



# 琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	地域分割手法を用いた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
Author(s)	山下, 勝巳; 平良, 毅; 宮城, 隼夫
Citation	琉球大学工学部紀要(35): 63-68
Issue Date	1988-03
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/5571">http://hdl.handle.net/20.500.12000/5571</a>
Rights	

# 地域分割手法を用いた1 サンプル時間の制御 遅れをもつ LQI 形負荷周波数制御

山下勝已\* 平良 毅\* 宮城隼夫\*

## LQI-Type Load-Frequency Control with Controlling Delay of One Sampling Time Using Area-Decomposition Method

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

### Summary

This paper presents a new method of designing decentralized discrete-type load-frequency regulator with controlling delay of one sampling time for interconnected power systems. In this paper, the interconnected multi-area electric energy system is decomposed into several subsystems, each of which is controlled separately by using a local feedback only. An especially attractive feature of the proposed control scheme is that it requires as feedback signals accumulative quantities of the area control error on the basis of linear quadratic integrating technique. An additional 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. The results show that this discrete-type regulator can act satisfactorily for improving dynamic responses of the load-frequency control.

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

### 1. まえがき

電力系統における負荷周波数制御 (LFC) は系統運用に関する主要な課題の一つであり、その目的は時々刻々と変動する負荷変動に対して周波数偏差および連系線潮流偏差を最小にするとともに、これらの変数の定常誤差を除去することにある<sup>(1)-(3)</sup>。この目的のため、近年連続時間の最適化手法を用いた連続形負荷周波数制御方式の開発が数多く報告されるようになってきている<sup>(3)-(6)</sup>。しかしながら、実際の電力系統で

は入手可能な制御情報が離散形情報であることから、また、デジタル計算機の制御装置への導入が積極的に行なわれていることから、離散形負荷周波数制御方式の確立が必要不可欠になってきている。しかしながら、これまでの研究報告では離散形負荷周波数制御方式に関する研究はほとんど見られず<sup>(7)-(9)</sup>、また、制御系の設計段階において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伴う遅れなどを無視している。更に、報告されている制御方式のほとんどが集中形制御方式を採用している

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.

ことから、制御を実施する際、他地域の情報量を必要とし、情報伝達量の多さ、制御の即時性などから考えると、実用化には問題が残る。

本論文では、これらの点を考慮し1 サンプル時間の制御遅れをもつ分散形の負荷周波数制御方式の新しい一設計法を提示するものである。本手法では、多地域電力系統を各地域毎に分割し、制御は自地域の情報量のみを利用するローカル制御を実施できるようにしている。また、本制御方式の特長は、LFCの基本特性を満足させるためLQI 技法<sup>(10)</sup>に基づき地域制御誤差の積算値を帰還信号に導入している点、また、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伴う遅れなどを考慮している点に

ある。

本論文では、以上の構成法を最近広く用いられている再熱式火力システムより構成されている2地域電力システムモデルの最適制御に適用するとともに、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

再熱式火力システムから成る2地域電力システムモデルは図1のように示される。一般に、n地域からなる電力システムの第i地域の動特性は、次式の微分方程式で記述することができる。

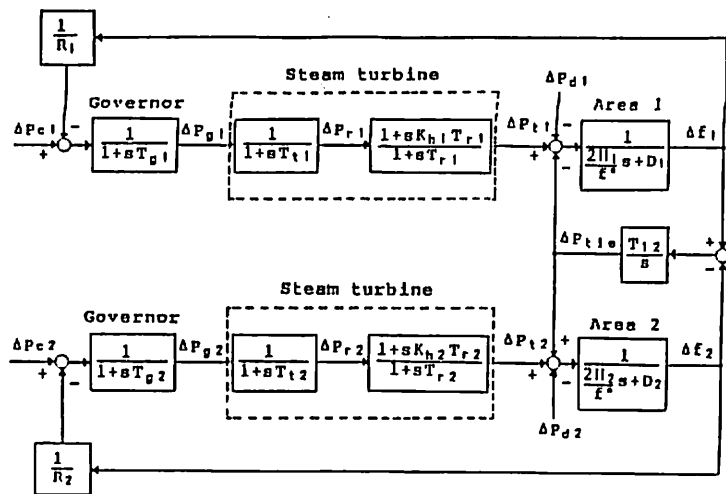


Fig. 1 Block diagram of 2-area reheat thermal system

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + \sum_j A_{ij} x_j(t) + B_i u_i(t - T_s) \\ &\quad + \Gamma_i v_i(t) \quad (1) \\ x_i(0) &= 0 \end{aligned}$$

