

火力発電プラント蒸気温度制御系設計のための非線形時系列モデルに関する研究

豊田, 幸裕

九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻 : 博士後期課程 | 日本ベーレー株式会社

和田, 清

九州大学大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/1515754>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 4 (2), pp.165-171, 1999-09-24. 九州大学大学院システム情報科学研究院

バージョン :

権利関係 :

火力発電プラント蒸気温度制御系設計のための 非線形時系列モデルに関する研究

豊田幸裕*・和田 清**

Research on the Nonlinear Time Series Model for Design of Steam Temperature Controller of Thermal Power Plants

Yukihiro TOYODA and Kiyoshi WADA

(Received June 21, 1999)

Abstract: Electric power companies will pay their attention to the load following capability and economical operation of a thermal power plant with once-through boilers. However, conventional PID controllers embedded on DCSs (Distributed Control Systems) cannot always give the optimum solution to such subjects. To cope with these problems, we need to develop a model-based steam temperature control system. Prior to study of the advanced control system, we develop a nonlinear system identification method based on the exogenous variable dependent ARX model describing the characteristics of a power plant dynamics under large load changes.

We evaluate the accuracy of the proposed model through various simulation tests by using measurement data acquired in the field tests and simulation tests with the SIMULINK-based boiler-turbine dynamic models. We also introduced the model prediction controller with some constraints and verified its effectiveness through the simulation tests.

Keywords: Nonlinear system, Identification, Thermal Power Plant, Steam Temperature Control, Exogenous-variable-dependent ARX model, Multi-step ahead prediction, Multiple models

1. はじめに

電力需要の運用は、ベース負荷運用、中間負荷運用およびピーク負荷運用という三種の運用形態に分けられ、それぞれに適した発電設備が割り当てられている。近年、電力需要は増加の一途をたどり、昼夜間の電力需要格差も次第に大きくなってきているので、中間負荷運用を担う火力発電プラントへの負荷追従性に対する要求は益々厳しくなっている。火力発電ボイラに広く用いられている超臨界圧貫流ボイラでは、耐熱材のクリープ限界付近で使用されることが多く、そのため蒸気温度に対する許容範囲が極めて厳しい。蒸気温度制御の難しさは主として以下の特徴に起因する。

- ・操作量と制御量との間に大きな無駄時間があること
- ・プロセスには強い干渉作用があること
- ・プロセスは非線形性を有すること

このような条件下で、負荷の急峻かつ大幅な変化に対して蒸気の温度と圧力を許容範囲内に維持すべく制御することはプラントの負荷追従性を改善するためには極めて

重要な課題である。この課題に対して、既設PID制御系とは独立に設置した制御装置の中にARモデルに基づく最適レギュレータを構成し、負荷変化時の制御性能を改善しようとする試みがなされた¹⁾。

非線形性がとくに顕著な超臨界圧発電ボイラプロセスに対して、同定試験時の収集データを用いて得られた線形モデルでは精度上の限界があり、そのモデルに基づいて設計された最適レギュレータの性能にも改善の余地を残した。

このような背景から本研究では、非線形性が無視できない火力発電用ボイラに適した同定方法を確立することを目的とした外生変数依存型ARXモデルを提案し、そのモデルの有効性をボイラモデルによる机上シミュレーション実験により確認する。

2. 最適レギュレータを火力発電プラントに適用する際の問題点

多次元ARモデルに基づいた最適レギュレータを実際の火力発電ボイラに適用するにあたって、幾つかの問題に直面することになった。

- (1) 一時点先予測を目的とした局所線形化モデルの構成パラメータを負荷の大きさに応じて線形補間しモデルを切り替えていく方式では予測誤差が大き

平成11年6月21日 受付

* 電気電子システム工学専攻博士後期課程
(日本ペーレー株式会社)

** 電気電子システム工学専攻

対象の非線形性に対処するため、複数の負荷レベルについてシステム同定試験を行い、各負荷レベル毎に得られた状態遷移式の係数行列の要素を計算機内に格納しておき、制御周期毎に負荷レベルに応じたパラメータの値を線形補間で求めるようにしているが、このような方式では、実プロセスの非線形性を忠実に表わすことはできず誤差も大きい。

- (2) 最適レギュレータゲインの負荷の大きさに依存した線形補間処理には、ある種の評価関数を最小にするという保証がないこと。

局所線形化モデルに基づいて設計した制御系の最適ゲイン行列の要素を計算機内に格納しておき、各制御周期毎に、負荷レベルに応じたゲイン行列の値を線形補間で求めるようにしているが、これには理論的な根拠がなく、最適とは言えない。

