干渉のある流量制御系への最適レギュレータの応用†

中 本 政 志*・小久保 隆**

中 井 昭 祐*・田 辺 仁 志***

Application of Linear Quadratic Regulator to an Interactive Flow Control System for a Thermal Power Plant

Masashi NAKAMOTO*, Takashi KOKUBO**,
Akimasa NAKAI* and Hitoshi TANABE***

In this paper an LQR design method has been applied to develop a practical multivariable controller for an interactive flow and pressure control system of a thermal power plant. The low order controller which is obtained by the balanced realization has comparable burden of calculation and memory to conventional controllers. The two degree of freedom configuration enhances the tracking ability. Experimental results in the utility power plant show the control performance.

Key Words: LQR, order reduction, multivariable system, thermal power plant, fluid control

1. はじめに

本稿では火力発電プラントにおいて、むだ時間と干渉のある流体の制御に多変数制御による設計法を用いて制御設計をおこない実機試験で効果を確認した結果を報告する。

火力発電プラントは、水や蒸気などの流体を取り扱う多くの機器から構成される大規模なプラントである。このプラントを安定に運転するために数多くの制御ループがある。発電プラントには電力の需給のバランスをとるために、発電出力の頻繁な変化と、起動停止を含む幅広い運転範囲がある。一方、運転の自動化が進められており、起動から定格まで手動操作の介入なしで運転できることが要求されている。これらの運転要求をみたく制御系を構成することが求められる。

発電プラントの制御は Fig. 1 に示すように階層化されており、上位の制御系は、プラント全体や複数の機器からなる

設備を調整することを目的として、下位の制御系の指令信号を作る。下位の制御系は上位の制御系からの指令値に追従するよう操作端を直接操作する信号を作る。一般に上位の制御系には比較的複雑な制御方式が採用されることが多いが、下位の制御系が十分な制御性を持つことでその効果が実現される。また下位の制御系には数多くの制御ループがあるので、制御性能が良いだけでなく経済性や保守の観点から構造が簡単で計算量が少なく調整の容易な制御方式が望ましい。

このような下位の制御系として、ポンプ、弁、配管などから構成される比較的単純な機器構成をもつ、流量や圧力制御ループがある。通常これらの制御系はPI制御を基本に構成されることが多いが、しばしば制御対象に大きな干渉を持つことがあり、目標値への十分な追従性が得られない場合がある。

さらにここで検討する系は制御装置での信号の伝送によるむだ時間を持つ。最近のプロセス制御では、現場との入出力信号のアナログ・デジタル変換や制御演算がネットワーク上

Fig. 1 Power plant control configuration

† 第 37 回自動制御連合講演会で発表 (1994・11)

* (株)東芝 重電技術研究所 横浜市鶴見区末広町 2-4

** 東京電力(株)エネルギー・環境研究所 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

*** (株)東芝 電力営業第一部 東京都千代田区内幸町 1-1-6 NTT 日比谷ビル

* Heavy Apparatus Eng. Lab., TOSHIBA Corporation, Tsurumi-ku, Yokohama

** Energy and Environment R&D Center, Tokyo Electric Power Company, Tsurumi-ku, Yokohama

*** First Power Systems Sales Dept., TOSHIBA Corporation, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received January 12, 1996)

(Revised February 7, 1997)

に別々におかれた複数の装置で行われるようになってきている⁶⁾。このため制御装置内で信号の転送毎に時間遅れが累積され、無視されない大きさのむだ時間が生じることがある。

このような制御対象にむだ時間や干渉を考慮した多変数制御設計手法を適用し、上位系からの目標値への追従性を改善することで、プラント全体の運転特性が向上することが期待できる。

これまでに多変数制御の発電プラントへの応用として、火力発電プラントの蒸気温度制御¹¹⁾がある。これはPID制御装置の補償用として設計されている。モデル予測制御の適用として^{9) 10)}があるが、いずれもシミュレーション検討である。文献7)では H_∞ 制御によるボイラーの蒸気流量の制御が報告されているが、ここで検討するようなむだ時間は持たない対象である。また従来の実施例では、使用される制御方式はPI制御と比べ大きな計算量を持つ。

