

# 琉球大学学術リポジトリ

## 負荷需要に電圧の影響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): Adaptive Control, Power Systems 作成者: 山下, 勝己, 宮城, 隼夫 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/5495">http://hdl.handle.net/20.500.12000/5495</a>

# 負荷需要に電圧の影響を考慮した 多変数適応形負荷周波数制御

山下 勝己\* 宮城 隼夫\*

## A Multivariable Self-Tuning Regulator for Load Frequency Control System with the Inclusion of Interaction of Voltage on Load Demand

Katsumi YAMASHITA\* and Hayao MIYAGI\*

### Summary

This paper presents a new method of designing a multivariable self-tuning regulator for load frequency control system with the inclusion of interaction of voltage on load demand. The method is applied to a two-area power system provided with nonreheat type turbines in which the interaction of voltage deviation on load demand is considered, and the control effects of this regulator are examined using digital simulations.

Key Words: Adaptive Control, Power Systems

### 1. はじめに

電力系統の負荷周波数制御問題は電力系統の運用・制御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化する負荷変動に対し周波数および連系線潮流の規定値からの偏差を許容範囲に収めるよう、各発電機出力を制御することにある<sup>1)</sup>。

この問題に対処するため、種々の制御方式が報告されているが<sup>2)-6)</sup>、これら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ることから、プラントの動特性が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。近年、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保証する制御方式として適応制御方式が注目を受け、この制御方式を負荷周波数制御問題に適用する試みも幾つか報告されている<sup>7)-10)</sup>。

本論文では、多変数適応形負荷周波数制御器<sup>11)</sup>を負荷需要に電圧の影響を考慮した負荷周波数制御問題に

適用すると共に、そ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応答波形より検証する。

### 2. 制御則の決定

第  $i$  地域のプラント出力および制御入力を  $y(t)$  および  $u(t)$  と置くことにより、プラントの動特性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、

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

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

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

$$A(q^{-1}) = I + A_1q^{-1} + A_2q^{-2} + \cdots + A_nq^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = B_0 + B_1q^{-1} + B_2q^{-2} + \cdots + B_mq^{-m}$$

$$C(q^{-1}) = C_0 + C_1q^{-1} + C_2q^{-2} + \cdots + C_pq^{-p}$$

なお、 $B_0$  は正則な行列であり、 $A_j$ 、 $B_j$  および  $C_j$  は次式となる。

\*工学部電子情報工学科

Dept. of Electronics and Information Eng., Fac. of Eng.

$$A_j = \begin{bmatrix} a_{j_1}^1 & a_{j_2}^1 & \cdots & a_{j_s}^1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{j_1}^j & a_{j_2}^j & \cdots & a_{j_s}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{j_1}^s & a_{j_2}^s & \cdots & a_{j_s}^s \end{bmatrix}, B_j = \begin{bmatrix} b_{j_1}^1 & b_{j_2}^1 & \cdots & b_{j_s}^1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{j_1}^j & b_{j_2}^j & \cdots & b_{j_s}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{j_1}^s & b_{j_2}^s & \cdots & b_{j_s}^s \end{bmatrix}$$

$$C_j = \begin{bmatrix} c_{j_1}^1 & c_{j_2}^1 & \cdots & c_{j_r}^1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{j_1}^j & c_{j_2}^j & \cdots & c_{j_r}^j \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{j_1}^s & c_{j_2}^s & \cdots & c_{j_r}^s \end{bmatrix}$$