- (3) 複数の基準運転条件での同定試験は多大の労力と時間を要すること。

火力発電ボイラの運転条件を3~4種類の基準負荷に設定して8~10時間ほど一定に保持し、同定用の励振源を印加するには、数日間を商用運転から切り離して試験する必要がある他、この期間には10名程度の人員がこの試験のために投入される必要がある。

以上の問題に対して暫定的な処置として、状態遷移式の状態ベクトルを制御周期毎に、入手可能な実測値で置き換えていくことによる予測誤差低減策や、最適制御ゲインの負荷に対応した線形補間方式により、従来制御と比較して約1/2以上の高い減衰性が得られることなどから、線形モデルと線形制御理論とを非線形性の強い対象に適用しても一応の効果が得られはしたが、最適レギュレータの性能にはまだ改善の余地が残されており、それは予測モデルの精度に強く依存していた。

3. 火力発電プラントの非線形性

対象の非線形性を動特性の変動とみなしてそれを追従する適応同定法もあるが、非線形性を線形モデルの構成パラメータの緩やかな変動とみる見方には問題がある。

本研究では火力発電ボイラ特有の非線形性をできるだけ忠実に表わすため、プロセスの物理的関係から明らかになった情報を基に非線形性の定式化を行うことを試みる。ここに制御対象は、火力発電プラントにPID制御装置を組み合わせた閉ループ系を対象と考える^{1),2)}。火力発電プラントでは、運転負荷によりその動特性が大きく変化する傾向があり、負荷が大きい条件つまり蒸気流量が多い運転条件下での蒸気温度、蒸気圧力などのプロセス量の過渡的応答は速く、蒸気流量が少ない運転条件では、逆にこれらの応答は緩慢であることが経験的に知られている。同定試験時収集データを解析することにより、制御装置を含む制御対象の動特性を支配する主要な固有値

が運転負荷に依存して変化することが確認できる。

著者らの目標は、制御系設計を見通しよくするためにモデルを時不変線形モデルの枠組に限定し、対象プロセスの非線形性の定式化を行うことである。いま負荷というのは、発電量を生み出すために必要な温度と圧力を有する蒸気流量の需要値 MWD (MegaWatt Demand) を意味し、電力会社中央給電指令所から各火力発電所毎に事前に運用指示されるものと定義する。

ここで負荷に依存して対象の動特性が変化するメカニズムを単管熱交換器から考察することにする。

図において管の外側を流れる加熱流体(燃焼ガス)と、管の内側を流れる受熱流体との熱交換が管壁を通じて行われる際の流体と管壁との間のエネルギー収支は次式で表わされる。

$$\text{流体: } \frac{dT_l}{dt} = -\frac{(w \cdot c_p + U \cdot A)}{M \cdot c_p} \cdot T_l + \frac{U \cdot A}{M \cdot c_p} \cdot T_m - \frac{w}{M} \cdot T_e \quad (1)$$

$$\text{管壁: } \frac{dT_m}{dt} = -\frac{U \cdot A}{M_m \cdot c_m} \cdot T_m + \frac{U \cdot A}{M_m \cdot c_m} \cdot T_l + \frac{\dot{q}}{M_m \cdot c_m} \quad (2)$$

これらを行列にて表現すると下式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_l}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_l \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{w}{M} T_e \\ \frac{\dot{q}}{M_m \cdot c_m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

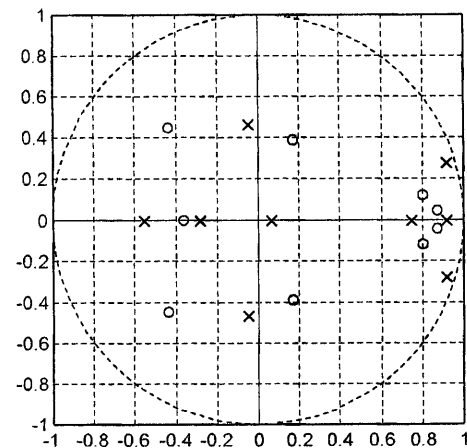


Fig. 1 Eigen Values due to Load Level: 110MW(○) and 330MW(×)