本研究では多変数制御設計手法として最適レギュレータ (Linear Quadratic Regulator: LQR) を用いて、干渉とむだ時間のある流体の制御系の設計を行う。制御性の向上だけでなく実用性も検証することを目的とする。このため2自由度構成による目標値への追従性を改善する制御器と、低次元化により計算量を軽減する制御器を求める。得られた制御器について、実機プラントにて試験を行い効果を検証する。

以下、2章では制御対象とその動特性の特徴、プラントのモデリングについて述べる。3章では制御設計について説明する。4章では試験結果を示し多変数制御の有効性と実用性を確認する。

2. 制御対象について

2.1 プラントの概要

ここで対象とするプロセスは Fig. 2 に示すような配管上に2台の空気圧作動の調節弁が直列に並んだ構成を持つ。この管路の流体の流量と圧力を目標値に調整することが制御の目的である。このような系統は火力・原子力発電プラントの給水系や蒸気系等にしばしば設けられる。本研究の対象プロセスでは流量指令値が上位の制御系から与えられ、圧力の指令値は一定である。制御対象の動特性の概要を理解するために、動特性についての概略ブロック図を Fig. 3 に示す。

操作量 u_1 , u_2 は CV1, CV2 への開度指令信号、制御量は流量 y_1 と圧力 y_2 である。図から明かなように、このプロセスは干渉と非線形性を持つ。また制御装置とプラントの間の信号変換と信号の転送によるむだ時間は、プラントの動特性としてモデル化する。

これまでの発電プラントの制御方式では、Fig. 4(a) に示すように流量制御ループと圧力制御ループをそれぞれ独立に構成し制御を行っていた。このため相互干渉により不安定になりやすく、早い追従性を得られなかった。これを Fig. 4(b) のように多変数制御系として設計し、制御性を向上させることが本研究の課題である。

Fig. 2 Flow rate and pressure control system

Fig. 3 Block diagram of a nonlinear model

pressure reference flow reference

(a) Conventional Control

pressure reference flow reference

(b) Multivariable Control

Fig. 4 Multivariable control design

2.2 システム同定

プラントモデルを (1) 式で表す。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで $u = [u_1 \ u_2]^T$, $y = [y_1 \ y_2]^T$ はそれぞれ操作量、制御量を表す。また $G_{ij}(z^{-1})$, $i = 1, 2, j = 1, 2$ は u_j から y_i への離散時間伝達関数である。

プラントの動特性を理論式を用いて正確に記述すること、またそこで用いられる係数を正しく求めることは難しい。一方、制御対象は安定な系であるため開ループ試験を行いやすい。このため2個の操作端にM系列信号を加えて求めた入

Fig. 5 Plant model

(a) rated flow model, u_1 change(upper) and u_2 change(lower) (b) low flow model, u_1 change(upper) and u_2 change(lower)

Fig. 6 Step response of the plant model, flow rate(solid line) and pressure(dotted line)

出力応答から、最小2乗法¹⁾により各サブシステムの伝達関数 $G_{ij}(z^{-1})$ の係数を求める。

各伝達関数の次数はモデルとデータの周波数特性が一致するように定める。また対象プロセスの特性はプラントの運転点により変化する。ここでは定格流量時の試験データから求めたモデルを用いてコントローラを設計する。特性変化の評価のために低流量(約1/2流量)時のモデルも求める。付録にプラントの伝達関数を示す。

システム同定で求めた4個のサブシステムの伝達関数の分母には $1/z^4$ の共通因子がある。このためそれぞれの伝達関数を状態方程式に変換し、組合わせると、系全体は不可制御あるいは不可観測になる。これを避けるため、 $\tilde{G}_{ij} = z^4 G_{ij}$, $i = 1, 2, j = 1, 2$ とおき Fig. 5 に示すよう $1/z^4$ の因子をくりだし系全体の状態方程式を求める。これにより制御対象の次数は25次となる。

