



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	PWR型原子力発電プラント原子力蒸気供給系の準最適負荷追従運転 : 近似的なモデル・フォローイング法を用いた準最適制御系設計法の開発
Author(s)	辻, 雅司; Tsuji, Masashi; 小川, 雄一 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 139, 19-28
Issue Date	1988-02-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42085">https://hdl.handle.net/2115/42085</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	139_19-28.pdf



# PWR型原子力発電プラント原子力蒸気供給系の 準最適負荷追従運転

—— 近似的なモデル・フォローイング法を用いた  
準最適制御系設計法の開発 ——

辻 雅 司\* 小 川 雄 一\*

(昭和62年9月30日受理)

## Suboptimal Control of a Pressurized Water Reactor Power Plant Using an Approximate Model-Following Method

Masashi TSUJI\* and Yuichi OGAWA\*

(Received September 30, 1987)

### Abstract

An attempt to design an effective control system for maneuvering the nuclear steam supply system of a pressurized water reactor power plant in an operational mode requiring relatively small variations of power is presented. For this design, a procedure consisting of two design steps using the optimal control theory based on the linear state-feedback control and an approximate model-following method is proposed. Utilizing the respective merits of these two methods, the proposed method becomes practically applicable to the control problems of large-scale complex dynamical engineering systems, because it can readily provide a simply, yet practiced, suboptimal controller. Digital simulation and frequency analysis demonstrates the effectiveness of the suboptimal control, and the applicability of the proposed design method as well.

### 1. 序 論

本研究は、PWR型原子力発電プラントが負荷変動に応じて小規模な出力変更を繰り返すような負荷追従運転<sup>(1),(2)</sup>を行う場合に、系の健全性を損ねることなく負荷変動に迅速に対応できる原子力蒸気供給系の制御系を設計する試みを行った。併せて、原子力発電プラントのように大規模で複雑な一般の工学システムの制御系の設計問題に対しても、簡単な構造を持ち工学的に実現が容易な制御系の設計ができる設計手法の提案を行った。

今回開発した手法は状態帰還制御法による最適制御理論と近似的なモデル・フォローイング法を効果的に併用したものである。モデル・フォローイング法には、COOK<sup>(3)</sup>によって考察された手法に筆者らが近似の考え方をより広範に取り入れて改良を加えた手法<sup>(4)</sup>を採用した。この改良

\* 原子炉工学講座

により、本設計手法は大規模で複雑なシステムの制御問題にも適用でき、また設計される制御系も比較的簡単な構造を持つなどの工学的に実現性に富む特徴を持つようになった。

デジタル・シミュレーションの結果や周波数解析の結果から、設計された準最適制御系は比較的簡単な構造ではあるが、最適制御理論によって設計された補償系とほぼ同等の制御特性で蒸気供給系を制御することが可能であることが判った。

## 2. 近似的なモデル・フォローイング法による準最適制御系の設計手法

今回の試みで用いた準最適制御系は、図1に示すように動的補償器と直接出力帰還補償制御系から構成される。図に示す準最適制御系の構造から明らかのように、設計問題の中心は動的補償器の設計にある。本研究では、最適状態帰還制御とほぼ同

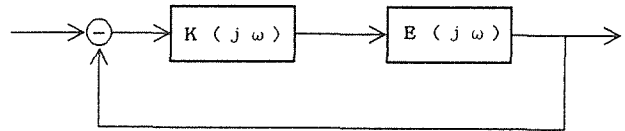


図1 動的補償器と出力帰還補償で制御された系  
( $E(j\omega)$ : 制御の対象の系,  $K(j\omega)$ : 動的補償器)

等の制御特性を保つとともに、比較的簡単な構造を持ち工学的に実現が容易な動的補償器を設計することを試みる。ここでは、線形時間不変系の線形2次形式問題に対する最適状態帰還制御理論と近似的なモデル・フォローイング法を併用した設計手法を提案する。この方法では、まず最初に、最適状態帰還制御理論を用いて最適な状態帰還制御系を設計し、この制御系で補償された閉ループ系をモデル・フォローイングに対する規範モデルとして与える。ついで、図1に示す閉ループ系の特性と、規範モデルの特性とがほぼ等しくなるように、近似的なモデル・フォローイング法を適用して動的補償器を設計する。筆者らはCOOK<sup>(3)</sup>の提案したモデル・フォローイング法に近似の考え方をさらに押し進める改良を加え、大規模多変数系の制御問題に対しても適用可能なモデル・フォローイング法<sup>(4)</sup>を開発した。以下にその手法の概要について述べる。

図1に示す系を考える。ここで、 $E(j\omega)$ と $K(j\omega)$ は、それぞれ制御の対象とする系と動的補償器の周波数伝達関数行列を表す。制御の対象とする系は $m$ 個の入力と $k$ ( $k \leq m$ )個の出力を持つものとする。したがって、 $E(j\omega)$ と $K(j\omega)$ はそれぞれ $k \times m$ と $m \times k$ の次元を持つ行列である。

