

# 琉球大学学術リポジトリ

## ランプ負荷外乱にも有効な出力帰還のLQI形負荷周波数制御

|       |   |
|-------|---|
| メタデータ | 言語:<br>出版者: 琉球大学工学部<br>公開日: 2008-04-02<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En): Control Systems, Optimal Control, Power Systems<br>作成者: 山下, 勝己, 平良, 毅, 宮城, 隼夫<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/5574">http://hdl.handle.net/20.500.12000/5574</a>   |

## ランプ負荷外乱にも有効な出力帰還の LQI 形負荷周波数制御

山下 勝己\* 平良 毅\* 宮城 隼夫\*

Output Feedback LQI-Type Load-Frequency Control  
with Consideration of Ramp Load Disturbances

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 realization of such a regulator may be easy and of low cost because of its simple construction.

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) は系統の運用・制御に関する主要な課題の一つであり、系統連系強化に伴う様々な諸問題が表面化する中で、より高度な負荷周波数制御方式の確立が望まれる<sup>(1)</sup>。

このような問題に対処するため、筆者らは先に、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対して、定常誤差および定常リップルを除去する一次ホールダをもつ状態フィードバックの LQI 形負荷周波数制御器を構築した<sup>(2)</sup>。しかしながら、実際の制御系において、すべての状態変数を直接測定することは困難であり、系の全情報を必要とする最適制御の適用が事実上不可能となる。この種の問題の解決法として、(1)測定可能な出力変数のみのゲイン・フィードバックをもつ線

形制御系を構成する方法、(2)動的補償器を制御対象の前段に直列に結合した線形フィードバック制御系を構成する方法、(3)オブザーバを用いて測定可能な出力変数から全状態を推定し、それを利用する方法などが挙げられる<sup>(3)-(5)</sup>。

本論文では、(1)の手法に基づき、ステップ負荷並びにランプ負荷変動に対して、定常誤差および定常リップルを除去する一次ホールダをもつ、出力フィードバックの 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、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、更に、フィードバック信号に従来の定周波数制御 (FFC) および周波数偏倚連系線電力制御 (TBC) に用いられる周波数偏差および連系線潮流偏差の情

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.

報量のみを用いている点にある。

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。

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  $x = [\Delta f_1 \ \Delta P_{11} \ \Delta P_{r1} \ \Delta P_{g1} \ \Delta P_{11c} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{12} \ \Delta P_{r2} \ \Delta P_{g2}]^T$  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 サンプリング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ドを用いると定常リップルが生じる点である。ここでは、この点を考慮して、ホールドを一次ホールドとした、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。

$$u(t - T_s) = u(k-1)T_s + \{u(k) - u(k-1)\} (t - kT_s) / T_s \tag{2}$$

$$(kT_s \leq t < (k+1)T_s)$$

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

$$x(t) = e^{A(t-kT_s)} x(kT_s) + \int_{kT_s}^t e^{A(t-r)} Bu(r - T_s) dr$$

$$= e^{A(t-kT_s)} x(kT_s) + \int_{kT_s}^t e^{A(t-r)} dr B$$

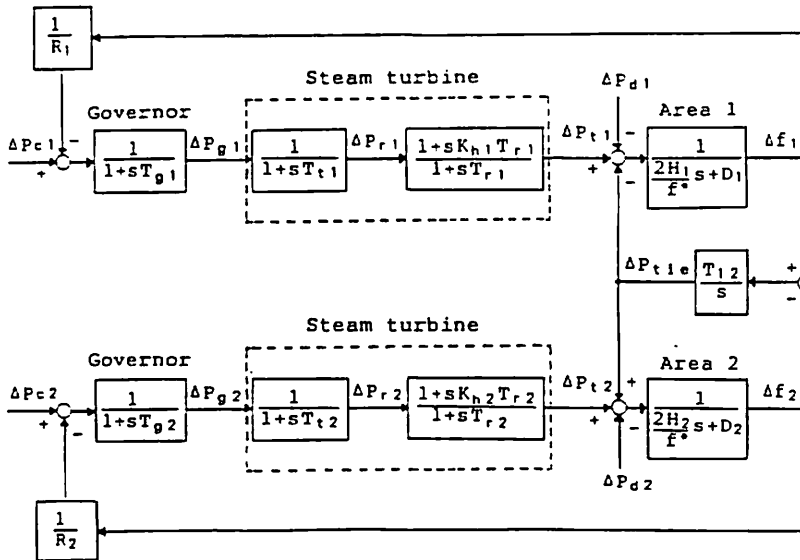


Fig. 1 Block diagram of 2-area reheat thermal system

$$\begin{aligned} &\times [k\overline{u(k-2T_s)} - (k-1)\overline{u(k-1T_s)}] \\ &- \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} e^{A(t-r)} r dr B [\overline{u(k-1T_s)} - \overline{u(k-2T_s)}] / T_s \quad (3) \end{aligned}$$