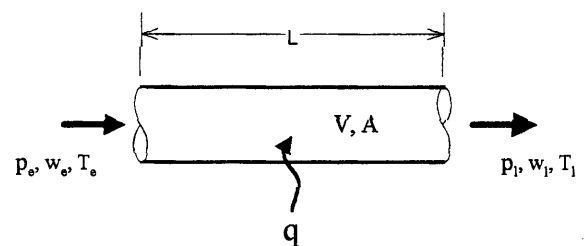


Fig. 2 Heat Exchanger Simple Model

但し T : 温度 C : 比熱 w : 流量 A : 伝熱面積 M : 質量 q : 熱流束 添字 e, l : 入口, 出口 m : 管材

$$U: \text{熱通過率} = \frac{1}{\frac{(r_0 - r_i)}{2k} + \frac{1}{h}} \quad (4)$$

k : 壁材の熱伝導率

$$h: \text{壁面での熱伝達率} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

$$Re: \text{レイノルズ数} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{\rho w A D}{\mu} = \frac{w}{A \mu} D \quad (6)$$

これらの関係式から、蒸気流量 w が小さい場合は流速 V が小さいため、熱伝達率 h が小さく熱の授受も僅かであるが、蒸気流量が大きい場合には、熱の授受も大きくなることからわかる。(3)式で記述される系の固有値を代表的な寸法諸元と運転条件について試算すると表-1に示すとおり、蒸気流量に応じて固有値が連続的に変化することがわかる。すなわち熱交換器の動特性は蒸気流量すなわち外生変数 MWD(蒸気需要量)に依存して連続的に変化するということが言える。これらの考察から本研究の対象に特有の条件を整理すると以下の事実が明らかとなる。

○プロセスが有する非線形性は MWD に大きく依存する

○MWD は既知の外生変数である

したがって、このようなプロセスを同定する場合には、外生変数を指標としたモデル、すなわちモデルの構成パラメータが外生変数に依存するタイプの ARX モデルすなわち外生変数依存型 ARX モデルを提案することにした。同様の研究の流れで、非線形振動現象を記述するモデルとして振幅依存型 AR モデルが尾崎, Haggan⁴⁾により報告されているが、このアイデアをヒントに本研究の提案モデルが考案された。

以下に提案モデルの特徴を述べる。

4. 外生変数依存型 ARX モデル

4.1 多重モデル方式

2章で述べたように、火力発電ボイラ特有の非線形性への従来のやり方では、ある負荷帯で一つの AR モデルが同定され、別の負荷帯でいま一つの AR モデルが導出される。これを複数の負荷帯について繰り返せば、いろいろな負荷帯で最も良くプロセスの動特性を表わし得るモデルが求まるが、問題はそうやって得られた複数のモ

Table 1 Variation of Eigenvalues due to Load change

	固有値 (sec-1)		時定数 (sec)	
2270 (t/h)	-0.154	-0.0073	6.5 sec	137 sec
1135 (t/h)	-0.121	-0.046	8.3 sec	217 sec

デルをどのように切り替えて使っていかということである。本研究では、対象の動特性から得られた知見を基にして、負荷に応じて変化する対象の非線形性に対し ARX モデルの構成パラメータを滑らかに切り替えることが可能なモデルとして、外生変数に依存したパラメータから構成される ARX モデルを検討する。このモデルは時不変モデルの連続無限の集まりである多重モデルとしての特徴を有し、その構成パラメータは、プロセスの外生変数である負荷への依存性を、指数関数を基底関数としてあるパラメータが最も良く合う基準負荷値と、ある基準値から別の基準負荷値パラメータに切り替わる場合の傾きという、二つの尺度により定式化したものである。つまり非線形項を上述の形で定式化しているため、対象の固有値が外生変数に応じて変化する傾向を表わすことができる。

4.2 無限段予測方式

また特定の運用条件での火力発電ボイラのように、外生変数である負荷指令の将来値が入手可能な場合を想定し、従来の ARX モデルのような一段先予測ではなく、無限段先予測を行うための定式化を検討した。

対象プロセスが次式で表わされるものとする。

$$y(t+1) = g\{\phi(t)\} + e(t+1) \quad (7)$$

ここに、

$$\phi(t) = [\xi_y(t) \ \xi_u(t) \ \xi_w(t)] \quad (8)$$

$$\xi_y(t) = [y(t)^T \ y(t-1)^T \ \dots \ y(t-n_y+1)^T]^T$$

$$\xi_u(t) = [u(t)^T \ u(t-1)^T \ \dots \ u(t-n_u+1)^T]^T \quad (9)$$

$$\xi_w(t) = [\Delta w(t)^T \ \Delta w(t-1)^T \ \dots \ \Delta w(t-n_w+1)^T]^T$$

$$u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_m(t)]^T$$

$$\Delta w(t) \equiv w(t) - w(t-1) \quad (10)$$

外生変数依存型 ARX モデルの基本構造は次式に示すとおりである。

$$y(t+1) = \theta_A(w_t | \theta, \gamma)^T \xi_y(t) + \theta_{B_1}(w_t | \theta, \gamma)^T \xi_u(t) + \theta_{B_2}(w_t | \theta, \gamma)^T \xi_w(t) + e(t+1) \quad (11)$$

