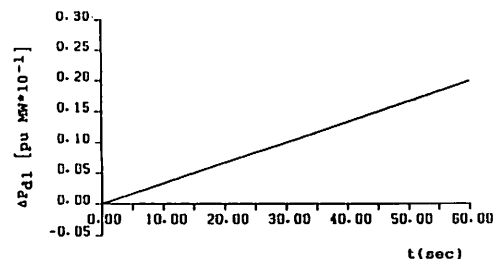
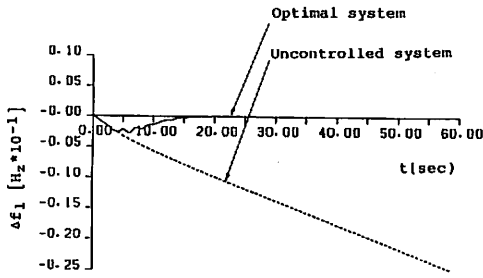
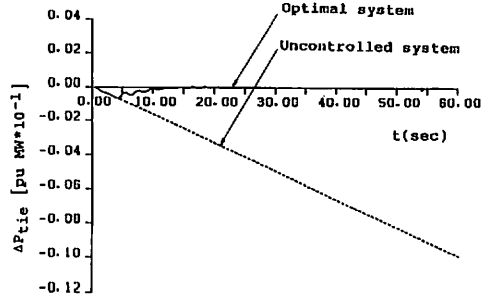


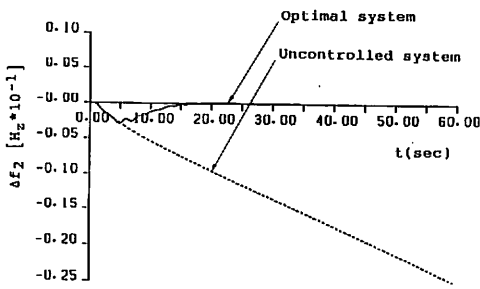
Fig. 2 Simulation for ramp load disturbance ( I )



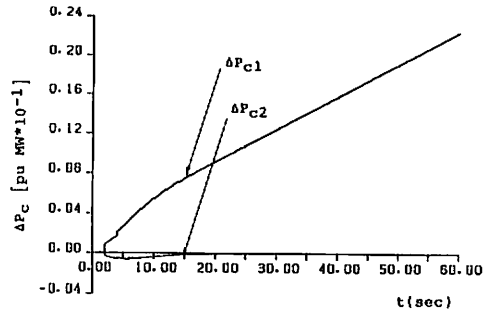
(a) Responses of  $\Delta f_1$



(c) Responses of  $\Delta P_{tie}$



(b) Responses of  $\Delta f_2$



(d) Responses of  $\Delta P_{c1}$  and  $\Delta P_{c2}$

Fig. 3 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$  and  $\Delta P_c$

るとともに、定常誤差および定常リップルが除去されていることがわかる。

(3.2) ランプとステップの組み合わせられた負荷外乱が生じた場合の制御効果

図5には、図4に示されるように  $0 \text{ s} \leq t < 15 \text{ s}$  の区間では  $\Delta P_{d1} = t / 500 \text{ (puMW)}$  のランプ負荷外乱が、また、 $15 \text{ s} \leq t$  では  $\Delta P_{d1} = 0.03 \text{ (puMW)}$  のステップ負荷外乱が生じた場合の周波数偏差  $\Delta f_1, \Delta f_2$ 、連系線潮流偏差  $\Delta P_{tie}$ 、制御入力  $\Delta P_{c1}, \Delta P_{c2}$  の応答波形を示している。図5の実線は最適制御の応答を、また、点線は無制御の応答を示している。本例でも図3のランプ負荷外乱の場合と同様に、本制御器により、周波数偏差および連系線潮流偏差が大幅に抑制されるとともに、これらの定常誤差および定常リップルが除去されていることがわかる。