となる。従って、離散形状状態方程式はサンプリング時刻  $\overline{k+1T_s}$  での  $x(k+1T_s)$  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。

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

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、 $x(kT_s)$  を  $x(k)$  に、 $u(\overline{k-1T_s})$  を  $u(k-1)$  に、そして  $u(\overline{k-2T_s})$  を  $u(k-2)$  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

$$x_1(k+1) = [x_{11}(k+1) \quad x_{12}(k+1)]^T \quad (5)$$

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

$$x_2(k+1) = [x_{21}(k+1) \quad x_{22}(k+1)]^T \quad (6)$$

但し、 $x_{21}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} (k+2-m) \Delta ACE_1(m)$   
 $x_{22}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} (k+2-m) \Delta ACE_2(m)$

を導入する。(5)、(6)式をそれぞれ行列形式で示すと、

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) + Cx(k+1) \\ &= x_1(k) + C\Phi x(k) + C\Psi_1 u(k-1) \\ &\quad + C\Psi_2 u(k-2) \quad (7) \\ x_2(k+1) &= x_1(k) + x_2(k) + Cx(k+1) \\ &= x_1(k) + x_2(k) + C\Phi x(k) \\ &\quad + C\Psi_1 u(k-1) + C\Psi_2 u(k-2) \quad (8) \end{aligned}$$

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

となる。このとき、新しく状態変数を  $\hat{x}(k)^T = [x(k)^T \quad x_1(k)^T \quad x_2(k)^T \quad u(k-1)^T \quad u(k-2)^T]$  と定義すれば、(4)、(7)および(8)式により次式の拡大系を得る。

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

但し、 $\hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & 0 & \Psi_1 & \Psi_2 \\ C\Phi & I & 0 & C\Psi_1 & C\Psi_2 \\ C\Phi & I & I & C\Psi_1 & C\Psi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\hat{\Psi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix}$

また、拡大系の評価関数としては  $\hat{x}(k)$  および  $u(k)$  の二次形式の和の期待値で定義された次式を用いる。

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

但し、 $Q$  は  $\hat{x}(k)$  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、 $E$  は期待値を意味する。

今、観測量として従来の FFC および TBC に用いられている周波数偏差および連系線潮流偏差、すなわち、 $y(k) = [\Delta f_1(k) \quad \Delta P_{tie}(k) \quad \Delta f_2(k)]^T$  を用いると、その要素で構成される  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$  も、また、 $u(k-1)$ ,  $u(k-2)$  も測定可能量となる。従って、ここではフィードバック信号  $u(k)$  を

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

但し、 $F^T = \begin{bmatrix} F_1^T \\ F_2^T \\ F_3^T \\ F_4^T \\ F_5^T \end{bmatrix}$   $D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$\hat{D} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

として定義する。このとき、閉ループ系および評価関数のそれぞれは、行列  $\Gamma$  を  $\Gamma = \hat{\Phi} - \hat{\Psi}F\hat{D}$  とおくことにより次式で与えられる。

$$\hat{x}(k+1) = \Gamma \hat{x}(k) \quad (12)$$

$$PI = E \{ \hat{x}(0)^T P \hat{x}(0) \} \quad (13)$$

$$\text{但し, } P - \Gamma^* P \Gamma = Q + \hat{D}^T F^T R F \hat{D} \quad (14)$$

ここでは、初期状態の統計的性質が  $E[x(0)] = 0$  および  $E[x(0)x(0)^T] = I$  であるものとする。このとき、(13)式の評価関数は次式となる。

$$PI = \text{tr} P \quad (15)$$

但し、tr はトレース演算子を意味する。

故に、本問題は(14)式の拘束条件下で(15)式の評価関数を最小にする利得  $F$  を求める問題に着着される。

まず、ラグランジュ乗数を表わす対称行列  $L$  を導入し、汎関数  $H$  を

$$H = \text{tr} P + \text{tr} L (Q + \hat{D}^T F^T R F \hat{D} + \Gamma^* P \Gamma - P) \quad (16)$$

で定義する。最小化の手順に従い、(16)式を  $F$ 、 $L$  および  $P$  の各々で偏微分し零とおいて解けば、最小値のための必要条件

$$F = (R + \hat{\Psi}^T P \hat{\Psi})^{-1} \hat{\Psi}^T P \hat{\Phi} \hat{L} \hat{D}^T (\hat{D} \hat{L} \hat{D}^T)^{-1} \quad (17)$$

$$(\hat{\Phi} - \hat{\Psi}F\hat{D})^T P (\hat{\Phi} - \hat{\Psi}F\hat{D}) - P + \hat{D}^T F^T R F \hat{D} + Q = 0 \quad (18)$$

$$(\hat{\Phi} - \hat{\Psi}F\hat{D})L(\hat{\Phi} - \hat{\Psi}F\hat{D})^T - L + I = 0 \quad (19)$$