但し、

$$\begin{aligned} x_i &= [\Delta f_i \ \Delta P_{t1} \ \Delta P_{t2} \ \Delta P_{g1} \ \Delta P_{tie1}]^T \\ u_i &= [\Delta P_{ci}] \quad v_i = [\Delta P_{d1}] \end{aligned}$$

(1)式における  $T_s$  は、サンプリング周期を表わす。

このとき、1 サンプル時間の制御遅れをもつ  $u_i(t - T_s)$  は、実際のLFCで用いられるサンプリング周期 ( $1.5 \leq T_s \leq 2.5$ ) に対して、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伴う遅れを考慮するに十分である。(1)式の各行列は次式のように与えられる。

$$A_1 = \begin{bmatrix} -f^*D_{11}/2H_1 & f^*/2H_1 & 0 & 0 & -f^*/2H_1 \\ 0 & -1/T_{r1} & 1/T_{r1} - k_{m1}/T_{11} & k_{m1}/T_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{11} & 1/T_{11} & 0 \\ -1/T_{g1}R_1 & 0 & 0 & -1/T_{g1} & 0 \\ \sum_j T_{1j} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -T_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/T_{g1} \\ 0 \end{bmatrix}, \Gamma_1 = \begin{bmatrix} -f^*/2H_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

このとき、 $v_1(t)$ を既知外乱と仮定すれば(1)式は次式のような標準形式に書き換えることができる。

$$\dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 u_1(t - T_s) \quad (3)$$

$$x_1(0) = -x_{1s}$$

但し、 $x_1$ および  $u_1$ は(1)式で定義された状態ベクトルおよび制御ベクトルから定常値  $x_{1s}$ および  $u_{1s}$ を差し引いたベクトルに相当する。ここでは、問題の定式化を容易にするため、(3)式で示されるように地域間の連結項を無視する。なお、例題計算ではこの連結項を考慮している。

制御信号  $u_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )は零次ホルダの出力であることからサンプリング周期  $T_s$ の間一定値となり、すなわち、

$$u_i(\overline{k-1}T_s) \quad (kT_s \leq t < \overline{k+1}T_s) \quad (4)$$

となるので、(3)式の解は次式のように記述することができる。

$$x_1(t) = e^{A_1(t-kT_s)} x_1(kT_s) + \int_{kT_s}^t e^{A_1(t-\tau)} B_1 d\tau u_1(\overline{k-1}T_s) = e^{A_1(t-kT_s)} x_1(kT_s) + [e^{A_1(t-kT_s)} - I] A_1^{-1} B_1 u_1(\overline{k-1}T_s) \quad (5)$$

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  $x_1(\overline{k+1}T_s)$ を与える式を導出すればよいことから(5)式より次式となる。

$$x_1(\overline{k+1}T_s) = \Phi_1 x_1(kT_s) + \Psi_1 u_1(\overline{k-1}T_s) \quad (6)$$

$$\text{但し、} \Phi_1 = e^{A_1 T_s}, \Psi_1 = [e^{A_1 T_s} - I] A_1^{-1} B_1$$

$$I = \text{単位行列}$$

LFCの目的は負荷外乱に対して周波数偏差および連系線潮流偏差を零にすることであるから、ここではLQI技法<sup>(10)</sup>に基づき地域制御誤差の積分値を帰還信号として導入する。これは次式のように定義することができる。

$$\tilde{x}_1(\overline{k+1}T_s) = \sum_{m=0}^{\overline{k+1}T_s} \{\beta_1 \Delta f_1(m) + \Delta P_{1ie}(m)\} \quad (7)$$

更に、(7)式は(6)式を用いて次式のように書き換えることができる。

$$\tilde{x}_1(\overline{k+1}T_s) = \tilde{x}_1(kT_s) + C_1 x_1(\overline{k+1}T_s) = \tilde{x}_1(kT_s) + C_1 \Phi_1 x_1(kT_s) + C_1 \Psi_1 u_1(\overline{k-1}T_s) \quad (8)$$

$$\text{但し、} C_1 = [\beta_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

ここで、拡張された状態ベクトルを定義する。

$$\hat{x}_1^T(k) = [x_1^T(k) \quad \tilde{x}_1^T(k) \quad u_1(k-1)] \quad (9)$$

但し、 $x_1(k)$ 、 $\tilde{x}_1(k)$ 、 $u_1(k-1)$ はそれぞれ  $x_1(kT_s)$ 、 $\tilde{x}_1(kT_s)$ 、 $u_1(\overline{k-1}T_s)$ を意味する。