以下の議論では、図1に示す系の閉ループ周波数伝達関数行列 $H(j\omega)$ は既に与えられている行列と仮定する。本研究では $H(j\omega)$ は、上述のように最適状態帰還制御理論の適用で決定されるが、以下に紹介する設計手法は、制御目的に応じて適当な $H(j\omega)$ を与えることによって準最適制御以外の制御問題に対しても適用できる。

図1に示す系の閉ループ周波数伝達関数行列を $H(j\omega)$ と表すとき、この系の開ループ周波数伝達関数行列 $Q(j\omega)$ はつぎのように与えられる。

$$E(j\omega)K(j\omega) = Q(j\omega) \quad (1)$$

ここで、 $Q(j\omega)$ は既知の行列 $H(j\omega)$ によって、つぎのように求められる。

$$Q(j\omega) = H(j\omega)(I_k - H(j\omega))^{-1} \quad (2)$$

そこで、周波数伝達関数行列が次式のように右既約分解の形で表現される動的補償器を設計することにする。

$$K(j\omega) = V(j\omega)T(j\omega)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 $V(j\omega)$ と $T(j\omega)$ は以下に示す $j\omega$ に関する $p$ 次の行列多項式とする。

$$V(j\omega) = V_p(j\omega)^p + V_{p-1}(j\omega)^{p-1} + \dots + V_0 \quad (4)$$

$$\mathbf{T}(j\omega) = \mathbf{I}_k(j\omega)^p + \mathbf{T}_{p-1}(j\omega)^{p-1} + \dots + \mathbf{T}_0 \quad (5)$$

$\mathbf{V}_i (i=0, 1, \dots, p)$  と  $\mathbf{T}_i (i=0, 1, \dots, p-1)$  を未知の実数の要素を持つ  $m \times k$  と  $k \times k$  の次元の未定係数行列である。

動的補償器の設計は、方程式(1)を満足するように、未定係数行列  $\mathbf{V}_i$  と  $\mathbf{T}_i$  を決定する問題に帰着される。ここで、上記の設計問題で注意すべき点は、(1)式をすべての周波数範囲にわたって満足させるような動的補償器を設計しようとする、制御の対象とする系が複雑な大規模多変数系である場合には、工学的に実現が困難であるような極めて複雑な補償器が設計されることである。本研究は、この困難性を回避するために、モデル・フォローイングにおいて近似の概念を合理的に導入することによって、簡単な構造を持つ補償器を設計することを試みた。すなわち、モデル・フォローイングにおいて、(1)式をすべての周波数領域において満足させるのではなく、注目する周波数領域内のいくつかの周波数点で、最小自乗の意味において(1)式を満足させることを考えた。

この考え方で設計を進めるために、まず注目する周波数領域から  $q$  個の周波数  $\omega_i (i=1, 2, \dots, q)$  を選択する。議論の都合上、この時点では、 $q$  の値を未定の整数としておく。

周波数  $\omega_i$  における(1)式を(3)式の関係を用いて書き表すとつぎのようになる。

$$\mathbf{E}_i \mathbf{V}(j\omega_i) = \mathbf{Q}_i \mathbf{T}(j\omega_i) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{E}_i$  と  $\mathbf{Q}_i$  はそれぞれ  $\mathbf{E}(j\omega_i)$  と  $\mathbf{Q}(j\omega_i)$  の省略表現である。

(6)式を簡潔に表すために以下の行列を定義する。

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{V}_p^T, \dots, \mathbf{V}_0^T, \mathbf{T}_{p-1}^T, \dots, \mathbf{T}_0^T] \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_i = [\mathbf{E}_i, (j\omega_i)^{-1}\mathbf{E}_i, \dots, (j\omega_i)^{-p}\mathbf{E}_i, -(j\omega_i)^{-1}\mathbf{Q}_i, \dots, -(j\omega_i)^{-p}\mathbf{Q}_i] \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{Z}$  は次元が  $(m(p+1) + kp) \times k$  の未定実行列であり、 $\mathbf{D}_i$  は次元が  $k \times (m(p+1) + kp)$  の複素係数行列である。これらの行列を用いて(6)式を表すとつぎのような行列方程式に書き改めることができる。

$$\mathbf{D}_i \mathbf{Z} = \mathbf{Q}_i, \quad i=1, 2, \dots, q \quad (9)$$

上記の方程式は複素行列を係数行列に持つものである、この方程式を実行列を係数行列に持つ行列方程式に書き改めると以下のようなようになる。

$$\bar{\mathbf{D}}_i \mathbf{Z} = \bar{\mathbf{Q}}_i, \quad i=1, 2, \dots, q \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{D}}_i$  と  $\bar{\mathbf{Q}}_i$  は、それぞれ以下のように定義される次元が  $2k \times (m(p+1) + kp)$  と  $2k \times k$  の実行列である。

$$\bar{\mathbf{D}}_i^T = [\mathbf{D}_{i,R}^T, \mathbf{D}_{i,I}^T] \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}_i^T = [\mathbf{Q}_{i,R}^T, \mathbf{Q}_{i,I}^T] \quad (12)$$

