

琉球大学学術リポジトリ

制御遅れを考慮した多変数適応形負荷周波数制御

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-04-01 キーワード (Ja): キーワード (En): Multivariable Control, Adaptive Control, Power System, Load Frequency Control 作成者: 山下, 勝己, 桑江, 晃, 宮城, 隼夫 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5497

制御遅れを考慮した多変数適応形負荷周波数制御

山下 勝己* 桑江 晃** 宮城 隼夫*

A Multivariable Self-Tuning Regulator for Load Frequency Control with Controlling Delay

Katsumi YAMASHITA*, Akira KUWAE**
and Hayao MIYAGI*

Summary

This paper presents a new method of designing a multivariable self-tuning regulator for load frequency control system through speed governor and excitation controls. The proposed method is applied to a two-area power system provided with nonreheat type turbines, and the control effects of this regulator are examined using digital simulations.

Key Words: Multivariable Control, Adaptive Control, Power System, Load Frequency Control

1. はじめに

電力系統の負荷周波数制御に対し、PI フィードバック制御からなる定周波数制御 (FFC) および周波数偏倚連系線電力制御 (TBC) などの制御方式を実施することにより、周波数偏差の抑制については十分な制御効果を挙げている。しかしながら、近年、運用誤差の補正に起因すると考えられる特異な潮流現象が生じるなど、様々な諸問題が表面化してきている^[1]。このような問題に対処するため種々の研究が報告されているが、これらの多くは固定ゲインのフィードバック制御方式に基づくものであり、プラントの動特性が種々の原因により変化した場合には必ずしも良好な制御特性を保証するものではない^{[2]-[6]}。それ故、動特性の変化に応じてパラメータを逐次推定し、そのパラメータを真値とみなして制御を行なう、いわゆる適応制御方式を導入する必要がある。

本論文では、プラントの動特性が変化した場合にも

良好な制御特性を与える多変数適応形負荷周波数制御器構築のアルゴリズム^[7]を若干修正し、推定・制御計算を行うのに必要な制御遅れを考慮し得る多変数適応形負荷周波数制御器を構築する。なお、本方式の有効性の検証については、非再熱式火力系からなる2地域電力系統モデルを対象に、周波数偏差および連系線潮流偏差などの時間応答波形を調べることにより行う。

2. 制御則の決定

n地域からなる制御対象の第i地域の動特性式を次式のように定義する。

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-k) + C(q^{-1})\omega(t) \quad (1)$$

但し、

$$y(t) = [y_1(t) y_2(t) \cdots y_s(t)]^T$$

$$u(t) = [u_1(t) u_2(t) \cdots u_r(t)]^T$$

*工学部電子・情報工学科 Dept. of Electronics and Information Eng., Fac. of Eng.

**大学院工学研究科電気情報工学専攻 Graduate Student, Electrical and Information Eng.

$$\omega(t) = [\omega_1(t) \omega_2(t) \cdots \omega_r(t)]^T$$

$y(t)$, $u(t)$ を t 時点でのプラントからの出力および制御入力, k をむだ時間, $\omega(t)$ を n_d 次の時間多項式の外乱とする。なお, 多項式の A , B および C は次式となる。

$$A(q^{-1}) = I + A_1 q^{-1} + A_2 q^{-2} + \cdots + A_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = B_0 + B_1 q^{-1} + B_2 q^{-2} + \cdots + B_m q^{-m}$$

$$C(q^{-1}) = C_0 + C_1 q^{-1} + C_2 q^{-2} + \cdots + C_p q^{-p}$$

但し, B_0 は正則な行列であり, A_j , B_j および C_j は

$$A_j = \begin{bmatrix} a_{11}^j & a_{12}^j & \cdots & a_{1s}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{j1}^j & a_{j2}^j & \cdots & a_{js}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1}^j & a_{s2}^j & \cdots & a_{ss}^j \end{bmatrix}, \quad B_j = \begin{bmatrix} b_{11}^j & b_{12}^j & \cdots & b_{1s}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{j1}^j & b_{j2}^j & \cdots & b_{js}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{s1}^j & b_{s2}^j & \cdots & b_{ss}^j \end{bmatrix}$$

$$C_j = \begin{bmatrix} c_{11}^j & c_{12}^j & \cdots & c_{1r}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{j1}^j & c_{j2}^j & \cdots & c_{jr}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{s1}^j & c_{s2}^j & \cdots & c_{sr}^j \end{bmatrix}$$