このとき、LFCの拡大された離散形状態方程式は

$$\hat{x}_1(k+1) = \hat{\Phi}_1 \hat{x}_1(k) + \hat{\Psi}_1 u_1(k) \quad (10)$$

$$\text{但し、} \hat{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \Psi_1 \\ C_1 \Phi_1 & 1 & C_1 \Psi_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{\Psi}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

となる。故に最適制御は、(10)式の制約下で二次の評価関数

$$J_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \{\hat{x}_1^T(k) Q_1 \hat{x}_1(k) + u_1^T(k) R_1 u_1(k)\} \quad (11)$$

を最小化することにより決定することができる。

但し、 $Q_1$ は  $7 \times 7$ の半正定値行列、 $R_1$ は正のスカラ量である。

(10)式が可制御ならば最適制御は次式で与えられる。

$$u_i(k) = -F_i \hat{x}_i(k) \tag{12}$$

$$\text{但し, } F_i = (R_i + \hat{\Psi}^\top P_i \hat{\Psi}_i)^{-1} \hat{\Psi}_i^\top P_i \hat{\Phi}_i$$

行列  $P_i$  は次式のリカッチ方程式の解である。

$$P_i = Q_i + \hat{\Phi}_i^\top P_i \hat{\Phi}_i - \hat{\Phi}_i^\top P_i \hat{\Psi}_i (R_i + \hat{\Psi}_i^\top P_i \hat{\Psi}_i)^{-1} \hat{\Psi}_i^\top P_i \hat{\Phi}_i \tag{13}$$

### 3. 例題計算および結果の考察

本制御方式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の値を与える。最適フィードバック利得  $F_i$  ( $i = 1, 2$ ) は(13)式の解として与えられるが、ここでは(11)式の重み行列をそれぞれ  $Q_i = I$ ,  $R_i = 1$  ( $i = 1, 2$ ) として計算している。

表2は最適フィードバック利得の計算結果を

Table 1 System Parameters.

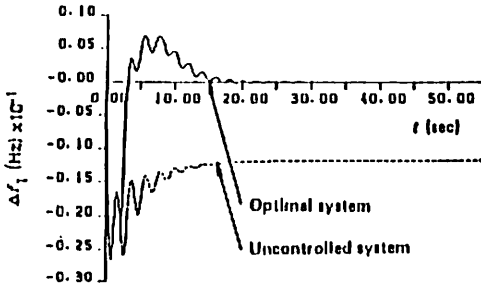
$H_i = 5s$	$D_i = 8.33 \times 10^{-3} \text{ puMW/Hz}$
$R_i = 2.4 \text{ Hz/puMW}$	$T_{i1} = 0.3s$
$T_{g1} = 0.08s$	$T_{r1} = 10.0s$
$k_{r1} = 0.5$	$\beta_i = D_i + 1/R_i = 0.425 \text{ puMW/Hz}$
( $i = 1, 2$ )	
$f^* = 60 \text{ Hz}$	$T_{12} = 0.545 \text{ puMW/Hz} \cdot s$
$T_s = 2.0s$	

Table 2 Optimal feedback gain vector  $F_i$

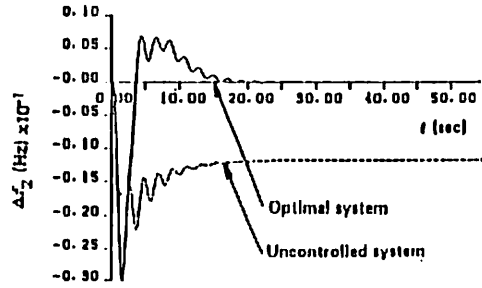
State feedback	$F_1$	State feedback	$F_2$
$\Delta f_1(k)$	-0.05432	$\Delta f_2(k)$	-0.05432
$\Delta P_{11}(k)$	0.91296	$\Delta P_{12}(k)$	0.91296
$\Delta P_{r1}(k)$	-0.49739	$\Delta P_{r2}(k)$	-0.49739
$\Delta P_{g1}(k)$	-0.01079	$\Delta P_{g2}(k)$	-0.01079
$\Delta P_{tie1}(k)$	0.11736	$\Delta P_{tie2}(k)$	0.11736
$\sum_{m=0}^k \Delta ACE_1(m)$	0.39978	$\sum_{m=0}^k \Delta ACE_2(m)$	0.39978
$\Delta P_{c1}(k-1)$	0.28799	$\Delta P_{c2}(k-1)$	0.28799