また、制御則の導出を容易にするため(1)式の等価モデルを文献(17)に基づいて

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

但し、

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

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

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

のように変形する。更に、(2)式の時刻  $t$  での入出力関係式を(2)式から差し引き、得られる関係式の  $n_d$  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に変形する。

$$\bar{A}(q^{-1})\Delta^{nd}y(t+k) = \bar{B}(q^{-1})\Delta^{nd}u(t) \quad (3)$$

但し、

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

なお、(3)式の  $\Delta^{nd}$  は

$$\Delta^{nd} = \bar{\Delta}^{nd} + \delta^{nd} \quad (4)$$

但し、

$$\bar{\Delta}^{nd} = (1-q^{-1})^{nd}I$$

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

のように分解できることから、(3)式は次式のように書き直すことができる。

$$\bar{A}(q^{-1})\Delta^{nd}y(t+k) = \bar{B}_0 \bar{\Delta}^{nd}u(t) + \bar{B}_0 \delta^{nd}u(t) + \{\bar{B}(q^{-1}) - \bar{B}_0\} \Delta^{nd}u(t) \quad (5)$$

このとき、(5)式に対する評価関数として

$$J = y(t+k)^T Q y(t+k) + \{\bar{\Delta}^{nd}u(t)\}^T R \{\bar{\Delta}^{nd}u(t)\} \quad (6)$$

但し、 $Q$  と  $R$  は、 $S \times S$  の重み行列

を導入し、また、上式を  $\bar{\Delta}^{nd}u(t)$  で偏微分した関係式

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \bar{\Delta}^{nd}u(t)} &= 2\bar{B}_0^T Q (I - \bar{A}(q^{-1})\Delta^{nd})y(t+k) \\ &\quad + 2\bar{B}_0^T Q \bar{B}_0 \bar{\Delta}^{nd}u(t) + 2\bar{B}_0^T Q \{\bar{B}_0 \delta^{nd}u(t) \\ &\quad + \{\bar{B}(q^{-1}) - \bar{B}_0\} \Delta^{nd}u(t)\} + 2R \bar{\Delta}^{nd}u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

を零とおき  $\bar{\Delta}^{nd}u(t)$  について解くことにより、評価関数を最小にする最適制御  $\bar{\Delta}^{nd}u(t)$  が次式で求められる。

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}^{nd}u(t) &= -[R + \bar{B}_0^T Q \bar{B}_0]^{-1} \bar{B}_0^T Q \{[I - \bar{A}(q^{-1})\Delta^{nd}]y(t+k) \\ &\quad + \bar{B}_0 \delta^{nd}u(t) + \{\bar{B}(q^{-1}) - \bar{B}_0\} \Delta^{nd}u(t)\} \end{aligned} \quad (8)$$

次に、パラメータ同定則を導くために(3)式における  $t$  を  $(t-k)$  とおき次式のように整理する。

$$Z_j(t) = \theta_j^T \xi(t-1) \quad (j=1, 2, \dots, s) \quad (9)$$

但し、

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

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

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

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

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

このとき、未知パラメータ  $\theta_j$  は、次式の繰り返し形パラメータ推定アルゴリズムで同定される。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_j(t) &= \hat{\theta}_j(t-1) + \frac{\Gamma(t-1)\xi(t-1)}{1 + \xi(t-1)^T \Gamma(t-1)\xi(t-1)} \\ &\quad \times [Z_j(t) - \hat{\theta}_j(t-1)^T \xi(t-1)] \quad (j=1, 2, \dots, s) \end{aligned} \quad (10)$$

$\Gamma(t)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= \frac{1}{\lambda_1(t)} [\Gamma(t-1) \\ &\quad - \frac{\Gamma(t-1)\xi(t-1)\xi(t-1)^T \Gamma(t-1)}{\lambda_1(t)/\lambda_2(t) + \xi(t-1)^T \Gamma(t-1)\xi(t-1)}] \end{aligned} \quad (11)$$

但し、

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

3. シミュレーション結果

本制御器の有効性を検証するために、図1に示す負荷需要に電圧の影響を考慮した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。

Table 1: System parameters

$H_1 = 5.0s$	$D_1 = 8.33 \times 10^{-3} \text{ puMW/Hz}$
$T_{11} = 0.3$	$T_{e1} = 0.08s$
$R_1 = 2.4 \text{ Hz/puMW}$	$T_{12} = 0.05$
$T_{e12} = 8.17s$	$K_{e12} = 0.57$
$T_{e2} = 1.0s$	$K_{e2} = 0.04$
$T_{12} = -10.0s$	$K_{12} = -500.0$
$S_{12} = 1.25$	$\partial P_{d1} / \partial  V_1  = 0.0$
$f^* = 60 \text{ Hz}$	$T_{12} = 0.545 \text{ puMW}$