上式中に現れる  $\mathbf{D}_{i,R(I)}$  と  $\mathbf{Q}_{i,R(I)}$  は行列  $\mathbf{D}_i$  と  $\mathbf{Q}_i$  の実部(虚部)を表す行列である。(10)式で表された  $q$  本の行列方程式をまとめると以下のような一本の行列方程式で表すことができる。

$$\bar{\mathbf{D}} \mathbf{Z} = \bar{\mathbf{Q}} \quad (13)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{D}}$  と  $\bar{\mathbf{Q}}$  は、それぞれ  $2kq \times (m(p+1) + kp)$  と  $2kq \times k$  の次元の行列であり、以下のような構造を持つ。

$$\bar{\mathbf{D}}^T = [\bar{\mathbf{D}}_1^T, \bar{\mathbf{D}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{D}}_q^T] \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}^T = [\bar{\mathbf{Q}}_1^T, \bar{\mathbf{Q}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{Q}}_q^T] \quad (15)$$

以上より、動的補償器を設計する問題は、(13)式で表される連立代数方程式を最小自乗法を用いて解く問題に帰着された。ところで、(13)式には  $k(m(p+1) + kp)$  個の未知数に対して  $2k^2q$  個の方程式が存在している。未知数を決定するためには、未知数と方程式の数の関係から  $m, k,$

$q, p$  の間には次の条件が満足されていなければならない。

$$2kp \geq m(p+1) + kp \quad (16)$$

この関係式から、動的補償器を設計するためには注目する周波数領域から少なくとも何個 ( $q$ ) の周波数を選択しなければならないかを決定することができる。設計においては、注目する周波数領域内の特性を十分広い範囲にわたって考慮するために、 $q$  の値には上式から決定される最小の値よりも大幅に大きな値が与えられる。つぎに、(13)式に最小自乗法を適用するために以下に定義する関数を導入する。

$$\Phi = \sum_{i=1}^q W_{f,i} \Phi_i \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Phi_i = & \sum_{s=1}^k W_{0,s} \sum_{t=1}^k \{ {}_i q_{s,i} - \sum_{v=1}^{m(p+1)+kp} {}_i d_{s,v} z_{v,t} \}^2 \\ & + \sum_{s=k+1}^{2k} W_{0,s-k} \sum_{t=1}^k \{ {}_i q_{s,i} - \sum_{v=1}^{m(p+1)+kp} {}_i d_{s,v} z_{v,t} \}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 $z_{v,t}$  は行列  $\mathbf{Z}$  の  $(v, t)$  要素であり、 ${}_i d_{s,v}$  と  ${}_i q_{s,v}$  はそれぞれ行列  $\bar{\mathbf{D}}_i$  と  $\bar{\mathbf{Q}}_i$  の  $(s, v)$  要素である。また、 $W_{f,i}$  と  $W_{0,i}$  は重み係数である。上式の定義から明かのように、関数  $\Phi$  は(13)式の左辺と右辺に関する残差を自乗したものの総和であり、この値は方程式(13)の近似解  $\mathbf{Z}$  に含まれる誤差を測る一つの指標として考えることができる。

設計問題は未定行列  $\mathbf{Z}$  に関して関数  $\Phi$  を最小にする最小自乗問題に変換される。最小自乗法の良く知られている特徴として、関数  $\Phi$  に最も大きな寄与を与える残差が優先的に最小化されるという特性がある。この特徴を利用して、重み係数  $W_{f,i}$  や  $W_{0,i}$  の値を適当に調整することで、ある特定の出力について、あるいはある特定の周波数について、モデル・フォローイングの結果を選択的に一致させることができる。

関数  $\Phi$  が未定行列  $\mathbf{Z}$  の要素  $z_{i,j}$  に関して最小になるための必要条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z_{i,j}} = 0, \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, m(p+1)+kp \\ j=1, 2, \dots, k \end{matrix} \quad (19)$$

から、未定の値を持つ要素  $z_{i,j}$  が満たすべき関係式を導くと、つぎのような簡潔な表現をもつ行列方程式を得ることができる。

$$\{\bar{\mathbf{D}}^T \bar{\mathbf{W}}_f \bar{\mathbf{W}}_0 \bar{\mathbf{D}}\} \mathbf{Z} = \bar{\mathbf{D}}^T \bar{\mathbf{W}}_f \bar{\mathbf{W}}_0 \bar{\mathbf{Q}} \quad (20)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{W}}_f$  と  $\bar{\mathbf{W}}_0$  は共に  $2kq \times 2kq$  の次元を持つブロック対角行列であり、それぞれつぎのような構造を持つ。

$$\bar{\mathbf{W}}_f = \text{block-diag} \{ \tilde{\mathbf{W}}_{f,1}, \tilde{\mathbf{W}}_{f,2}, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_{f,q} \} \quad (21)$$

$$\bar{\mathbf{W}}_0 = \text{block-diag} \{ \tilde{\mathbf{W}}_0, \tilde{\mathbf{W}}_0, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_0 \} \quad (22)$$