示したものである。なお、 $\Delta ACE_1(m)$  は  $\beta_1 \Delta f_1(m) + \Delta P_{tie1}(m)$  を意味する。図2は、地域1にステップ負荷外乱、すなわち  $\Delta P_{d1} = 0.01 \text{ puMW}$  を加えたときの本制御方式の制御効果を示したものである。図2の(a)から(d)は最適制御および無制御の  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta P_{tie}$ , および  $\Delta P_c$  の応答を示したものである。ここでは  $\Delta P_{tie} = \Delta P_{tie1} = -\Delta P_{tie2}$  とする。図2の実線は最適制御

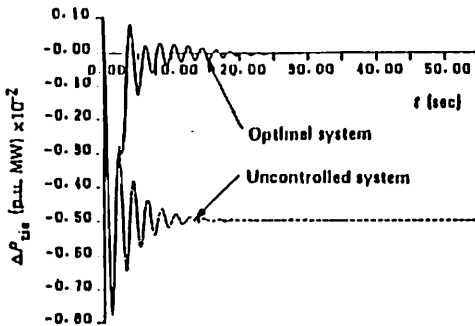
の応答を示したものであり、点線は無制御の応答を示したものである。図2より最適利得をもつレギュレータによって、周波数偏差および連系線潮流偏差が大幅に抑制されるとともに、これらの定常誤差が除去されていることがわかる。以上より、提案された本制御方式が電力システムのLFCに対して満足できるものであることがわかる。



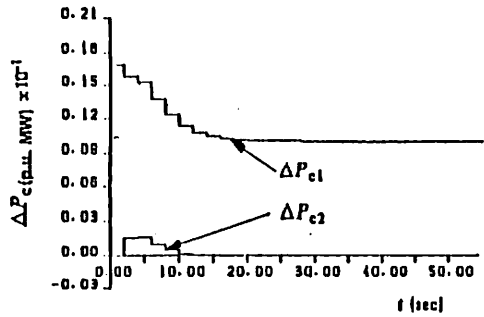
(a) Responses of  $\Delta f_1$



(b) Responses of  $\Delta f_2$



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



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

Fig. 2 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$  and  $\Delta P_c$  for a step load change  $\Delta P_{d1} = 0.01$  puMW in area 1

#### 4. むすび

本論文では、1 サンプル時間の制御遅れをもつ分散形の負荷周波数制御方式の一設計法を提案し、その有効性については再熱式火力システムで構成される2 地域電力システムモデルを用いて検証している。本論文の主な成果は以下のとおりである。

- (a) 本レギュレータでは、地域制御誤差の積算値が帰還信号として利用されるため、離散形式で測定されたシステムデータ（周波数、連系線潮流等）を直接入力信号として利用することができる。
- (b) 本レギュレータは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伴う遅れを考慮して設計されているため、非常に実用的な制御方式と考えることができる。

#### 5. 謝 辞

貴重な助言を頂いた大阪府立大学の谷口経雄博士に感謝の意を表わすとともに、実験に多大な協力を頂いた本学卒業生今別府良二、池村秀一、親泊かおり君に感謝致します。なお、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。

- (1) Elgerd, O.I., Fosha, C.E., "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems", IEEE Transactions on PAS-89, 1970, pp.556-562.
- (2) Elgerd, O.I., Electric Energy Systems

- Theory: An Introduction, McGraw-Hill INTERNATIONAL, 1983.
- (3) Fosha, C.E., Elgerd, O.I., "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Transactions on PAS-89, 1970, pp.563-577.
  - (4) Nanda, J., Kaul, B.L., "Automatic Generation Control of an Interconnected Power System", Proc. IEE, vol.125, 1978, pp.385-390.
  - (5) Hsu, Y.Y., Chan, W.C., "Optimal Variable Structure Controller for the Load-Frequency Control of Interconnected Hydrothermal Power Systems", Int. J. of Electrical Power & Energy Systems, 1984, pp.221-229.
  - (6) Yamashita, K., Taniguchi, T., "Optimal Observer Design for Load-Frequency Control", Int. J. of Electrical Power & Energy Systems, 1986, pp.93-100.
  - (7) Bohn, E.V., Miniesy, S.M., "Optimum Load-Frequency Sampled-Data Control with Randomly Varying System Disturbances", IEEE Transactions on PAS-91, 1972, pp.1916-1923.
  - (8) Glover, J.D., Schweppe, F.C., "Advanced Load Frequency Control", IEEE Transactions on PAS-91, 1972, pp.2095-2103.
  - (9) Tripathy, S.C., Bhatti, T.S., Jha. C.S., Malik, O.P., Hope, G.S., "Sampled Data Automatic Generation Control Analysis with Reheat Steam Turbines and Governor Dead-Band Effects", IEEE Transactions on PAS-103, 1984, pp.1045-1051.
  - (10) Narita, S., Digital Control Systems: Theory and Application, Syoukoudo, 1980.