

アドバンスト制御の火力発電所への適用

Application of Advanced Control Technologies to Thermal Power Plants

松浦 泰則
Y. Matsuura

小口 治男
H. Oguchi

清水 佳子
K. Shimizu

火力発電プラントの制御系の中には、長いむだ時間、相互の強い干渉などをもつ系が少なからず存在する。一方、最近の制御技術の高度化に伴い、新しい制御アルゴリズム（以下、アドバンスト制御と称呼）が各種提案されている。当社では、アドバンスト制御の火力発電プラントへの適用に取り組み、その制御性の向上とより効率的な運転の実現を旨としている。また、次世代の高効率な火力発電プラントとして期待されるガス化複合発電プラント（IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle）制御技術開発についても積極的に取り組み、負荷追従をはじめとする各種制御を実機で検証した。

The control systems of some thermal power plants are plagued by interference and extended dead time. Seeking improved controllability and efficiency, Toshiba has applied new algorithms to control systems using recently developed advanced control methods. We are also developing improved control systems for integrated gasification combined cycle (IGCC) technology, which promises to become a key force for highly efficient power plants in the next century. Toshiba's IGCC control system is demonstrating good load controllability in a current pilot plant.

1 まえがき

火力発電プラントのプロセスの中には、相互干渉の強い多変数系や非線形性の強い系など通常のPID（比例、積分、微分）制御では良好な制御の難しいものが存在する。例えば、ボイラ制御では制御要素の相互干渉、体積要素による時間遅れなど、コンバインドサイクル（C/C）制御では頻繁な起動/停止や負荷変化のための速い追従性、脱硝制御などの非線形性と長いむだ時間などが挙げられる。また、IGCC制御ではガス化プラントとC/Cの協調制御、体積要素が直列に連なるガス化プラントの制御などが挙げられる。

一方、最近の制御技術の進歩に伴い、いわゆるアドバンスト制御の適用が試みられ、これらの制御上の課題に対して有効であることが示されている。

デジタル制御装置の技術進歩により、監視制御システムGSXPTMシリーズにも現代制御を適用した制御アルゴリズムを搭載することが可能となっている。

当社は、早くからアドバンスト制御の火力発電所への適用に取り組み、良好な制御による効率化、調整の自動化による省力化および工程短縮、IGCC制御の実用化を実現しつつある。ここでは、アドバンスト制御技術の概要とその火力発電所への適用例について紹介する。

2 アドバンスト制御技術

従来の制御手法の大勢を占めるPID制御⁽¹⁾に対して、新

しい制御手法としては、①ニューラルネットワークやファジィなどの人工知能型（AI系）と呼ばれるものと、②一般に現代制御と呼ばれる最適レギュレータ、モデル予測制御、H無限大（ H_∞ ）制御が挙げられる。ここでは、最近進展の著しい②について紹介する。

現代制御は、最近の理論面の充実、CADの進歩、制御装置の演算能力向上により実現性が飛躍的に向上し、それとともに期待度が増している^{(1),(2)}。図1に最近の10年間における実現性と期待度の変化を矢印で示す。

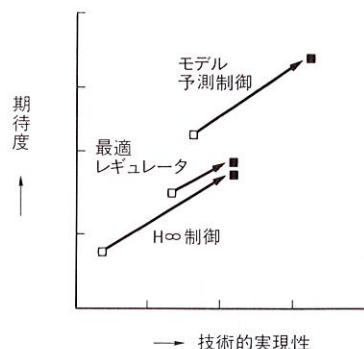


図1. 一般産業分野での技術的可能性と期待度の変化 最近の10年間に技術的実現性の向上とともに期待度が高まっている。(註)日本機械工業連合会、(財)日本電気計測器工業会：「H5年度プラントの安全操業を確保するための制御システムの信頼性・安全性に関する調査報告書」から関連部分を抜粋)

Trend of applicability and expectation for advanced control design methods in Japanese industry

2.1 最適レギュレータ, H ∞ 制御

現代制御は、制御対象の動特性モデルから数学的に最適解を求め制御系を設計するが、1960年代のKalmanによる最適レギュレータ設計方法の提案が一つの始まりと言われている。最適性の指標は、被制御量 y や操作量 u の絶対値の時間平均値の和を最小にするというレギュレータ型の評価関数が長らく用いられてきた。ところが、これらの最大値を最小にする H ∞ 制御問題に対して89年に画期的な解法が発表され、以降 H ∞ 制御も用いられるようになった(図2)。