制御則の導出を容易にするため, (1)式の等価モデルを構成する。まず, (1)式において, $t = t+k$ と置くことにより時刻 $(t+k)$ での入出力関係が次式のように得られる。

$$A(q^{-1})y(t+k) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\omega(t+k) \quad (2)$$

同様に, (1)式において, t を $(t+k-1)$, $(t+k-2)$, \cdots , $(t+1)$ と置き, $y(t+k-1)$, $y(t+k-2)$, \cdots , $y(t+1)$ を求めるとともに, これらの項を(2)式より除去すれば(1)式の等価モデルが次式の様に分得られる。

$$\tilde{A}(q^{-1})y(t+k) = \tilde{B}(q^{-1})u(t) + \tilde{C}(q^{-1})\omega(t+k) \quad (3)$$

但し,

$$\tilde{A}(q^{-1}) = I + \tilde{A}_1 q^{-k} + \tilde{A}_2 q^{-k-1} + \cdots + \tilde{A}_n q^{-n+k+1}$$

$$\tilde{B}(q^{-1}) = \tilde{B}_0 + \tilde{B}_1 q^{-1} + \tilde{B}_2 q^{-2} + \cdots + \tilde{B}_{m+k-1} q^{-m-k+1}$$

$$\tilde{C}(q^{-1}) = \tilde{C}_0 + \tilde{C}_1 q^{-1} + \tilde{C}_2 q^{-2} + \cdots + \tilde{C}_{p+k-1} q^{-p-k+1}$$

次に, (3)式の時刻 t での入出力関係式を得るため(3)式の t を $(t-k)$ と置く。

$$\tilde{A}(q^{-1})y(t) = \tilde{B}(q^{-1})u(t-k) + \tilde{C}(q^{-1})\omega(t) \quad (4)$$

このとき, (3)式から(4)式を差し引き, 得られた関係式の n_d 階差分をとることにより, 次式のような負荷外乱項が除去された入出力関係式が得られる。

$$\tilde{A}(q^{-1})\Delta^{n_d}y(t+k) = \tilde{B}(q^{-1})\Delta^{n_d}u(t) \quad (5)$$

但し,

$$\Delta^{n_d} = \Delta^{n_d}I, \quad \Delta^{n_d} = (1 - q^{-k})^{n_d}$$

更に, (5)式の Δ^{n_d} は次のように分解できる。

$$\Delta^{n_d} = \tilde{\Delta}^{n_d} + \delta^{n_d} \quad (6)$$

但し,

$$\tilde{\Delta}^{n_d} = (1 - q^{-1})^{n_d}I$$

$$\delta^{n_d} = \{(1 + q^{-1} + q^{-2} + \cdots + q^{-k+1})^{n_d} - 1\} \tilde{\Delta}^{n_d}$$

従って(5)式は, 次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{A}(q^{-1})\Delta^{n_d}y(t+k) &= \tilde{B}_0 \tilde{\Delta}^{n_d}u(t) + \tilde{B}_0 \delta^{n_d}u(t) \\ &\quad + \{\tilde{B}(q^{-1}) - \tilde{B}_0\} \Delta^{n_d}u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, (7)式に対して次式の評価関数を導入する。

$$J = y(t+k)^T Q y(t+k) + \{\tilde{\Delta}^{n_d}u(t)\}^T R \{\tilde{\Delta}^{n_d}u(t)\} \quad (8)$$

但し, Q と R は $S \times S$ の重み行列であり, また, 上式では制御入力の変化率をおさえることにより, 間接的に大きな制御入力の抑制をはかっている。

(8)式の評価関数 J を最小化するために J を $\tilde{\Delta}^{n_d}u(t)$ で偏微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \tilde{\Delta}^{n_d}u(t)} &= 2\tilde{B}_0^T Q \{I - \tilde{A}(q^{-1})\Delta^{n_d}\}y(t+k) \\ &\quad + 2\tilde{B}_0^T Q \tilde{B}_0 \tilde{\Delta}^{n_d}u(t) + 2\tilde{B}_0^T Q [\tilde{B}_0 \delta^{n_d}u(t) \\ &\quad + \{\tilde{B}(q^{-1}) - \tilde{B}_0\} \Delta^{n_d}u(t)] + 2R \tilde{\Delta}^{n_d}u(t) \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式を零とおき, $\tilde{\Delta}^{n_d}u(t)$ について解くと, 評価関数を最小にする $\tilde{\Delta}^{n_d}u(t)$ が次式のように求まる。