(i = 1, 2)

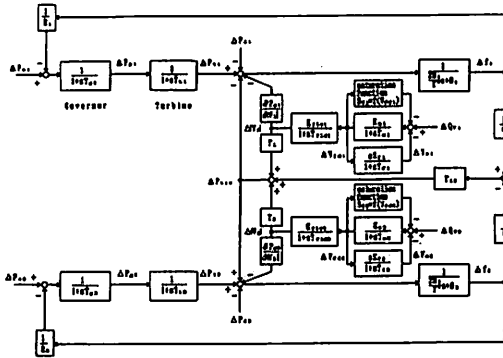


Fig. 1 Block diagram of a two-area power system

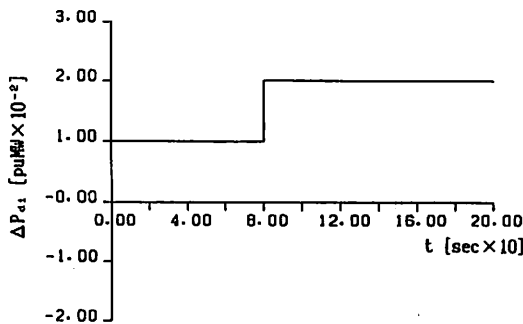


Fig. 2 Simulation of the load disturbance.

各地域の出力および制御入力をそれぞれ

$$y_{i1}(t) = \Delta f_i(t), \quad y_{i2}(t) = \Delta P_{uei}(t)$$

$$u_{i1}(t) = \Delta P_{c1}(t), \quad u_{i2}(t) = \Delta Q_{vi}(t) \quad (i=1, 2)$$

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  $n_d$  は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。

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

$$PI_2 = \int_{20}^{200} [\{\Delta f_2(t)\}^2 + \{\Delta P_{ue}(t)\}^2] dt \quad (13)$$

これらの積分値が最小となるように制御器の各パラメータを決定すれば、最適制御器が得られる。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  $I \times 10^3$ 、また、 $\lambda_1(t)$ 、 $\lambda_2(t)$  をそれぞれ1として計算を実施した。

3. 1 次数 n、m、制御の重み R およびサンプリング時間  $T_s$  の決定

制御器の設計におけるモデル次数 n、m および制御の重み R の決定に際しては、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秒とした。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、(6)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。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

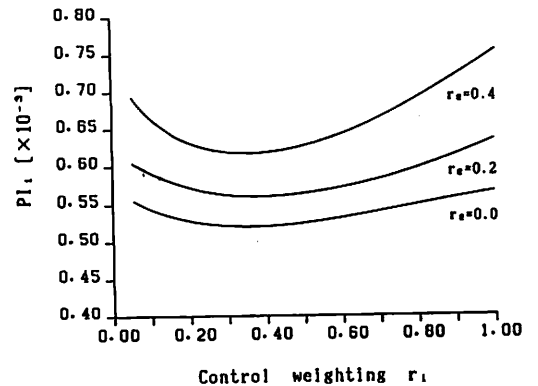


Fig. 3  $PI_1$  versus  $r_1$  and  $r_2$  for  $n=2$ .