が得られる。従って、(17)~(19)式を同時に解き、最適利得  $F$  を決定すれば、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、出力帰還の LQI 形負荷周波数制御器を構築することができる。なお、(17)~(19)式に対する解は、文献(6)で示されたアルゴリズムを、 $F$  が適当な精度で収束するまで繰り返すことにより求めることができる。

### 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にシステムパラメータを示す。表2に示される最適フィードバック利得  $F$  の導出では、評価関数の  $\hat{x}(k)$  に対する重み  $Q$  及び  $u(k)$  に対する重み  $R$  を単位行列として計算している。ここでは、 $F$  の導出に文献(6)の繰り返しアルゴリズムを用い、また、収束判定の条件として  $\max |F_{ij}^n - F_{ij}^{n-1}| \leq 1.0 \times 10^{-6}$  を用いている。なお、 $F_{ij}^n$  は第  $n$  回の繰り返しにおけるフィードバック利得  $F$  の第  $(i, j)$  要素である。

#### (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  $\Delta P_{11e}$ 、制御入力  $\Delta P_{c1}$ 、 $\Delta P_{c2}$  の応答波形を示している。図3

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                            | $u_1(K)$ | $u_2(K)$ |
|--|----------|----------|
| $\Delta f_1(K)$                        | 0.0232   | -0.0116  |
| $\Delta P_{tie}(K)$                    | 0.722    | -0.722   |
| $\Delta f_2(K)$                        | 0.0116   | 0.0232   |
| $\sum_{m=0}^K \Delta ACE_1(m)$         | 0.748    | -0.0707  |
| $\sum_{m=0}^K \Delta ACE_2(m)$         | -0.0707  | 0.748    |
| $\sum_{m=0}^K (K+2-m) \Delta ACE_1(m)$ | 0.217    | 0.0543   |
| $\sum_{m=0}^K (K+2-m) \Delta ACE_2(m)$ | 0.0543   | 0.217    |
| $\Delta P_{c1}(K-1)$                   | 0.547    | 0.226    |
| $\Delta P_{c2}(K-1)$                   | 0.226    | 0.547    |
| $\Delta P_{c1}(K-2)$                   | -0.609   | 0.0698   |
| $\Delta P_{c2}(K-2)$                   | 0.0698   | -0.609   |

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るとともに、

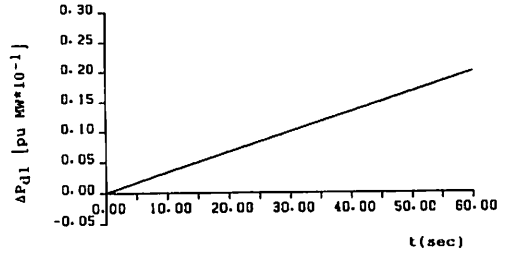


Fig. 2 Simulation for ramp load disturbance (I).