行列  $\tilde{\mathbf{W}}_{f,i}$  は対角要素の値がすべて  $W_{f,i}$  である  $2k \times 2k$  の次元を持つ対角行列であり、行列  $\tilde{\mathbf{W}}_0$  は対角要素のそれぞれの値が  $W_{0,i}$  である  $k \times k$  の次元を持つ対角行列である。

方程式(20)は次元  $(m(p+1)+kp) \times (m(p+1)+kp)$  を持つ行列  $\{\bar{\mathbf{D}}^T \bar{\mathbf{W}}_f \bar{\mathbf{W}}_0 \bar{\mathbf{D}}\}$  が正則であるときのみ解くことができる。この時、与えられた特性を最小自乗の意味において満足する動的補償器を設計することができたことになる。

以上のような手法で設計された動的補償器は、それ自身が安定な系であり、またそれを組み込んだ閉ループ系も安定な系であることが要求される。仮に、何れか一方の条件が満足されない場合には、 $\{p, q, \omega_i, \mathbf{Q}_i\}$  のような設計パラメータや重み係数  $\{W_{f,i}, W_{0,i}\}$  を適当に調整して、再度設計を行い、満足できる結果が得られるまでこの手続きを繰り返す必要がある。

### 3. 原子力蒸気発生系の数学モデル

制御設計を2系統の冷却ループを持つ代表的な500 MW(e)級のPWR発電プラントの原子力蒸気供給系を対象にして行う。今回の試みは、提案する設計手法が複雑な大規模多変数系に対しても適用可能であることを示すことにあるので、原子力蒸気供給系の数学モデルとしては、制御問題で使用されている通常のモデルと比べてかなり高次元のモデルを用いることにした。数学モデルの導出に当たっては、KERLINらが米国南カロライナ州のH. B. ROBINSON炉の数学モデルを導く際に用いた方法<sup>5)</sup>を参考にした。得られたモデルは合計43本の連立微分線形方程式で記述された。導出した数学モデルは表1に示す6つの操作変数を入力として持つ。原子力蒸気供給系の運転に際して、これらの操作変数はそれぞれの制御系の制御を受けた後の信号として原子力蒸気供給系への入力として送られる。今回の試みでは、上述の原子力蒸気供給系の数学モデルに、それぞれの操作変数に関係した制御系の数学モデルをさらに付け加えたモデルを用いた。したがって、各操作変数の制御系に加わる入力は、このように拡張されたモデルの入力でもあることになる。拡張されたモデルは、合計49本の連立微分線形方程式群で記述された高次元の数学モデルとなった。

表-1 原子力蒸気供給系の操作変数

操 作 変 数	
$A_v$	蒸気加減弁開度
$\rho$	制御棒によって加えられる反応度
$Q_h$	加圧器内に設けられた電熱ヒータ出力
$W_v$	体積制御系から冷却一次系に注入される冷却材流量
$W_{sg1}$	冷却ループ系1の蒸気発生器二次側の給水流量
$W_{sg2}$	冷却ループ系2の蒸気発生器二次側の給水流量

### 4. 原子力蒸気供給系の負荷追従運転のための準最適制御系の設計

#### 4-1 規範モデルの決定

原子力蒸気供給系の準最適制御系の設計は、最適状態帰還制御理論を用いてモデル・フォローイングのための最適規範モデルを決定することから始める。この設計には線形時間不変系に対して評価関数が2次形式で与えられる最適トラッキング問題の理論を採用した。

前章で導出した原子力蒸気供給系の数学モデルは、つぎのような線形時間不変系で表されるものとする。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (23)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (24)$$

$\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{u}$  は、それぞれ  $n$  次の状態ベクトル、 $k$  次の出力ベクトル、 $m$  次の制御ベクトルである。また、行列  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  はそれぞれ次元が  $n \times n$ ,  $n \times m$ ,  $k \times n$  の実行列である。上記の系の可制御性および可観測性は保証されているものとする。ここで、上記の系に対して以下に定義されるような状態帰還制御系を考える。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{z} \quad (25)$$

$\mathbf{z}$  は出力  $\mathbf{y}$  に対する要求入力ベクトルである。行列  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$  の次元は、それぞれ  $m \times n$ ,  $m \times k$  である。そこで、与えられた系(23), (24)に対して以下に導入する評価関数を最小にする状態帰還則(25)を決定する問題を考える。

$$J = \int_0^{\infty} \{ \mathbf{z} - \mathbf{y}(t) \}^T \mathbf{S} \{ \mathbf{z} - \mathbf{y}(t) \} + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{T}^T \mathbf{u}(t) \} dt \quad (26)$$

$\mathbf{S}$  と  $\mathbf{T}$  は重み係数行列であり、それぞれ  $k \times k$  次元の半正定行列と  $m \times m$  次元の正定行列である。今回は、これらの重み係数行列として、対角要素をそれぞれの出力と入力に関する重み係数とし