定格流量のモデルのステップ応答を Fig. 6(a), 低流量時

(a) G_{11} gain and phase (b) G_{12} gain and phase (c) G_{21} gain and phase (d) G_{22} gain and phase

Fig. 7 Bode diagram of the identified model, rated flow(solid line) and low flow(dashed line)

のモデルのステップ応答を Fig. 6(b) に示す。またモデルの周波数応答を Fig. 7 に示す。これらの周波数特性やステップ応答特性から、制御対象はプロセス制御に多い単純な高次遅れの動特性をもつことが分かる。また立ち上がり時間と同程度のむだ時間が含まれている。このため高い周波数での位相の遅れが大きい。また運転点の変化により各入力から出力 y_1 へのゲインが変化することがわかる。

3. 制御設計

3.1 最適レギュレータ

最適レギュレータ^{2) 3)}は標準的な多変数制御の設計法であり、ここでは計算方法を簡単に説明する。

制御対象の状態方程式を次式とする。

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (2)$$

$$y_k = Cx_k \quad (3)$$

ここで、 x_k, y_k, u_k はそれぞれ時刻 k のプラントの状態変数、出力、入力である。

次の二点を考慮したコントローラを求める。

- 定常偏差を避けるため積分器をもつサーボ型コントローラする
- プラントの状態量を推定するオブザーバーを用いる。

この時、コントローラは次式で表される。

$$\hat{x}_{k+1} = (A - LC)\hat{x}_k + Bu_k + Ly_k \quad (4)$$

$$w_{k+1} = w_k + (r_k - y_k) \quad (5)$$

$$\hat{u}_k = F_1 \hat{x}_k + F_2 w_k \quad (6)$$

$$u_k = u_{min} < \hat{u}_k < u_{max} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{x}_k, w_k, r_k$ はそれぞれ、オブザーバーの状態変数、積分器の状態、目標値である。(4) 式の u_k に (6) 式を代入しないのは次の理由からである。

- プラントに入る入力は必ずしも (6) 式とはならない。信号の飽和や制御装置の切り替え、手動操作等の場合。
- 手動操作や信号の飽和時など、 u_k として (6) 式が選ばれない場合でも、 $A - LC$ は常に安定性が保証されているので、コントローラは発散しない。

(6) 式の F_1, F_2 はプラントと積分器を含んだ拡大プラントについての Riccati 方程式を解いて求める。

$$P = A_c^T P A_c + Q - A_c^T P B_c (R + B_c^T P B_c)^{-1} B_c^T P A_c \quad (8)$$

$$F = -(R + B_c^T P B_c)^{-1} B_c^T P A_c \quad (9)$$

ここで、

$$A_c = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & I \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} C^T Q_1 C & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix}, F = [F_1 \ F_2]$$

とである。また Q_1, Q_2, R はそれぞれプラントの出力、積分器の状態量、操作量への重み行列で、調整パラメータになる。オブザーバーのゲイン L は行列 $A - LC$ が安定になるように選ぶ。ここでは LQR の設計を利用して L を求める。

3.2 2自由度構成

設定値への追従性を改善するために、目標値からのフィードフォワード (ff) を追加する。ff ゲインは、状態フィード

バックを行ったプラントの入出力間の定常ゲインの逆数として求める。

$$F_3 = [C(I - A - BF_1)^{-1}B]^{-1} \quad (10)$$

このゲインは定常時の操作量の大きさを与えるため、過渡時には目標値とプラント出力の誤差により作られる積分器の出力が加わり操作量が必要以上に大きくなり、プラント出力にオーバーシュートを生じることがある。これを避けるため目標値から積分器にプラントモデルをもたせ、外乱やモデル化誤差がない場合には積分器を働かせない方法がある⁵⁾。その場合でもプラントそのものがオーバーシュートする特性では出力にオーバーシュートが現れる。ここではゲイン F_3 にスカラーゲイン α をかけて操作量の大きさを調整しオーバーシュートを生じないようにする。1自由度構成と2自由度構成のコントローラの目標値への応答のシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。(10) 式をそのまま用いた場合では大きなオーバーシュートが生じる。またモデルをもたせた場合でもプラントの特性からオーバーシュートが生じる。これに対して F_3 を調整することでオーバーシュートなしで目標値への早い追従性が得られる。この計算では α を 0.5 としている。