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

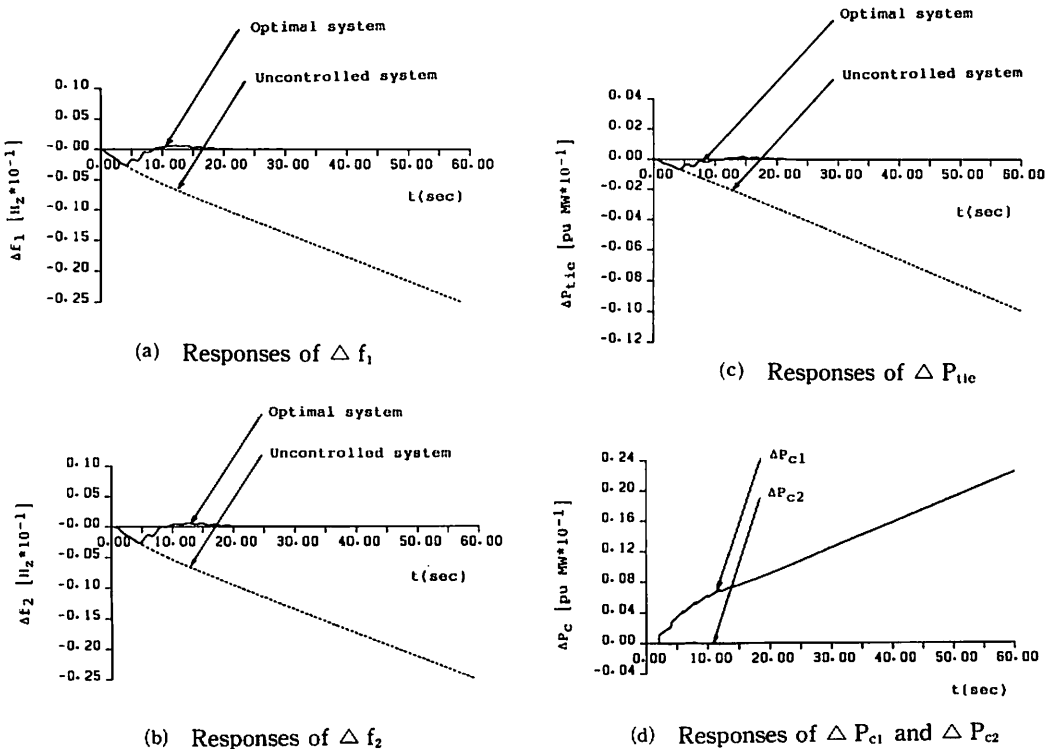


Fig. 3 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$  and  $\Delta P_c$

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。

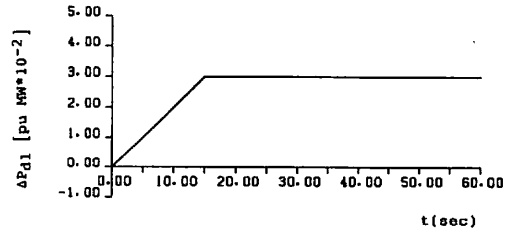
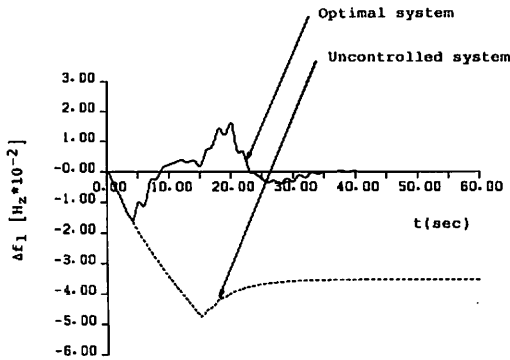
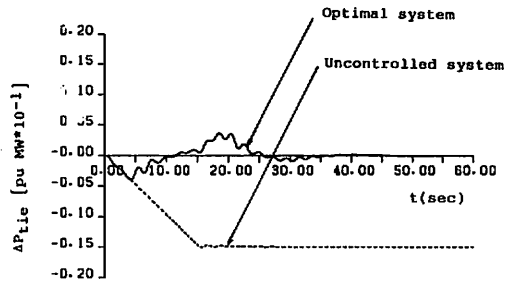


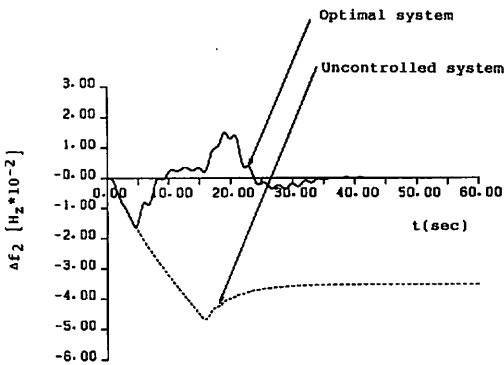
Fig. 4 Simulation for ramp load disturbance (II).



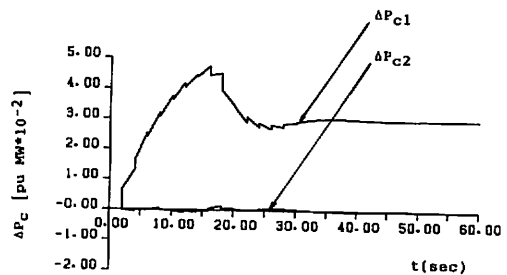
(a) Responses of  $\Delta f_1$



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



(b) Responses of  $\Delta f_2$



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

Fig. 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

を除去しうる一次ホールダをもつ、出力帰還の 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 地域電力系統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、その積算値を用いている点、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しうる点、フィードバック信号に周波数偏差および連系線潮流偏差の情報量のみを用いている点にある。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で、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：「電力系統の負荷周波数制御」電気学会技術報告（II）部，40号（昭51）。
- (2) 山下・宮城：「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—」，琉球大学工学部紀要，（昭62）（掲載予定）。
- (3) W.S. Levine and M. Athans: On the Determination of the Optimal Constant Output Feedback Gains for Linear Multivariable Systems, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-15-1, 44/88 (1970).
- (4) J.B. Pearson: Compensator Design for Dynamic Optimization, International J. of Control 9-4, 473/482 (1969).
- (5) D.G. Luenberger: Observers for Multivariable Systems, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-11-2, 190/197 (1966).
- (6) 山下・宮城：「発電量の増加率制限を考慮した1サンプリング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）。