対角行列を選んだ。評価関数は出力  $\mathbf{y}$  とその要求入力  $\mathbf{z}$  との偏差の自乗と、必要とする制御の量を自乗したものをそれぞれに重みをかけて加え、時間で積分したものと定義される。ここで取り扱われる最適制御問題は、出力  $\mathbf{y}$  が出力変更要求入力  $\mathbf{z}$  に対して、評価関数(26)を最小にするように追従(トラッキング)する帰還制御系(25)(すなわち、行列  $\mathbf{F}$  と  $\mathbf{G}$ )を決定する問題である。線形2次形式問題の最適制御理論<sup>(6)</sup>によれば、評価関数(26)の積分時間が非常に長いがかし有限である場合の最適問題の厳密解に対して、積分時間を $\infty$ にする漸近操作を行うことで、 $\mathbf{F}$  と  $\mathbf{G}$  を近似的に決定することができる。それによれば、 $\mathbf{F}$  と  $\mathbf{G}$  はつぎのように与えることができる。

$$\mathbf{F} = -\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \quad (27)$$

$$\mathbf{G} = -\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}^T(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})^{-1}\mathbf{C}^T\mathbf{S} \quad (28)$$

ここで、 $\mathbf{P}$  は次元が  $n \times n$  の実対称行列であり、つぎに示すリッカチ方式の解である。

$$-\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{C}^T\mathbf{S}\mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (29)$$

本研究では、このリッカチ方程式を繰り返し解法で2次の収束性を持つ“ダブリング・アルゴリズム”法<sup>(7)</sup>を用いて解いた。

原子力蒸気供給系の最適制御系の設計では、表1に示す操作変数に関する制御系の入力の評価関数(26)の第2項で評価されるべき入力として用いられる。一方、評価関数で評価される出力として何を選択するかに関してある程度の任意性が許されている。まず最初の試みとして、表2に示す状態量を出力として選んだ。蒸気流量は原子力蒸気供給系で発生されるエネルギーに直接関係する量である。冷却材平均温度は原子炉内や蒸気発生器内の冷却材の熱的挙動を反映する量である。これらの出力は、負荷変動の際には、負荷要求に応じて予め決められた値に一致するように制御される。出力として選ばれた他の状態量は、原子力蒸気供給系の全体やそれを構成している個々の機器の健全な運転を維持するために管理されなければならない重要な量である。一般にこれらの状態量は、小さな負荷変動に対して大きく影響を受けないように制御される。

表-2 原子力蒸気供給系の制御変数

制 御 変 数	
$W_s$	蒸気加減弁内の蒸気流量
$T_{av}$	冷却材平均温度(冷却ループ系の高温配管部と低温配管部の冷却材温度を平均した温度)
$P$	冷却一次系内の圧力
$L_p$	加圧器内の水位
$L_{sg1}$	冷却ループ系1の蒸気発生器2次側水位
$L_{sg2}$	冷却ループ系2の蒸気発生器2次側水位

上記の最適制御理論を用いた最適状態帰還制御系の設計を、いくつかの適当と思われる重み係数の組合せを用いて行った。これらの設計の結果の解析から、出力として選んだ状態量に対しては極めて優れた過渡応答特性が実現されるものの、何れの場合も、この優れた特性を実現するためには過度のオーバーシュートを伴う核分裂エネルギーの変化が必要であることが判った。原子炉燃料の健全性を保つためには、核分裂エネルギーの急激な変化を最小限に抑える必要がある。このために、蒸気流量や冷却材平均温度に対するモデル・フォローイングに対する要求を緩和することを計り、これらの出力の重みを他の出力に対して相対的に軽くしたり、あるいは制御棒の急激な操作によって出力変更要求に応じることがないように、制御棒による反応度入力の重みを重くするなどの試みを行った。しかし、この試みは結局失敗に終わった。この結果は、核分裂エネルギーの急激な変化を抑制するためには、負荷追従性が多少損なわれるとしても、核分裂エネルギーの変化率に対して評価関数の上で直接に制約が加えられるようにしなければならないことを示唆している。そこで、冷却材平均温度の代りに、中性子密度を原子炉炉心にわたって積分した中性子人口を評価関数の上で直接評価すべき出力として選び、これに対して最適制御設計を行うことに

した。

この結果、核分裂出力の過度のオーバーシュートを伴うことなく、十分満足できる応答特性を持つ負荷追従運転を可能にする制御系を設計することができた。この設計では、表3に示した重み係数を各出力に関して用い、入力については値がすべて1である重み係数を用いた。この設計から得られた最適状態帰還制御系で補償を受けた閉ループ系を、以下の準最適制御設計で行うモデル・フォローイングに対する規範モデルとして用いることにした。