3.3 コントローラの低次元化

得られたコントローラの次数は、元のモデルの次数+積分器の数となる。次数が大きくなると計算量やコントローラの使用メモリ量が増えるので好ましくない。このため上で求めたコントローラを低次のシステムで近似する。この低次元化はオブザーバによるフィードバック部分に対して行う。このため (4) 式を次のように書き換える。

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= A\hat{x}_k + Bu_k + L(y_k - \hat{y}_k) \\ &= (A - LC)\hat{x}_k + [B \ L] \begin{bmatrix} u_k \\ y_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$v_k = F_1 \hat{x}_k \quad (12)$$

このシステムを入力が $[u_k^T \ y_k^T]^T$ 出力が v_k の線形システムとみて、平衡実現により低次元化する⁸⁾。

Fig. 8 Comparison of the step response between two degree and one degree configuration, ff gain F_3 (dotted line), ff with model (dashed line), adjusted ff gain (solid line) and one degree controller (dashdot line)

$$(A - LC, [B \ L], F_1, 0) \rightarrow (\hat{A}, [\hat{B}_1 \ \hat{B}_2], \hat{F}_1, 0)$$

これからコントローラは次式となる.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{A}\hat{x}_k + \hat{B}_1 u_k + \hat{B}_2 y_k \quad (13)$$

$$w_{k+1} = w_k + (r_k - y_k) \quad (14)$$

$$\hat{u}_k = \hat{F}_1 \hat{x}_k + F_2 w_k \quad (15)$$

$$u_k = u_{min} < \hat{u}_k < u_{max} \quad (16)$$

低次元化したコントローラの周波数特性を **Fig. 9** に示す. また流量目標値のステップ変化に対するシミュレーションとして, 設計点である定格流量時のプラントモデルとの組み合わせを **Fig. 10(a)** に, 低流量モデルとの組み合わせを **Fig. 10(b)** に示す. 実線は全状態オブザーバ, 破線と点線はオブザーバの次数がそれぞれ 3 次と 1 次である. 破線のプロットは実線とはほぼ重なって区別がつかない. このように低次元化したコントローラの特性的変化は小さいことがわかる.

積分器の次数が 2 次あるので, この検討での最小の次数のコントローラは 3 次となる. オブザーバの部分を直達分のゲイン (比例ゲイン) だけで近似しなかったのは, プラントに加わるノイズの操作量への影響を低減する効果を持たせるためである. これはプラントのノイズなどで操作端を頻繁に動作させると, 操作端の機械部分の寿命を劣化させることになり, 制御システムの信頼性の点から好ましくないことによる.

3.4 速度型の計算

実際のプラントに用いる場合, 操作端の飽和や手動自動のバンプレス切り替えを考慮しておかないといけない. このためデジタル PID 制御で用いられている速度型の計算方法を

用いる⁴⁾. これはコントローラの制御計算を信号の差分で行い, 最後に積分して出力する方法である. このときオブザーバに入る信号を差分する方法と, 出る信号を差分する方法がある. これらの計算方法で 2 自由度型の LQR は (13) (14) (15) (16) 式のかわりに,