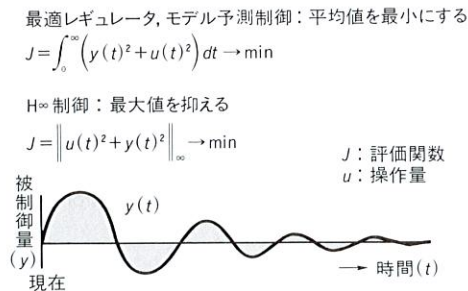


図2. 制御設計の指標 被制御量と操作量からなる評価関数について、時間平均を最小にするのが最適レギュレータ、モデル予測制御、最大値を抑えるのが H ∞ 制御。

Cost function of advanced control

制御対象を線形とすれば、前述の最適問題の解が得られるため、動特性モデルとして(1)式の線形の微分方程式を用いることが多い。このため、現代制御理論は線形制御理論と呼ばれることも多い。

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (1)$$

x : 状態変数, y : 被制御量, u : 操作量, A, B, C, D : 定数

二つ以上の制御量が相互に干渉し合う多変数制御問題についても、同様に最適解が得られ制御設計ができる。多変数制御系の設計問題が容易に解決できるのも現代制御の特長の一つである(図3)。

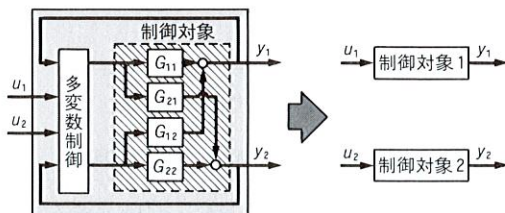


図3. 多変数制御の概念 操作量 u_1 の影響が被制御量 y_2 には及ばないような制御系を実現することができる。

Concept of multivariable control

2.2 モデル予測制御

解析的に最適な制御ゲインを求めるためには、制御対象の詳しい動特性モデルが必要となるが、プラント制御の場合に試験条件の制約などにより大まかな動特性しか得られないことも多い。

これに対して、80年代後半に提案されたモデル予測制御(図4)は、プラントの大まかな動特性で設計可能であり、また操作してからその影響が観測されるまでに時間がかかる系にも対応可能なことから、石油化学プラントを中心に広く適用されている。

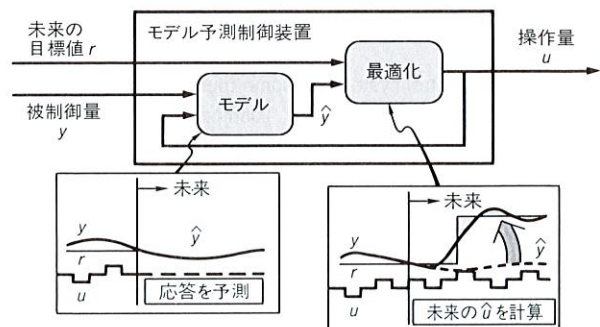


図4. モデル予測制御の概念 制御対象のモデルにより未来の被制御量の動きを予測して操作量を決める。

Model predictive control

2.3 オートチューニング

発電プラントには多数の制御ループが存在する。これらの制御ループの制御定数調整を自動化することによって、現地調整時間の短縮および業務の合理化が図れる。

当社で開発を行っているオートチューニングシステム^{(3),(4)}は、動特性モデルを用いて最適設計問題と同様にして制御定数を求める。

システムの特長は、①閉ループでのチューニングが可能、②制御対象のカットオフ周波数に基づいて制御パラメータを設計する手法⁽⁵⁾であるため、広範な特性の制御対象に適用可能、③求めた制御定数についてシミュレーションによる応答の事前確認可能、などである。図5にオートチューニングシステムの構成を示す。

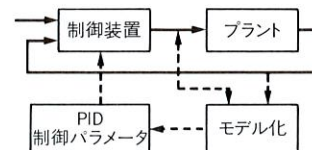


図5. オートチューニングシステムの構成 プラントのモデルから最適制御系の設計を行う。

Configuration of auto-tuning system

3 アドバンスト制御の適用例

ここでは、2章で説明した個別の制御技術を適用し良好な結果を得た事例を紹介する。

3.1 多変数 H ∞ 制御の圧力流量制御への適用

排熱回収蒸気発生器 (HRSG) 試験設備の流量制御系統に、火力発電分野では初めて H ∞ 制御を適用した例⁽⁶⁾を紹介する。

配管系統上に流量制御弁を設け、その上流側に流量制御弁の一次側圧力制御のための圧力制御弁を設ける例が多い。この系は、流量制御と圧力制御が互いに干渉するいわゆる干渉系であり、従来の設計法ではこの干渉の抑制が困難なため、応答の速い制御を実現することができなかった。しかし、最適レギュレータや H ∞ 制御により干渉を排し、応答の大幅な改善を図ることができる。図6にこれまでの制御系に比べ、流量指令値への追従速度を3秒から1.5秒へ改善し、圧力の変動面積を1/15に減少させたようすを示す。