上式で記述される ARX モデルの構成パラメータは外生変数の大きさに依存して次式で定式化されるものとする。

$$\theta_A(w_t | \theta, \gamma) = \theta_{A_0} + \sum_{i=1}^l \theta_{A_i} \text{diag}\{f(w_t | \gamma_{1i}) f(w_t | \gamma_{2i}) \dots\} \quad (12)$$

$\theta_{B_1}, \theta_{B_2}$ についても同様。

ここに、

$$f(w_t | \gamma_{ij}) \equiv \exp(-\gamma_{ij} \|w(t) - w_0\|^2) \quad (13)$$

(11)式中の出力データベクトル $\xi_y(t)$ の代わりに $\hat{\xi}_y(t)$ を用いることにすると, 出力の無限段予測値は(14)式で求められる。

$$\hat{y}(t+1) = \theta_A(w_t | \theta, \gamma)^T \hat{\xi}_y(t) + \theta_{B_1}(w_t | \theta, \gamma)^T \xi_u(t) + \theta_{B_2}(w_t | \theta, \gamma)^T \xi_w(t) \quad (14)$$

外生変数依存型 ARX モデルのパラメータ同定においては, (13)式中の調整パラメータ γ を含む, $\theta_{A_0}, \theta_{A_1}, \dots, \theta_{B_{10}}, \theta_{B_{11}}, \dots, \theta_{B_{20}}, \theta_{21}, \dots, \gamma_{1j}, \gamma_{2j}, \dots$ をすべて未知パラメータとし, 同定問題を非線形最適化問題に帰着して求解することになる。但し, (13)式中の w_0 については先見情報に基づき設定する。本研究では, ガウス・ニュートン法を用いて未知パラメータを求めるため,

$$\Theta = [\theta_{A_0}^T \theta_{A_1}^T \dots \theta_{B_{10}}^T \theta_{B_{11}}^T \dots \theta_{B_{20}}^T \theta_{21}^T \dots \gamma_{1j}^T \gamma_{2j}^T \dots]^T \quad (15)$$

とおき, 評価関数を次式のように考える。

$$\begin{aligned} J_k(\delta\Theta_k) &= \sum \left\| y(t) - \left\{ \hat{y}(t; \hat{\Theta}_k) + \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \delta\Theta_k \right\} \right\|^2 \\ &= \sum \left\{ y(t) - \hat{y}(t; \hat{\Theta}_k) - \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \delta\Theta_k \right\}^T \cdot \\ &\quad \left\{ y(t) - \hat{y}(t; \hat{\Theta}_k) - \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \delta\Theta_k \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

いま

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \sum (y^T - \hat{y}^T) \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \\ \beta_k &= \sum \left\{ \frac{\partial \hat{y}^T}{\partial \Theta} \cdot (y - \hat{y}) \right\} \\ \chi_k &= \sum \left(\frac{\partial \hat{y}^T}{\partial \Theta} \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

とおくと,

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\delta\Theta_k)}{\partial \delta\Theta_k} &= -2\beta_k + 2\chi_k \cdot \delta\Theta_k = 0 \\ \therefore \delta\Theta_k &= \chi_k^{-1} \cdot \beta_k \\ &= \left\{ \sum \frac{\partial \hat{y}^T}{\partial \Theta} \frac{\partial \hat{y}}{\partial \Theta^T} \right\}^{-1} \cdot \left\{ \sum \frac{\partial \hat{y}^T}{\partial \Theta} \cdot (y - \hat{y}) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

を解くことにより, 以下に示す未知パラメータを求める更新式が得られる。

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + \delta\Theta_k \quad (20)$$

5. 実測データによる本手法の有効性確認

外生変数依存型 ARX モデルの有効性を, 実機同定試験時収集データ, とくに同定試験条件のうち励振源の振幅を意図的に変化させた場合の非定常時系列データにより得られた提案モデルによる予測値と実測値を重ねて表示し, 有効性を検証した。提案手法では, このような運転条件下でも高い同定精度を示すことが確認できる。