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{A}\hat{x}_k + \hat{B}_1 u_k + \hat{B}_2 y_k$$

$$\hat{v}_k = \hat{F}_1 \hat{x}_k$$

$$\Delta u_k = (\hat{v}_k - \hat{v}_{k-1}) + F_2(r_{k-1} - y_{k-1}) + \alpha F_3(r_k - r_{k-1})$$

$$\hat{u}_k = u_{k-1} + \Delta u_k$$

$$u_k = u_{min} < \hat{u}_k < u_{max}$$

あるいは次のようになる.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{A}\hat{x}_k + \hat{B}_1(u_k - u_{k-1})$$

$$+ \hat{B}_2(y_k - y_{k-1})$$

$$\hat{v}_k = \hat{F}_1 \hat{x}_k$$

$$\Delta u_k = \hat{v}_k + F_2(r_{k-1} - y_{k-1}) + \alpha F_3(r_k - r_{k-1})$$

$$\hat{u}_k = u_{k-1} + \Delta u_k$$

$$u_k = u_{min} < \hat{u}_k < u_{max}$$

上の計算式による速度型アルゴリズムによる 2 自由度 LQR の構成を **Fig. 11** に示す.

この計算方法では最後の u_k の積分計算に用いられる操作量の変化分 Δu_k を, 手動操作信号や他の制御装置からの信号と切り替えることでバンプレス切り替えも実現できる.

前の節で求めた 1 自由度の 3 次のコントローラの速度型

Fig. 9 Singular value plot of the sensitivity function and complementary sensitivity function, full order (solid line), 5th order (dashed line) and 3rd order (dotted line)

Fig. 10 Closed loop simulation, full order (solid line), 5th order (dashed line) and 3rd order (dotted line)

Fig. 11 Velocity algorithm of an LQR

Fig. 12 Block diagram of a low order LQR configuration

演算による具体的な計算ブロック図を Fig. 12 に示す。3 次の LQR による制御器は、積分ゲインを 4 個、低次元化オブザーバに 7 個の計 11 個のパラメータと遅れ演算子を 6 個とで実現できる。2 台の速度型 PI 制御器では積分ゲイン 2 個、比例ゲイン 2 個の計 4 個のパラメータと遅れ演算子 4 個で実現される。PI 制御器に 1 次のフィルタを付けるとさらにパラメータが 4 個、遅れ演算子 2 個必要であるから、パラメータは計 8 個、遅れ演算子は計 6 個必要となる。この場合、PI 制御器と LQR でのコントローラに実装する負荷はほぼ同じになる。

4. 試験結果

4.1 パラメータ調整

商用運転を行っているプラントでの制御調整は、運転の信頼性を損なわないよう安定性を優先して保守的な応答から徐々に特性を上げていく。このため運転結果をみながら制御パラメータの調整が必要である。LQR のゲイン計算での Q , R の重みは相対的なもので、ここでは R を単位行列に固定して Q_1, Q_2 の対角要素 4 個をパラメータとして調整を行う。調整要素の数は 2 台の PI コントローラと同じになる。またここで示す試験結果では Q_1, Q_2 の対角要素はすべて 0.005 となった。

Fig. 13 Comparison of the flow rate change at the experimental test between one degree(dotted line) and two degree(solid line) LQR controller

(a) rated flow test

(b) low flow test

Fig. 14 Experimental test result by the PI controller(solid line), the high order LQR(dashed line) and the low order LQR(dotted line)

4.2 2自由度コントローラによる試験結果

2 自由度型コントローラを用いて行った試験結果を Fig. 13 に示す。この試験は圧力設定値 r_2 を一定として流量設定値 r_1 を時刻 0 で単位量 (設計流量の 6% 分) ステップ的に変化した。設定値からのフィードフォワードゲインは 3.1 節で説明したように (10) 式の F_3 を 0.5 倍したものを用いた。1 自由度 (点線) の場合と比べ 2 自由度 (実線) では目標値への追従が早くなっていることがわかる。またオーバーシュートもみられない。