#### 4-2 準最適制御系の設計

近似的なモデル・フォローイング法による準最適制御系の設計には、6種の設計パラメータ  $\{p, q, \omega_i, \mathbf{Q}_i, W_{f,i}, W_{0,i}\}$  を指定する必要がある。まず最初に、なるべく簡単な構造を持つ動的補償器を設計するために、動的補償器の次数  $p$  として1を選んだ。モデル・フォローイングの対象とする周波数領域を0.005 (ラジアン/秒) から0.5 (ラジアン/秒) とした。この領域は、原子力蒸気供給系の通常運転の過渡応答特性が、主にこの周波数領域内の特性に支配されているという理由から選ばれた。今回の設計では、入力と出力の数 ( $k$  と  $m$ ) が共に6であり、補償器の次数 ( $p$ ) が1であるために、動的補償器を設計するための条件(26)から、上記の周波数領域から選ばなければならない周波数の数は少なくとも2個以上でなければならないことが判った。今回の設計では、準最適系と最適規範モデルの周波数特性を、注目する周波数領域の全域にわたって一様に一致させるために、対数スケールでほぼ等間隔に分布している5点の周波数0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 (ラジアン/秒) を選択した。これらの周波数の決定により、周波数  $\omega_i$  での閉ループ周波数応答行列  $\mathbf{H}(j\omega_i)$  をつぎのように決定することができる。

$$\mathbf{H}(j\omega_i) = \bar{\mathbf{C}}(j\omega_i \mathbf{I}_n - \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F})^{-1} \quad (30)$$

ただし、上式の  $\bar{\mathbf{C}}$  は最適制御設計の際に用いた観測行列  $\mathbf{C}$  と必ずしも同じでなくても良い。モデル・フォローイングでは、最適制御設計で用いた出力と違う状態量の周波数特性に関してモデル・フォローイングを行っても良く、 $\bar{\mathbf{C}}$  行列の選択には任意性が許される。しかし、最初の試みとして、 $\bar{\mathbf{C}}$  行列として  $\mathbf{C}$  と同じ行列をモデル・フォローイングに用いることにした。行列  $\mathbf{Q}_i$  は(30)式から得られた  $\mathbf{H}(j\omega_i)$  を(2)式に代入することによって求められる。

重み係数  $W_{f,i}$  と  $W_{0,i}$  のいくつかの組合せを用いて準最適制御系の設計を行った。しかし、それ自身が安定な系であり、また補償した系も安定である動的補償器を設計することができなかった。この原因を調べるために、規範モデルの周波数特性をボード線図を用いて解析した。それぞれの出力は要求入力 (すなわち、 $\mathbf{z}$ ) のすべてからそれぞれのゲイン特性に応じて影響を受けている。この解析では、注目している周波数領域で、それぞれの出力に対して最も支配的な影響を与えている要求入力に関するゲイン特性について比較を行った。この比較から、中性子人口を除く他の出力のゲイン特性が、注目する領域内にその遮断周波数が存在している一次の遅れ系のゲイン特性と類似しているに対し、中性子人口のそれは注目する周波数領域内でほぼ平坦な分布をしていることが判った。この解析から、中性子人口に対して無理なモデル・フォローイングを要求したことが、安定に関する上記の二条件を満足する動的補償器を設計することに失敗した第一の原因と考えた。そこで、冷却材平均温度のゲイン特性が中性子人口以外の出力と似た特性であることに注目して、最適制御系の設計の際に取った方法と逆であるが、中性子人口の代りに冷却材平均温度をモデル・フォローイングの直接の対象として用いることにした。

表-3 最適制御設計の際に評価関数で用いた各々の出力の重み係数

出力	重み係数
N	100
P	1
$L_p$	1
$L_{sg}$	1,000
$W_s$	1

この方法によって、表4に示した重み係数を用いて安定に関する条件を満たす動的補償器を設計することができた。モデル・フォローイングの結果を調べるために、設計した動的補償器の制御を受けた閉ループ系の周波数特性と規範モデルの特性との比較を行った。その結果を図2に示す。図から、注目する周波数領域内で、それぞれの出力の支配的なゲイン特性において良い一致性が得られていることが判る。ここで特筆すべきことは、上述の理由でモデル・フォローイングの直接の対象から除外した中性子人口においても良い一致性が実現されていることである。モデル・フォローイングの結果を周波数特性ばかりでなく時間挙動についても調べるためにデジタル・シミュレーションを行った。シミュレーションは、電力系統の電力の需要に答えるために、原子力蒸気供給系からタービン発電機へ流入する蒸気流量を現在の運転値から5%増加させる場合を想定した。この時、冷却材平均温度は負荷要求値に応じて予め計画された温度になるように、また他の出力（冷却一次系の圧力、蒸気発生器二次側水位）は一定の値を維持するように制御されるものとする。図3には比較のために、最適制御の場合と準最適制御の場合について、原子力蒸気供給系の運転において監視や管理が必要である重要な状態量の動的挙動を示した。これらの図は、出力変更要求前のそれぞれの状態量の定常値からの偏差に関して描いたものである。

表-4 モデル・フォローイング法による準最適制御系の設計の際に用いた重み係数

出力	重み係数	周波数 (ラジアン/秒)	重み係数
$T_{av}$	1	0.02	1
P	1	0.05	1
$L_p$	1	0.1	1
$L_{sg}$	1	0.2	10
$W_s$	1	0.5	10

図から、モデル・フォローイングの対象に選ばれたそれぞれの出力の過渡応答特性において、多少の差異は見られるものの、全般的に言って良い一致性が得られていることが判る。特に、図