にしたときの  $r_1$  および  $r_2$  に対する(4)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および4のときの  $r_1$  および  $r_2$  に対する  $PI_1$  の変化を示したものである。これらの図より明らかなように、最適をモデル次数は  $n=2$ 、制御の重みは  $r_1=0.3$ 、 $r_2=0.0$  であることが分かる。また、図5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0.3および0.0にしたときのサンプリング時間  $T_s$  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0.3秒~0.6秒あたりの選択が妥当であることが分かる。

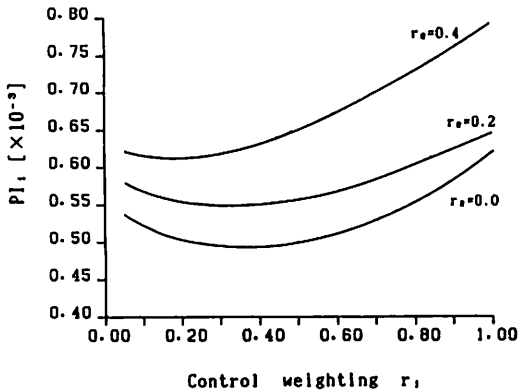


Fig. 4  $PI_1$  versus  $r_1$  and  $r_2$  for  $n=4$ .

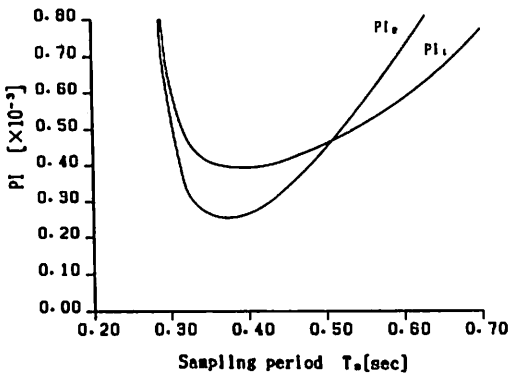


Fig. 5  $PI$  versus  $T_s$  for  $n=2$ ,  $r_1=0.3$  and  $r_2=0.0$

3. 2 時間応答

図6~図8は、 $n=2$ 、 $r_1=0.3$ 、 $r_2=0.0$  および  $T_s=0.5$  秒に対する周波数および連系線潮流の時間応答を、また、図9および図10は、このとき制御入力の時

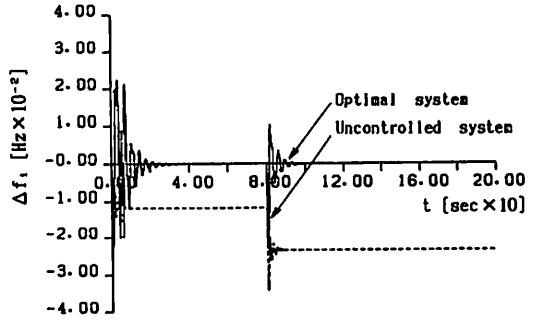


Fig. 6 Responses of  $\Delta f_1(t)$ .

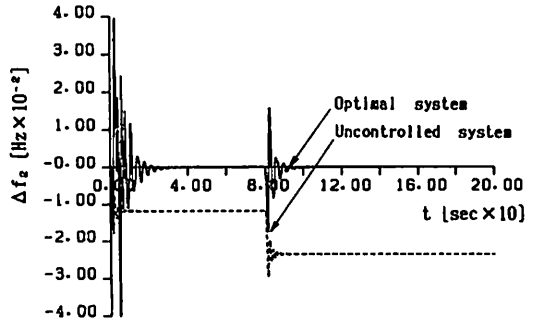


Fig. 7 Responses of  $\Delta f_2(t)$ .

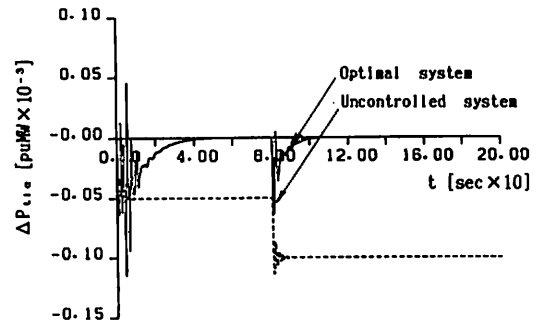


Fig. 8 Responses of  $\Delta P_{1ie}(t)$ .