ただし運転点を変えると、プラントのゲイン特性が変化するため、固定値のフィードフォワードでは適切な操作量にな

らない。このために生じる出力と目標値との誤差の修正はフィードバックで行われるので、2自由度型でもフィードバックの設計は重要である。

4.3 低次元化コントローラによる試験結果

設計点での目標値のステップ応答試験結果を Fig. 14(a) に示す。また低流量での試験結果を Fig. 14(b) に示す。試験条件は 4.2 節と同じである。これらの試験は低次元化によるコントローラの特性をみるため、1 自由度型のコントローラで行った。また特性の比較のため積分器を含めて 18 次と 3 次のコントローラを用いた。シミュレーション結果と同様に 3 次に低次元化したコントローラによる応答は高次のコントローラを用いた結果とほぼ同様である。また PI 制御と比較して目標値への到達時間が $1/3$ 以下になっている。また圧力変動も小さく非干渉化された結果となっている。低流量の場合にはプラントのゲインが低下するため追従性が劣化する。ただしこの場合でも PI 制御よりも早く目標値に追従する。

4.4 上位制御系からの指令による運転結果

ここでは実際の運用形態である、上位の制御系からの流量指令値を与えられた場合の運転結果を示す。発電出力がほぼ最大で一定の時と、大きな出力変化を行った時の試験結果を示す。これらの試験の結果は定格の流量と圧力を 1 として相対値で示す。

発電出力をほぼ一定とした試験では 3 次の低次元化したコントローラを用いた。LQR のフィードバック効果をみる

Fig. 15 Comparison of the flow rate error and the pressure error at the operation test between PI control(upper plot) and LQR(lower plot)

ためこの試験は 1 自由度型で行う。流量目標値と実流量との誤差を Fig. 15(a) に示す。同じ運転状態での圧力の変化を Fig. 15(b) に示す。それぞれの図で上段に PI 制御、下段に LQR による結果を示す。発電プラントは電力系統からの外乱により常に小さな出力変化があるため、これらの試験でも常に上位制御系からの流量指令値は変動している。

発電プラントの運転点を大きく変化したときの流量変化について、PI 制御による結果を Fig. 16(a) に、LQR による結果を Fig. 16(b) に示す。これらの図で上段は流量目標値と実流量、下段は誤差を示している。同じ試験の圧力変化を Fig. 17 に示す。この図では上段に PI 制御、下段に LQR による結果を示す。この試験は 2 自由度型で行なった。

Fig. 16 Large load change test, flow rate setpoint(solid line of the upper plot), flow rate(dotted line of the upper plot) and the flow rate error(lower plot)

Fig. 17 Comparison of the pressure at the large load change between PI control(upper plot) and LQR(lower plot)

Table 1 Mean squares of the flow and pressure error at the operation test

(a) rated condition		
	flow	pressure
PI control	1.077×10^{-4}	5.947×10^{-6}
LQR	1.966×10^{-5}	7.848×10^{-7}

(b) large load change		
	flow	pressure
PI control	5.475×10^{-4}	1.141×10^{-4}
LQR	1.847×10^{-5}	7.281×10^{-6}

これらの試験での誤差の2乗平均を **Table 1** に示す。定格流量ではLQRにより誤差が約1桁小さく抑えられていることがわかる。また2自由度型とすることで、大きな変化に対しても応答性能の良いコントローラが得られた。

5. ま と め

本論文では干渉とむだ時間のある流量系にLQRによる多変数制御設計を行った。特に実用性と制御性の向上を目的としてコントローラを構成し発電プラントでの実機試験により効果を検証した。特にPI制御と同等の計算量に低次元化したコントローラで制御性を向上できることを示した。また2自由度構成により、さらに制御性が改善されることを示した。