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}^{n_d}u(t) &= -[R + \tilde{B}_0^T Q \tilde{B}_0]^{-1} \tilde{B}_0^T Q \{[I - \tilde{A}(q^{-1})\Delta^{n_d}]y(t+k) \\ &\quad + \tilde{B}_0 \delta^{n_d}u(t) + \{\tilde{B}(q^{-1}) - \tilde{B}_0\} \Delta^{n_d}u(t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

次に、パラメータ同定則を導く。一般に、(7)式のパラメータ $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_n, \hat{B}_0, \hat{B}_1, \dots, \hat{B}_{m+k-1}$ は各サンプリング周期毎にオンラインで同定し、同定したパラメータ $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_n, \hat{B}_0, \hat{B}_1, \dots, \hat{B}_{m+k-1}$ を用いて(9)式の制御則を計算する。(5)式において、 t を $(t-k)$ とおくと、次式が得られる。

$$Z_j(t) = \Theta_j^T \xi(t-1) \quad (j=1, 2, \dots, s) \quad (11)$$

但し、

$$Z_j(t) = \Delta^{nd} y_j(t) - \Delta^{nd} u_j(t-k)$$

$$\Theta_j^T = [\alpha_{j1}^1 \ \alpha_{j2}^1 \ \dots \ \alpha_{js}^1 \ \alpha_{j1}^2 \ \alpha_{j2}^2 \ \dots \ \alpha_{js}^2 \ \dots \ \alpha_{j1}^n \ \alpha_{j2}^n \ \dots \ \alpha_{js}^n \ \beta_{j1}^1 \ \beta_{j2}^1 \ \dots \ \beta_{j1}^{m+k-1} \ \beta_{j2}^{m+k-1} \ \dots \ \beta_{js}^{m+k-1}]$$

$$\xi(t-1)^T = [-\Delta^{nd} y(t-k)^T - \Delta^{nd} y(t-k-1)^T \dots$$

$$-\Delta^{nd} y(t-n-k+1)^T \Delta^{nd} u(t-k-1)^T \dots$$

$$\dots \Delta^{nd} u(t-m-2k+1)^T]$$

未知パラメータ Θ_j は、次式の繰返し形パラメータ推定アルゴリズムで同定される。

$$\hat{\Theta}_j(t) = \hat{\Theta}_j(t-1) + \frac{\Gamma(t-1)\xi(t-1)}{1 + \xi(t-1)^T \Gamma(t-1)\xi(t-1)} \times [Z_j(t) - \hat{\Theta}_j(t-1)^T \xi(t-1)] \quad (j=1, 2, \dots, s) \quad (12)$$

$\Gamma(t)$ は次式で計算される。

$$\Gamma(t) = \frac{1}{\lambda_1(t)} [\Gamma(t-1) - \frac{\Gamma(t-1)\xi(t-1)\xi(t-1)^T \Gamma(t-1)}{\lambda_1(t) / \lambda_2(t) + \xi(t-1)^T \Gamma(t-1)\xi(t-1)}] \quad (13)$$

但し、

$$0 < \lambda_1(t) \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_2(t) < 2, \quad \Gamma(0) > 0$$

なお、推定計算を容易にするため上記のアルゴリズムにおいて \hat{B}_0 を単位行列としている。

3. シミュレーション計算結果

本制御器の有効性を検証するために、図1に示す非再熱式火力形からなる2地域電力系統モデルを用いる。なお、各パラメータの値については表1に示す。

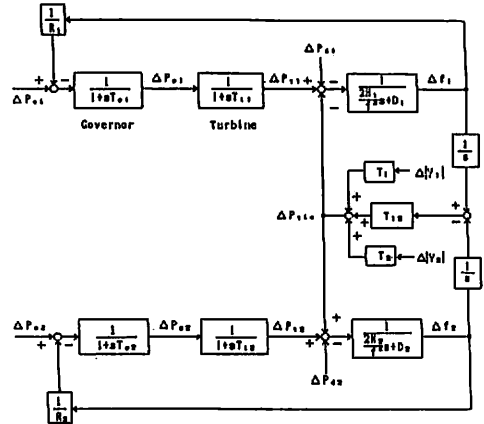


Fig. 1 Block diagram of a two-area power system.

Table 1. system parameters.