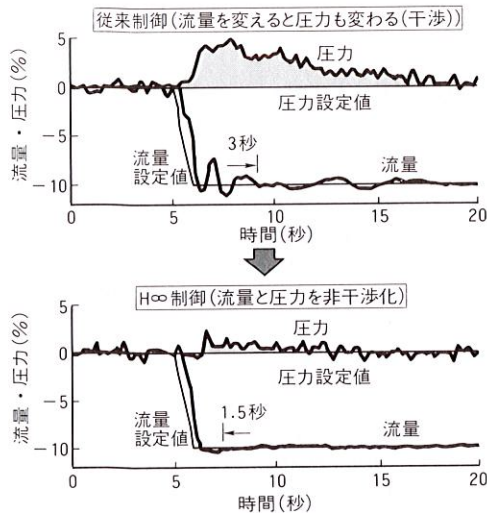


図6. H ∞ 制御によるHRSG多変数制御 流量と圧力の非干渉化の結果、追従速度が従来制御の2倍に向上した。

Multivariable H-infinity control of heat-recovery steam generator

3.2 モデル予測制御の脱硝制御への適用

事業用 C/C 発電プラントの排煙脱硝制御系に、火力発電分野では初めてモデル予測制御を試験的に適用した例を紹介する⁽⁷⁾。

ガスタービンで発生する窒素酸化物 (NO x) は触媒上でアンモニアと反応し窒素と水分に分解される。ガスタービンで発生する NO x はプラント出力により変動するが、NO x 濃度の計測には数分のむだ時間が存在する。そこで、NO x 発生量にアンモニア注入量を追従させるためにはフィードフォワード制御主体の制御を行っている。これに対して、モデル予測制御を適用することによってむだ時間を補償しフ

ィードバックループ主体の制御で十分な制御性を得ることに成功した (図7)。

3.3 オートチューニングの温度制御への適用

ガスタービン発電設備のガスタービン排ガス冷却用スプレー温度制御に、火力発電分野では初めて現代制御応用のオートチューニングシステムを適用した例を紹介する。

同設備にはガスタービンからの高温の排ガスを冷却するスプレー水系統が設置されており、排ガス温度を一定に保つためのスプレー水流量制御系を適用対象とした。

制御系の構成と、オートチューニング実施前後の制御性の比較を図8に示す。被制御量の変動幅が縮小され制御性が向上している。

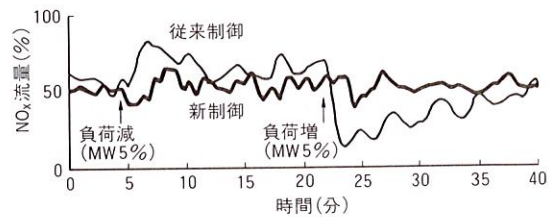


図7. モデル予測制御による脱硝制御 フィードバック制御主体の制御で NO x 流量の変動が従来制御の 1/2 以下を達成した。

Model predictive control of NO x decomposition process in 1,000 MW-class combined-cycle power plant

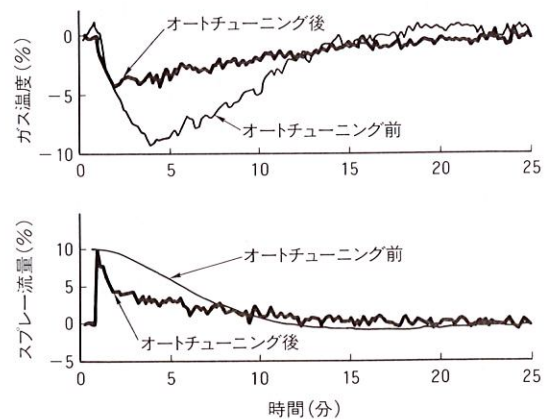


図8. ガスタービン発電設備スプレー水制御系へのオートチューニング適用例 オートチューニングによりパラメータを調整することによってガス温度、スプレー量とも変動幅が縮小した。

Auto-tuning of gas turbine exhaust temperature control

4 IGCC 統括制御

エネルギー資源の有効利用と経済性および環境適合性の観点から、近年、石炭および残さ油を使った IGCC が注目されている。わが国でも IGCC の 21 世紀初頭での実用化を目指し、工業技術院新エネルギー・産業技術総合開発機構