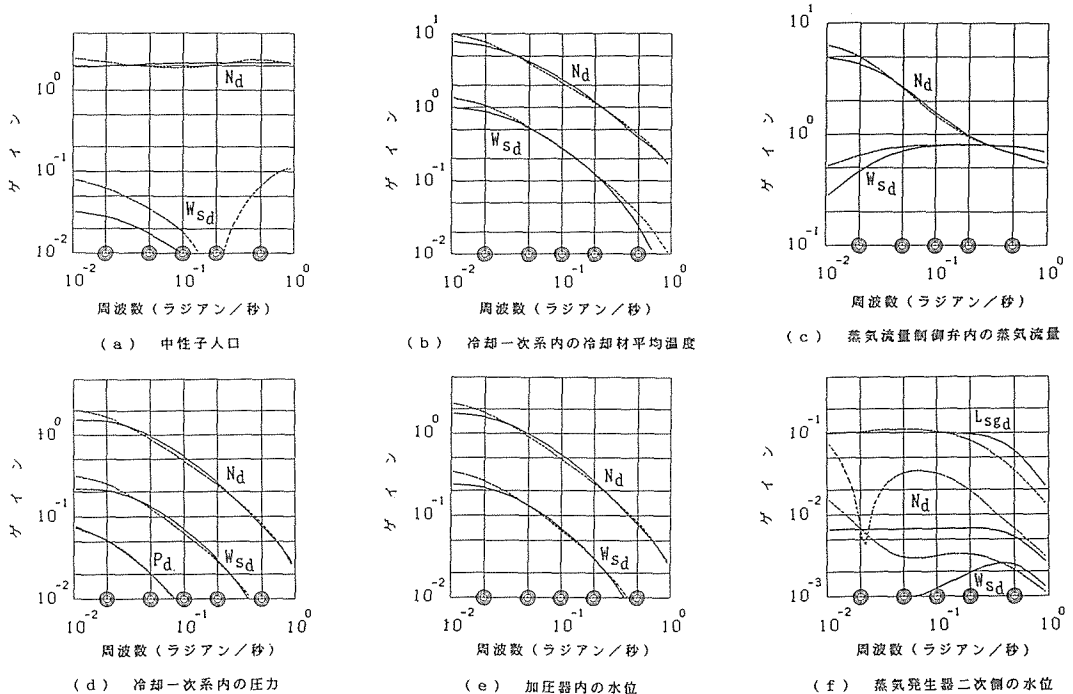


図2 最適規範モデルと近似的なモデル・フォローイングの結果得られた準最適系の周波数特性の比較（実線：規範モデル、破線：準最適系、図中の $X_d$ の記号は出力Xに対する要求入力を表す。横軸中の三重円はモデル・フォローイングの際に用いた周波数を表す。）