$H_1 = 5.0 \text{ s}$	$D_1 = 8.33 \times 10^{-3} \text{ pu MW / Hz}$
$T_{c1} = 0.3 \text{ s}$	$R_1 = 2.4 \text{ Hz / pu MW}$
$T_{s1} = 0.08 \text{ s}$	$T_1 = 0.05 \text{ pu MW / pu V}$
$f^* = 60 \text{ Hz}$	$T_{12} = 0.545 \text{ pu MW}$
	(i = 1, 2)

各地域の出力および制御入力をそれぞれ

$$y_{1i}(t) = \Delta f_i(t), \quad y_{2i}(t) = P_{tiei}(t) \\ u_{1i}(t) = \Delta P_{ci}(t), \quad u_{2i}(t) = |V_i(t)| \quad (i=1, 2) \quad (14)$$

と定義し、想定する負荷外乱を図2に示すようなステップ負荷外乱とする。このとき、負荷外乱の多項式の次数は $n_d=1$ となる。また、制御器の各パラメータを決定するため次式の積分値を定義する。

これらの積分値が最少になるように制御器の各パラメータを決定する。このとき、これらのパラメータを用いて構成される制御器が最適制御器となる。なお、推定計算においては、推定パラメータの初期値をすべて零、 $\Gamma(0)$ を 1×10^3 、また、 $\lambda_1(t)$ 、 $\lambda_2(t)$ をそれぞれ1として計算を実施した。

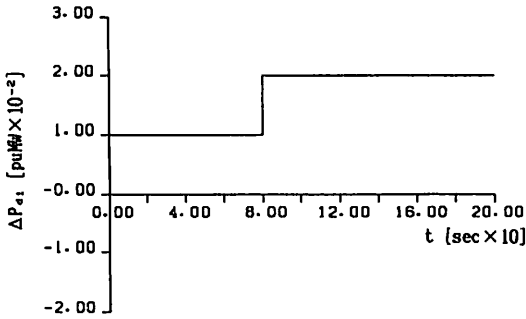


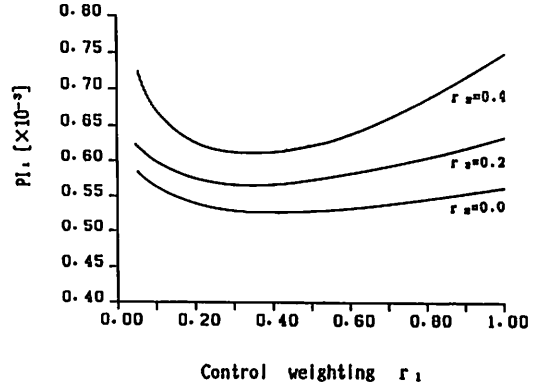
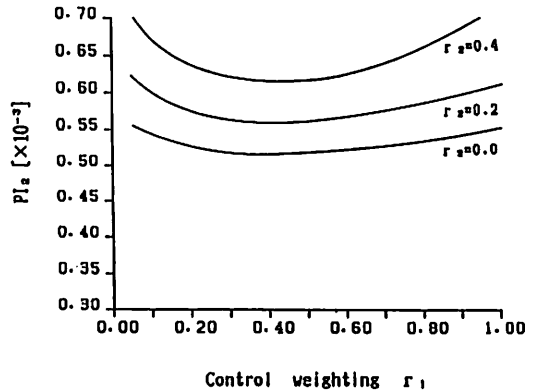
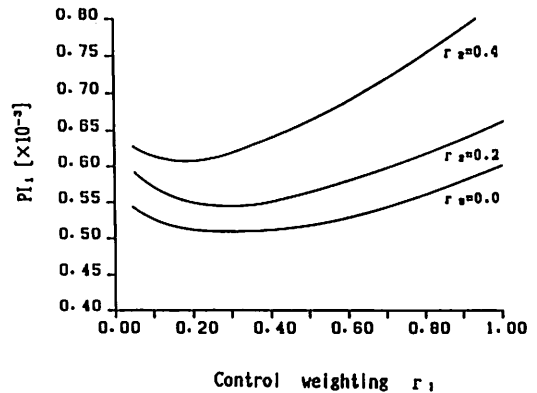
Fig. 2 Simulation of the load disturbance.