つぎに, 制御装置の PI パラメータが制御量の大きさ

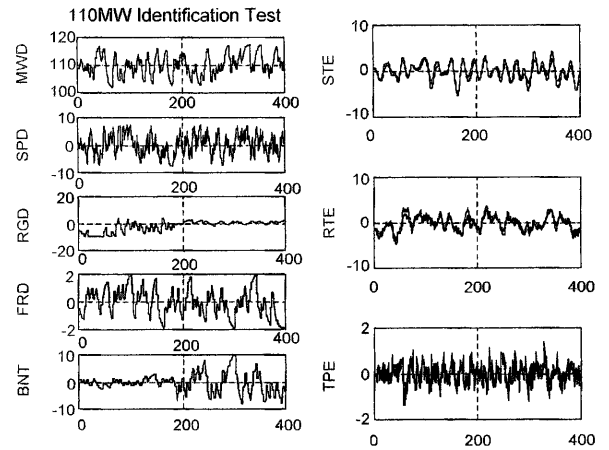


Fig. 3 Example of the Application of the Exogenous Variable dependent ARX Model to Actual Power Plant with Oncethrough Boiler

に従い変化するような非線形性を有するボイラプロセスの事例に対して, 提案手法の同定精度の有効性を確認するため, 実機所内ボイラ同定試験時収集データによる検証実験を行った。図からは広い範囲にわたり良好な推定精度が得られることが示された。

6. ボイラ・タービン動特性シミュレーションモデル

実機での収集データは, すべて負荷一定条件下でのデータなので本来の対象プロセスの非線形性が現われているとは言い難い。外生変数依存型 ARX モデルの用途は, 火力発電ボイラの負荷追従改善のための制御系設計を目的としているため, ランプ状の MWD 変化の下での提案モデルの有効性を確認する検証実験を行う必要がある。そこで, Mathworks 社製 SIMULINK を用いてボイラ・タービン動特性モデルを作成し, 机上検証実験を行

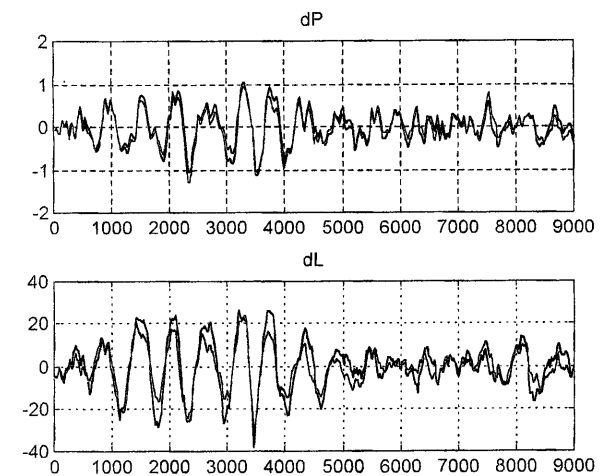


Fig. 4 Example of the Application of the Exogenous Variable dependent ARX Model to Actual Power Plant with Drum Boiler

うことにした。

検証実験に用いる動特性モデルは、平衡点近傍の線形化モデルではなく、大きな負荷変化時の動特性が模擬できるように構築されたモデルで、強い非線形性を有すること、また制御装置を内蔵していることが特徴である。モデル全体のブロック図を図-5に示す。

また図-6には制御装置を生かした状態での25%、90%の各負荷帯におけるステップ応答を示す。図中の行の記号は、それぞれ入力 MWD(発電量指令), FF(燃料流量指令), SP1(一次スプレー弁開度), SP2(二次スプレー弁開度), RGD(再循環ガスダンパ開度)を示し、列の記号はブ

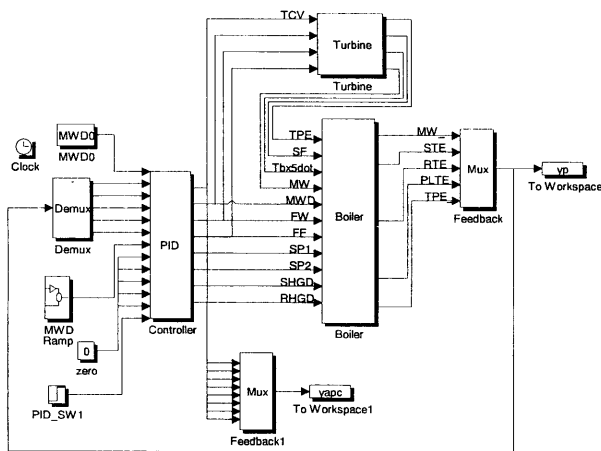


Fig. 5 Boiler/Turbine with existing Controllers Dynamic Model using SIMULINK/MathWorks Inc.