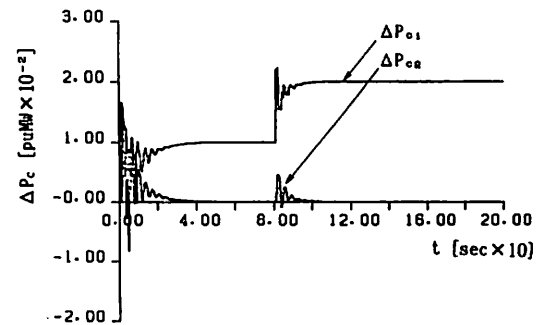


Fig. 9 Responses of  $\Delta P_c(t)$ .

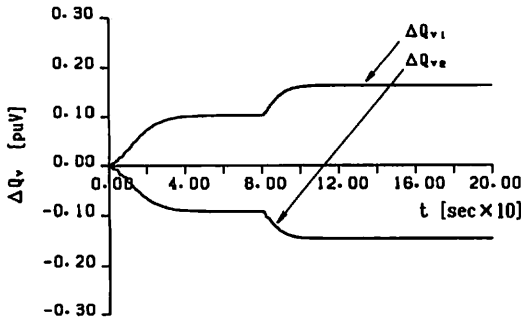


Fig. 10 Responses of  $\Delta Q_v(t)$ .

間応答を示したものである。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。

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、負荷変動に電圧の影響を考慮した非再熱式火力系からなる2地域電力系統モデルに適用し、その有効性については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検証した。

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) 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, p. 634(昭60)  
 (3) 山下・谷口: "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, p. 972(昭60)  
 (4) 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, p. 294(昭61)  
 (5) Yamashita. Taniguchi: "Optimal Observer Design for Load-Frequency Control", Int. J. of Elect. Power & Energy Syst., pp.93-100 (1986)  
 (6) 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, pp. 1043-1050(昭61)  
 (7) 山下・宮城: "ランプ負荷外乱を考慮した LQI 形負荷周波数制御", 電学論, B. 107, p. 323(昭62)  
 (8) Yamashita. Miyagi: "LQI-Type Load-Frequency Control with First-Order Sampling Holder which Improves Control Performance against Rampwise Load Disturbances" Electric Machines & Power Syst., Vol. 16, No. 3, pp. 183-192 (1989)  
 (9) Yamashita. Miyagi: "LQI-Type Load-Frequency Control with First-Order Sampling Holder under Consideration of Generation Rate Constraint", Electric Machines & Power Syst., (to submit)  
 (10) 山下・宮城: "MRACS による電力系統の負荷周波数制御", 電学論, B. 108, p. 336(昭63)  
 (11) Yamashita. Miyagi: "Design of Self-Tuning Regulator for Load-Frequency Control", Proc. of SICE' 88, pp. 843-846 (1988)  
 (12) Yamashita. Miyagi: "Microprocessor-Based Load-Frequency Self-Tuning Regulator", Proc. of IECON' 88, pp. 545-549 (1988)  
 (13) Yamashita. Miyagi: "Load-Frequency Self-Tuning Regulator for Interconnected Power Systems with Unknown Deterministic Load Disturbances", Int. J. of Control, Vol. 49, No. 5, pp. 1555-1568 (1989)  
 (14) Yamashita. Miyagi: "A Design of Multivariable Self-Tuning Regulator for Load Frequency Control", Proc. of SICE' 89, pp. 1147-1150(1989)  
 (15) Yamashita. Miyagi: "Load-Frequency Self-Tuning Using A Governor and Voltage Controls", Electric Machines & Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 43-52 (1989)  
 (16) Yamashita. Miyagi: "A Multivariable Self-Tuning Regulator for Load Frequency Control System with the Inclusion of Interaction of Voltage on Load Demand", IEE Proc. (to appear)  
 (17) 山下・桑江・宮城: "制御遅れを考慮した多変数適応形負荷周波数制御", 琉球大学紀要, No.40(投稿中)