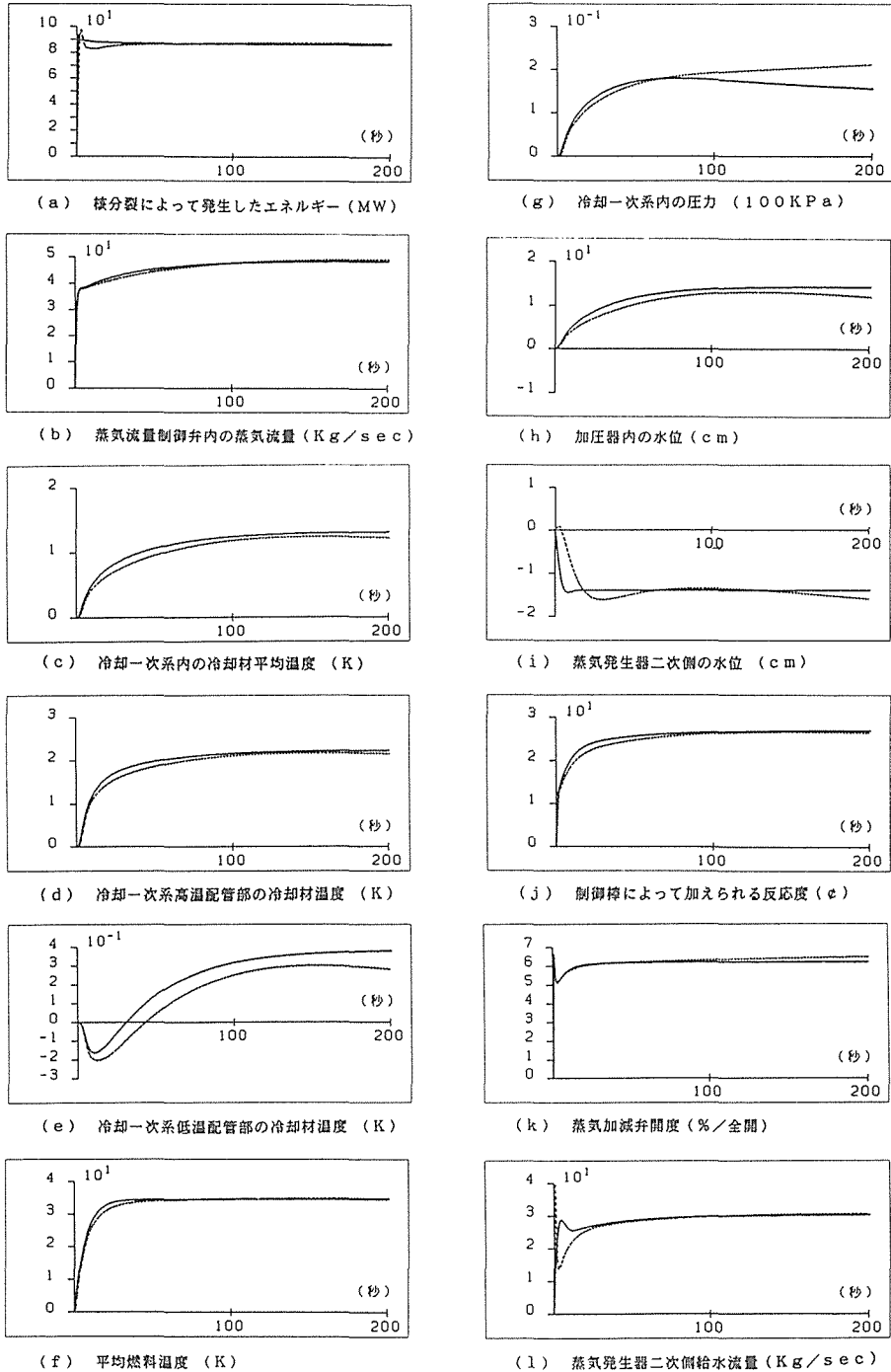


図 3 系統内の電力の需要の変動に対応するために蒸気流量を現在の運転値から 5% の流量を増加させた場合の最適規範モデルと準最適系の各状態量の動的挙動の比較 (実線: 最適規範モデル, 破線: 準最適系)

3(b)から判るように、蒸気流量において極めて良い一致性が得られている。図に見られる多少の差異は近似的なモデル・フォローイングを行った周波数領域の外での周波数特性の不一致が原因と考えられる。過渡応答特性における一致性の改善には、より広い周波数領域内でモデル・フォローイングを行う必要がある、このためにはさらに高次の動的補償器の設計が要求される。このような試みは設計上可能ではあるが、本研究の当初の目的である“工学的に実現可能な簡単な構造を持ち、しかも最適制御系とほぼ同じ特性を有する準最適制御系を設計しよう”とした意図に反するものである。したがって、工学的見地から、制御系の構造の複雑さとモデル・フォローイングの一致性において妥協を図る必要がある。以上の論議のもとに、蒸気流量に十分満足できる一致性が得られたこと、および他の出力の一致性も十分に許容できる範囲内にあることから、本研究で設計された準最適制御系は原子力蒸気供給系の負荷追従運転のための制御系として十分満足できるものであると考える。

## 5. おわりに

負荷追従運転において原子力蒸気供給系を効果的に制御するための制御系を設計する試みを行った。このために、状態帰還制御法による最適制御理論と近似的なモデル・フォローイング法の二つの設計法を効果的に併用した設計手法を提案した。提案の手法は、上記の二つの方法をそれぞれの特徴を利用することによって、原子力発電プラントのような複雑な工学系の制御問題に対しても、簡単な構造を持ち工学的に実現が容易な制御系を設計できる。

提案の設計法には数度の繰り返し過程が必要であるが、今回行った設計から、繰り返しの途中で得られた結果を次の繰り返しに効果的に反映させることによって、多数の繰り返しを行うことなく希望の制御系を設計できることを示した。周波数特性の解析の結果から、設計した準最適制御系で補償された閉ループ系の周波数特性を、注目している周波数領域で、規範モデルの特性に近似的に一致させることができることが判った。また、デジタル・シミュレーションの結果から、設計された準最適制御系は、最適制御理論で設計された最適状態帰還制御系で補償された場合に実現されるであろう特性とほぼ等しい特性で、原子力蒸気供給系を負荷追従制御できることを示した。

提案した設計手法は現代制御理論を複雑な工学系に適用する際に遭遇する困難に対する実際的な有力な方法の一つとして期待できる。

## 参 考 論 文

- 1) FROGNER, B., RAO, H. S.: IEEE Trans. Automat. Contr., 23, (1978), 3, p. 405
- 2) 若林二郎, 森寿久他: 日本原子力学会誌, 28 (昭和61年), 10, p. 913
- 3) COOK, P. A.: Int. J. Contr., 28, (1978), 6, p. 847
- 4) TSUJI, M., OGAWA, Y.: IEEE Trans. Nucl. Sci., 33, (1986), 4, p. 1090
- 5) KERLIN, T. W., KATZ, E. M., et al.: Nucl. Technol., 30, (1976), 3, p. 299
- 6) ATHANS, M., FALB, P. L.: Optimal Control, 1966, p. 801, McGraw-Hill
- 7) ANDERSON, B. D. O.: INT, J. Contr. 28, (1978), 2, p. 295