ロセス出力である, STE(主蒸気温度偏差), RTE(再熱蒸気温度偏差)を表わす。この図から明らかなように対象プロセス応答は、負荷帯(25%：実線 90%：破線)に応じて強い非線形性を示すことがわかる。

7. シミュレーションスタディ

7.1 同定検証実験

MWDの大幅な変化時の対象プロセスの動特性を精度よく同定するために、MWDをランプ状に変化させながら、同時に各種バイアス信号FF, SP1, SP2, RGDとしてM系列信号を用いてプロセスを励振する。図-7から明らかなように、負荷が大きく変化し、非線形性が強く

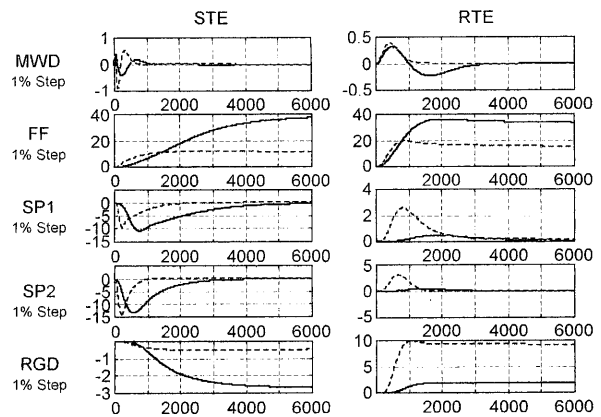


Fig. 6 Unit-step-response due to Manipulated Variables at higher Load and lower Load

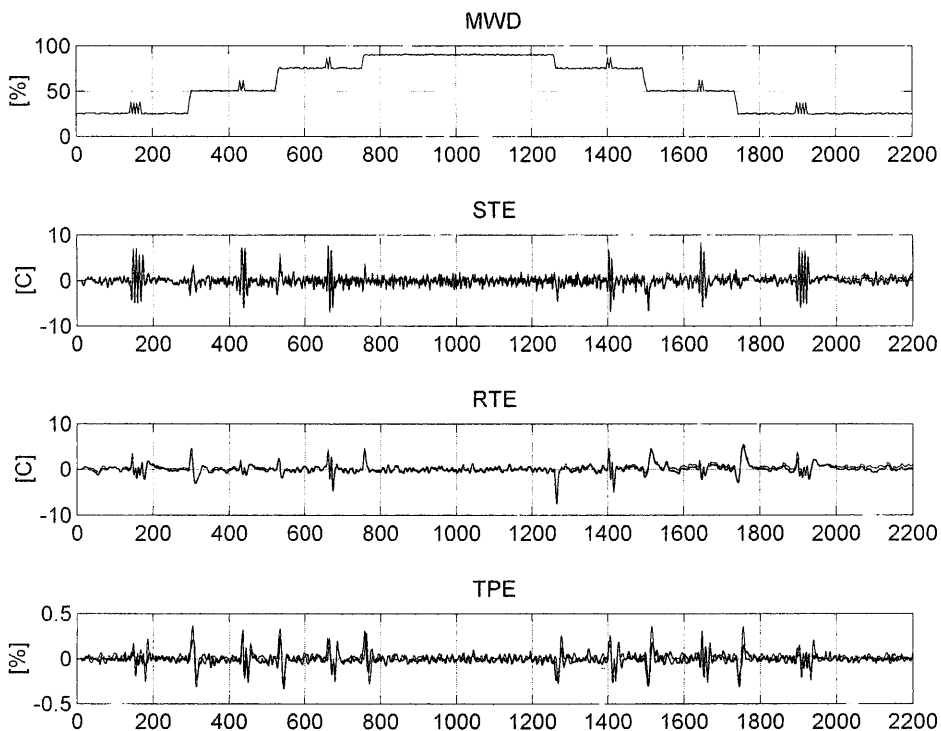


Fig. 7 Comparison between Measured and Estimated by the Exogenous Variable dependent ARX Model in Identification Tests

現われている運転条件にも関わらず、提案手法を用いれば全域にわたって高い予測精度が得られることが確認できる。なお、このときの基準負荷 w_0 は10%、50%と80%の3種類の負荷帯を選んだ。図-8は、25%、50%、75%、90%の各負荷帯での同定試験時収集データから得られた4種類の線形モデルを用いて負荷の大きさにより線形補間する方式と提案手法との同定精度の比較を行った結果を示す。補間方式では、前述のとおり4種類の負荷帯にて得られた各状態方程式の係数行列の要素を負荷帯別に格納しておき、各制御時刻毎にそのときの負荷レベルに応じた係数行列の要素を線形補間で求めるようにしている。図から明らかなように、線形モデルの補間方式では十分表現できない対象プロセスの非線形性に対して、提案手法を用いると広い負荷範囲にわたって高い同定精度が得られることが確認できる。

図中の実測値に対し、線形補間方式による予測値と提案方式による予測値を比較すると、負荷変化の際に従来の線形補間方式では誤差が大きくなる傾向があるが、提案方式では全域にわたって良好な予測精度を維持できることが確認できる。