以上より、提案された本制御方式がランプ負荷変動を含む各種の変動に対しても、系統動作の改善に十分有効であることがわかる。

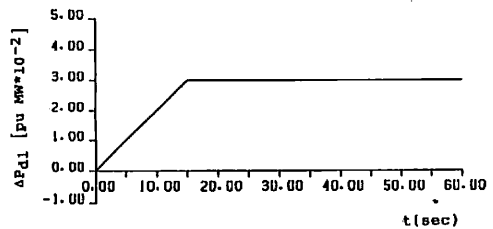
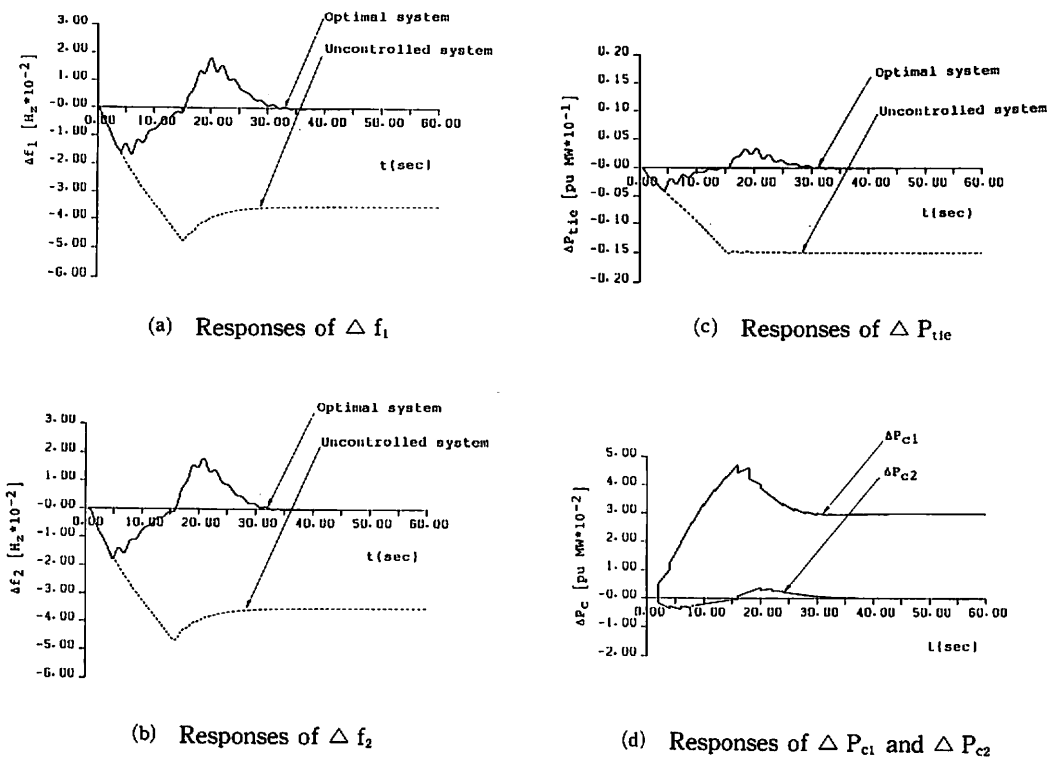


Fig. 4 Simulation for ramp load disturbance (II)

Fig. 5 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$  and  $\Delta P_c$ 

#### 4. むすび

本論文では、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対しても、定常誤差および定常リップルを除去する一次ホルダをもつ LQI 形負荷周波数制御器の設計法を提案した。また、本制御器を再熱式火力システムより構成される 2 地域電力システムモデルの最適制御に適用し、その有効性については、ランプ負荷変動を含む各種の変動に対する周波数偏差および連系線潮流偏差の時間関係図を用いて示した。なお、本制御器の特徴は、フィードバック信号に地域制御誤差の積算値、更に、その積算値を用い、また、ホルダを一次ホルダとすることにより、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対しても、周波数偏差および連系線潮流偏差の定常誤差および定常リップルを除去する点にある。また、本

制御器は演算時間遅れおよびデータの伝送に伴う遅れを考慮して設計しているの、実用的な一制御方式といえる。最後に、本研究は文部省科学研究費奨励研究 A の補助を受けたことを付記する。

#### 参考文献

- (1) 給電常置専門委員会：「電力システムの負荷周波数制御」電気学会技術報告 (II) 部, 40 号 (昭51)。
- (2) C.E. Fosha & O.I. Elgerd: "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-89, 4, 563 (1970)。
- (3) R.K. Cavin III, M.C. Budge & P. Rasmussen: "An Optimal Linear System

- Approach to Load-Frequency Control”,  
ibid, PAS-90, 6, 2474 (1971).
- (4) K. Yamashita & T. Taniguchi: “Optimal Observer Design for Load-Frequency Control”, Int. J. of Electrical Power & Energy Systems, 8, 93 (1986).
  - (5) E.V. Bohn & S.M. Miniesy: “Optimum Load-frequency Sampled-Data Control with Randomly Varying System Disturbances”, IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-91, 5, 1916 (1972).
  - (6) M.L. Kothari, P.S. Satsangi & J. Nanda: “Sampled-Data Automatic Generation Control of Interconnected Reheat Thermal Systems Considering Generation Rate Constraints”, ibid, PAS-100, 5, 2334 (1981).
  - (7) 山下・谷口: 「地域制御誤差の積算値を用いる LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 105, 634 (昭60).
  - (8) 山下・宮城: 「1 サンプルの制御遅れをもつ LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 105, 972 (昭60).
  - (9) 山下・宮城: 「出力フィードバックの LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 106, 294 (昭61).
  - (10) 山下・宮城: 「発電量の増加率制限を考慮した 1 サンプル時間の制御遅れをもつ LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 106, 1043 (昭61).
  - (11) 山下・宮城: 「ランプ負荷を考慮した LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 107 (昭62) (掲載決定).