$$PI_1 = \int_{20}^{200} [\{\Delta f_1(t)\}^2 + \{\Delta P_{tie}(t)\}^2] dt \quad (15)$$

$$PI_2 = \int_{20}^{200} [\{\Delta f_2(t)\}^2 + \{\Delta P_{tie}(t)\}^2] dt$$

3. 1 次数 n , m および制御の重み R の決定

制御器の設計に際しては、各地域のモデル次数を同一で $m=n-1$ とし、また、サンプリング時間 T_s を 0.5 秒とし、更に、推定・制御計算を行うのに必要な制御遅れを考慮するため k を 2 とした。なお、(8) 式の評価関数の Q は単位行列とし、 R は $R = \text{diag}(r_1, r_2)$ とした。このとき、最適なモデル次数および制御の重みを決定するため、モデル次数を 2 および 4 にしたときの r_1 および r_2 に対する (15) 式の積分値 PI_1 および PI_2 を求めた。図 3 および図 4 は、モデルの次数 n が 2 のときの r_1 および r_2 に対する PI_1 および PI_2 の変化を示したものであり、また、図 5 および図 6 は、モデルの次数 n が 4 のときの r_1 および r_2 に対する PI_1 および PI_2 の変化を示したものである。これらの図より明らかのように、最適なモデル次数は $n=2$ 、制御の重みは $r_1=0.4$ 、 $r_2=0.0$ であることが分かる。

Fig. 3 PI_1 versus r_1 and r_2 for $n=2$.Fig. 4 PI_2 versus r_1 and r_2 for $n=2$.Fig. 5 PI_1 versus r_1 and r_2 for $n=4$.

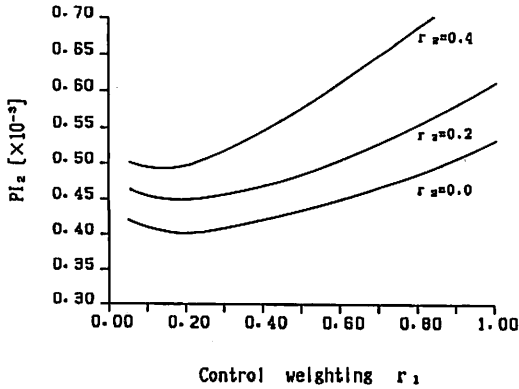


Fig. 6 PI_2 versus r_1 and r_2 for $n=4$.

3.2 サンプル時間 T_s の決定

図7は、モデル次数を $n=2$ に、また、制御の重み r_1 および r_2 を 0.4 および 0.0 にしたときのサンプル時間 T_s に対する PI_1 および PI_2 の特性を示したものである。同図より明らかなように、 T_s は小さすぎても大きすぎても各積分値は大きく発散し、 0.3 秒~ 0.6 秒あたりの選択が妥当である。

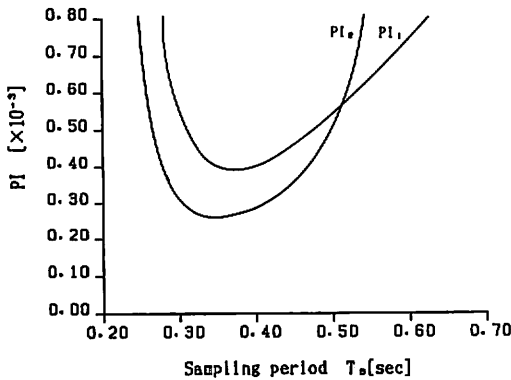


Fig. 7 PI versus T_s for $n=2$, $r_1=0.4$ and $r_2=0.0$.

3.3 時間応答

上述の結果より、本シミュレーションにおいては、 $n=2$, $r_1=0.4$, $r_2=0.0$, $T_s=0.5$ 秒を用いた。図8~図10には、それぞれ周波数および連系線潮流の時間応答を、図11および図12には制御入力の時応答を示している。なお、実線は本制御方式を用いた場合の波形、また、破線は無制御の波形を示す。これらの図か

ら明らかなように、本制御方式の特性が無制御の特性に比べて非常に速やかに収束していることが分かる。

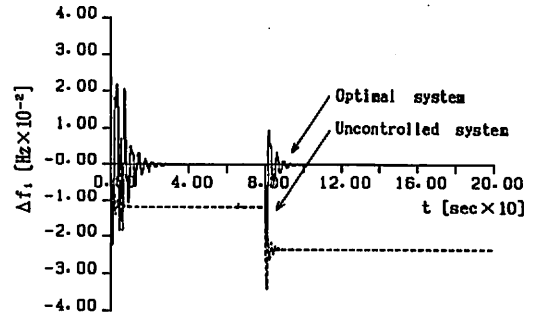


Fig. 8 Responses of $\Delta f_1(t)$.