7.2 制御検証実験

火力発電用ボイラ・タービンプロセス(制御装置を含む)のランプ状負荷変化時の制御性能改善に対して最適化制御を適用するにあたって核となる動特性モデルとして、対象プロセスの非線形性を表現する能力の高い外生変数依存型 ARX モデルを提案し、広い負荷範囲にわたって高い同定精度が得られることを確認した。MWDの大きさに応じて線形モデルが連続的に変化するタイプの多重モデルの特徴を備えた提案モデルを用いたモデルベースのオンライン最適化制御の有効性を机上シミュ

レーションにより検証する。また将来的なニーズとして、プラントの経済運用を実現する要求が出てきた場合を想定し、上述のオンライン最適化制御の制御系設計にあたっては、対象が有する物理的な制約条件を考慮する。ここでは、上述の制御シナリオを一般的に記述できる方法として、ある物理的制約の下に評価関数を最小化する数理計画問題として取り扱うことにした。ここで解くべき問題は、

$$\begin{aligned} |y(k+i+1|k)| &\leq y_{\max} \\ |u(k+i|k)| &\leq u_{\max}, \quad (i=1,2,3,\dots,N_h) \end{aligned} \quad (21)$$

という不等式制約式の下で、評価関数

$$J = \sum_{i=1}^N u(t+i+1|t)^T \cdot R \cdot u(t+i+1|t) \quad (22)$$

を最小化する解を得ることである。

なお外生変数依存型 ARX モデルは下式のような可観測正準型に変換でき、操作量は最適フィードバックに加えて、外生変数の抑制を考慮した最適フィードフォワードを実現するものである。

$$\begin{aligned} X(k+i+1|k) &= A(w_k|\theta) \cdot X(k+1|i) + B_1(w_k|\theta) \cdot \\ &\quad u(k+1|i) + B_2(w_k|\theta) \cdot \Delta w(k+1|i) \\ y(k+i+1|k) &= C \cdot X(k+i+1|i) \\ u(k+i+1|k) &= G \cdot X(k+i+1|i) + F \cdot \\ &\quad \Delta w(k+i+1|k) \quad (i=1,2,3,\dots,N_h) \end{aligned} \quad (23)$$

このような最適化問題に対して、逐次二次計画法を適用し、その有効性を机上シミュレーションにより確認した。ここでは、主蒸気温度偏差 STE と再熱蒸気温度偏差 RTE、主蒸気圧力偏差 TPE をそれぞれある許容範囲内に抑えるべく制御した場合の結果を示す。図中の実線は

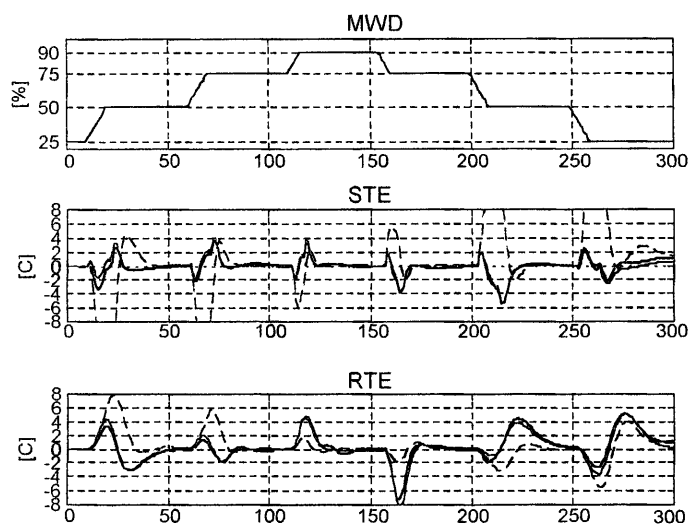


Fig. 8 Comparison between Conventional Linear Model-interpolation Method and Proposed Method using the Exogenous Variable dependent ARX Model under Rampwise Load changes