参 考 文 献

- 1) 足立：ユーザのためのシステム同定理論，計測自動制御学会 (1993)
- 2) B. D. O. Anderson and J. B. Moore：Linear Quadratic Optimal Control, Prentice-Hall (1990)
- 3) K. J. Astrom and B. Wittenmark：Computer Controlled Systems, Prentice-Hall (1984)
- 4) R. Isermann：Digital Control Systems, Springer-Verlag (1981)
- 5) 池田，須田，藤井：現代制御理論基礎講座初級テキスト，計測自動制御学会 (1990)
- 6) 計測自動制御学会：計測と制御 ミニ特集 プロセスオートメーションにおけるライトサイジング，34-11 (1995)
- 7) 中本，清水，福田，日野：排熱回収ボイラーの H_∞ 制御，システム制御情報学会論文誌，7-5，176/184 (1994)
- 8) 大日方：平衡実現，ハンケルノルムおよび連分数展開を用いた制御系の低次元化，システム/制御/情報，34-9，508/514 (1990)
- 9) J. A. Rovnak, R. Corlis：Dynamic Matrix Based Control of Fossil Power Plants, IEEE Trans. on Energy Conversion, 6-2，320/326 (1991)
- 10) J. A. Rossiter, B. Kouvaritakis, R. M. Dunnnett：Application of Generalized Predictive Control to a Boiler-turbine Unit for Electricity Generation, IEE Proceedings-D, 138-1，59/67 (1991)
- 11) M. Uchida, H. Nakamura, Y. Toyota and M. Kushihashi：Implementation of Optimal Control at a Supercritical Variable-Pressure Thermal Power Plant, Preprint of IFAC Symposium on Power System and Power Plant Control, 336/341 (1986)

《付 録》

A. プラントモデル

1) 定格流量のモデル

$$G_{11}(z) = \frac{0.22z^4 + 0.0804z^3 - 0.0557z^2 - 0.0895z - 0.0106}{z^9 - 0.67z^8 - 0.0294z^7 - 0.0702z^6 + 0.0001z^5 + 0.0482z^4}$$

$$G_{12}(z) = \frac{0.0735z^3 + 0.221z^2 + 0.226z + 0.116}{z^8 - 0.719z^7 - 0.0605z^6 - 0.0092z^5 + 0.0604z^4}$$

$$G_{21}(z) = \frac{-0.0084z^3 - 0.0462z^2 - 0.0626z - 0.0538}{z^8 - 0.718z^7 - 0.125z^6 - 0.071z^5 + 0.122z^4}$$

$$G_{22}(z) = \frac{0.0151z^3 + 0.0625z^2 + 0.0788z + 0.06}{z^8 - 0.773z^7 - 0.102z^6 - 0.0415z^5 + 0.116z^4}$$

2) 低流量のモデル

$$G_{11}(z) = \frac{0.127z^4 + 0.0304z^3 - 0.0358z^2 - 0.057z - 0.0614}{z^9 - 0.65z^8 - 0.1444z^7 - 0.115z^6 + 0.0537z^5 + 0.0208z^4}$$

$$G_{12}(z) = \frac{0.0422z^3 + 0.0902z^2 + 0.083z + 0.0462}{z^8 - 0.677z^7 - 0.0346z^6 + 0.0282z^5 - 0.0436z^4}$$

$$G_{21}(z) = \frac{-0.0064z^3 - 0.0287z^2 - 0.0378z - 0.0357}{z^8 - 0.723z^7 - 0.164z^6 - 0.103z^5 + 0.112z^4}$$

$$G_{22}(z) = \frac{0.0067z^3 + 0.034z^2 + 0.0447z + 0.0489}{z^8 - 0.748z^7 - 0.165z^6 - 0.113z^5 + 0.144z^4}$$

〔著 者 紹 介〕

中 本 政 志 (正会員)

73年大阪大学基礎工学部電気工学科卒，73年から77年までダイキン工業(株)勤務。79年大阪大学基礎工学部制御工学科修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在，重電技術研究所にて発電プラントの動特性解析と制御に関する研究開発に従事。システム制御情報学会，IEEEなどの会員。

小久保

隆 (正会員)

80年成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了，同年東京電力(株)に入社。現在，エネルギー・環境研究所エネルギー研究室にて発電プラントに関する研究開発に従事。電気学会などの会員

中 井 昭 祐 (正会員)

91年九州大学総合理工学研究科修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在，重電技術研究所にて発電プラントの動特性解析と制御に関する研究開発に従事。電気学会などの会員

田 辺 仁 志

80年長野県立駒ヶ根工業高校卒業，同年(株)東芝入社。火力制御システム技術部を経て，現在，電力営業第一部にて発電プラントの営業業務に従事。