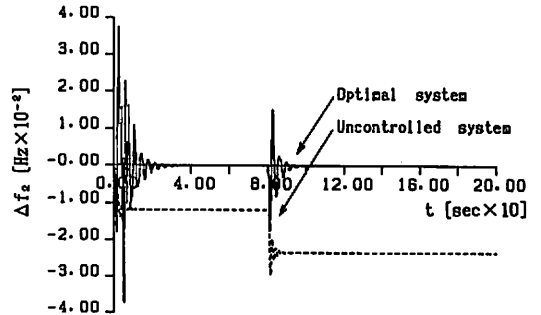


Fig. 9 Responses of $\Delta f_2(t)$.

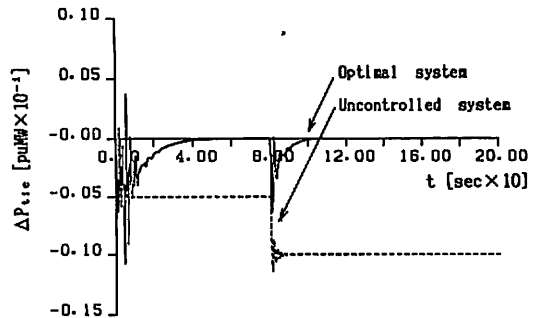


Fig. 10 Responses of $\Delta P_{tie}(t)$.

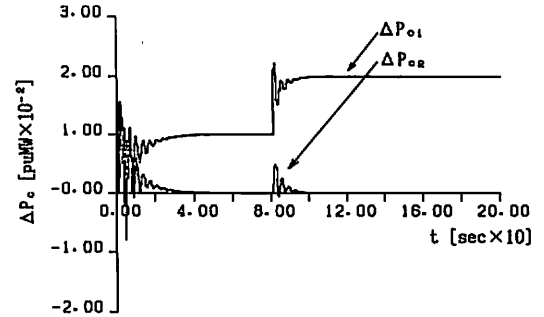
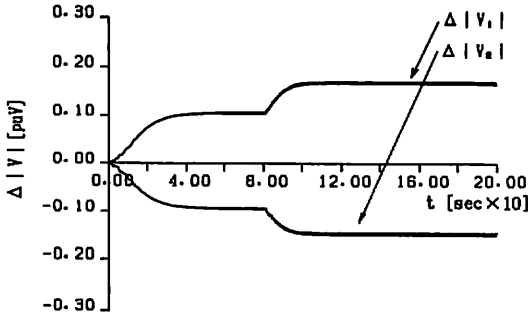


Fig. 11 Responses of $\Delta P_c(t)$.

Fig. 12 Responses of $\Delta|V(t)|$.

4. むすび

本論文では、推定・制御計算を行うのに必要な制御遅れを考慮し得る多変数適応形負荷周波数制御器を構築し、その有効性については、非再熱式火力系からなる2地域電力系統モデルを対象に、周波数偏差および連系線潮流偏差などの時間応答波形を調べることにより実証した。

参考文献

[1] COMMITTEE on LOAD DISPATCHING, IEE., JAPAN: "Load frequency control of power system", Technical Report, IEE,

- Japan, 1976, 2, (40)
- [2] ELGERD, O. I., and FOSHA, C. E.: "Optimum megawatt-frequency control of multi area electric energy systems", IEEE Trans., 1970, PAS-89, pp. 556-562
- [3] FOSHA, C. E., and ELGERD, O. I.: "The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control theory", *ibid.*, 1970, PAS-89, pp. 563-577
- [4] HIYAMA, T.: "Design of decentralised load-frequency regulators for interconnected power systems", Proc. IEE, 1982, 129, 1, pp. 17-23
- [5] MOHADJER, M., and JOHNSON, C. D.: "Load-frequency control with disturbance accommodation", Int. J. Electr. Power & Energy Syst., 1984, 6, 3, pp. 143-149
- [6] YAMASHITA, K., and TANIGUCHI, T.: "Optimal observer design for load-frequency control", *ibid.*, 1986, 8, (2), pp. 93-100
- [7] YAMASHITA, K., and MIYAGI, H.: "Load frequency self-tuning control using a governor and voltage controls", Electric Machines & Power Syst., 1989, 17, pp. 43-52.