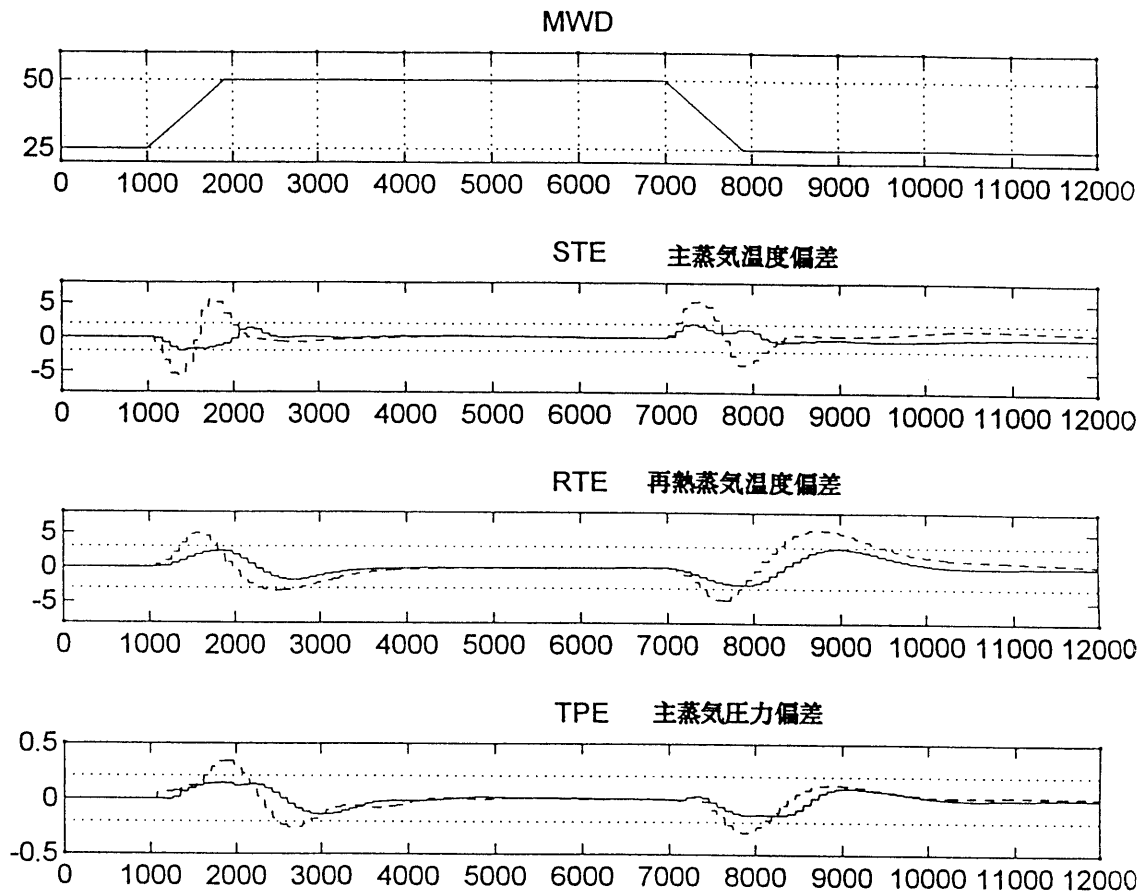


Fig. 9 Controller Performance of the Proposed Model-based On-line Optimization Control Strategy and Conventional Controller

提案モデルに基づいたオンライン最適化制御を行った結果で、狙い通りの制御性能が得られた。ちなみに破線は従来のPI制御を行ったときの制御性能を比較のため重ねて表示した。

8. む す び

火力発電用ボイラ負荷追従性向上のための予測モデルに基づいた制御系設計を実現するにあたり、対象プロセスの有する非線形性を記述するための外生変数依存型ARXモデルを提案し、実機での実測値による検証シミュレーションおよびSIMULINKを用いたボイラ・タービン動特性モデルによる机上検証実験により高い予測精度が得られることを確認した。つぎに提案モデルに基づいた制約条件付きオンライン最適化制御系の設計を行い、その有効性を机上検証実験により併せて確認した。

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura and H. Akaike: "Statistical Identification for Optimal Control of Super-critical Thermal Power Plants", *Automatica*, 17, 143/155 (1981)
- 2) S. Miyazuka, H. Kishimoto, H. Shioya and H. Nakamura: "Optimal Regulator Implementation by Microprocessor-based Distributed Control System", 1989 Conference on Power Plant Controls and Automation (1989)
- 3) H. Nakamura and Y. Toyoda: "Statistical identification and Optimal Control of thermal power Plants", *Ann. Inst. Statist. Math.* Vol. 40, No. 1, 1/29
- 4) V. Haggan and T. Ozaki: "Modeling Nonlinear Random Vibrations Using an Amplitude-dependent Autoregressive Time Series Model", *Biometrika* 68, 189/196 (1981)
- 5) Y. Toyoda, K. Oda and T. Ozaki: "The Nonlinear System Identification Method for the Advanced Control of the Fossil Power Plant", 11th IFAC Symp. On System identification, Vol. 3, 1273/1278 (1997)
- 6) The MathWorks Inc., SIMULINK User's Guide (1993)