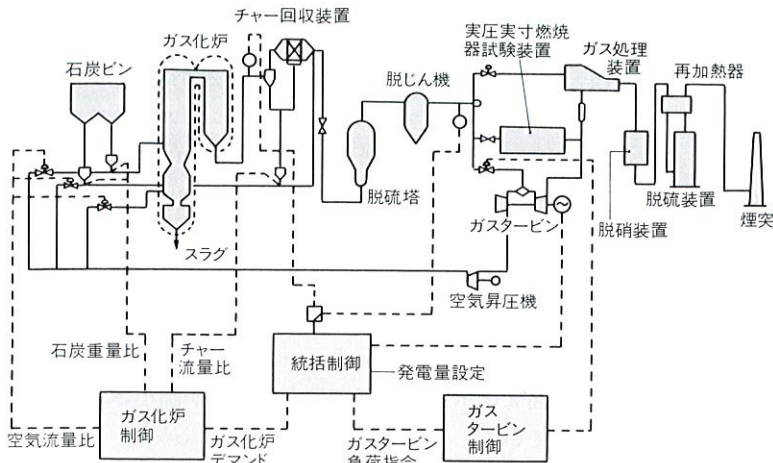


図9. IGCCパイロットプラント制御システムの基本構成
制御要素が直列に連なるプラントガスタービン制御およびガス化炉制御によって制御され、さらに統括制御でプラント全体が制御される。

Configuration of control system of IGCC pilot plant

(NEDO)の委託に基づき石炭ガス化複合発電技術研究組合により噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントが建設され、この運転研究が1996年2月に成功裏に終了した。

IGCCは、従来火力と同様に柔軟な電力運用に必須(す)な高い動特性が求められその上位制御としては、発電プラントの第一の要求である発電出力の制御とともに、ガス化プロセスの圧力の制御が必要である。当社は、パイロットプラントにおいて、当業界では初めてガス化炉制御とガスタービン制御の良好な統括制御に成功し、IGCCが負荷運用に十分耐えうることを示した⁽⁸⁾(図9)。

統括制御の制御方式としては、高速負荷応答性に優れるガスタービンリード方式(ガスタービンに負荷制御指令を与え、ガス化炉が追従する方式)にガス化プラントの圧力応答改善を施したプラント協調制御方式が、通常運用時における最適な制御方式である。この制御アルゴリズム開発に際しては、平行に実施したダイナミックシミュレーションの成果が活用され、協調制御モードでの実機制御試験の結果、変化幅40%、変化率10%/minの負荷追従試験において発電機出力、ガス圧ともに良好に制御された。

IGCCは、通常のC/Cプラントに比べて燃料は多様かつシステム構成要素も多く、制御対象としても燃焼、化学反応などの非線形性、体積要素を多く含むことによる大きな時間遅れ、インテグレーションによる干渉系など、制御面での課題は多い。パイロットプラントの統括制御は従来PID制御をベースとしているが、将来の商用規模のプラントでは、2章で述べた各種アドバンスト制御の適用が有効であると考えられる。

5 あとがき

アドバンスト制御の火力発電所への適用について、技術動向と当社の取組みを紹介した。

先進技術を適用することによって効率向上や省力化など

ユーザの要望にこたえていくことは、技術開発の目標であると同時に開発に携わる者にとっての喜びでもある。今後も制御技術のいっそうの高度化と適用範囲の拡大に向けて努力していきたい。

文献

- (1) (株)日本機械工業連合会, (株)日本電気計測器工業会: H5年度プラントの安全操業を確保するための制御システムの信頼性・安全性に関する調査報告書(1994)
- (2) 中本政志, 他: プラント制御への変数制御の応用, 計測と制御, **33**, 5, pp.397-405 (1994)
- (3) 千田有一, 他: 周波数領域でのモデルマッチングによるPID制御の設計, 第17回Dynamical System Theoryシンポジウム, pp.201-204 (1994)
- (4) 行友雅徳, 他: 火力発電プラント脱硝系への変数制御の応用, 第3回制御理論応用シンポジウム, pp.23-26 (1995)
- (5) 重政 隆, 他: 2自由度PIDオートチューニングコントローラ, 東芝レビュー, **42**, 11, pp.822-826 (1987)
- (6) M. Nakamoto, et al: Multivariable Control for a Combined Cycle Power Plant, IFAC 12th World Congress, 3, pp.399-404 (1993)
- (7) 清水佳子, 他: 一般化子制御によるコンバインドサイクル発電プラントの脱硝制御, 計測自動制御学会論文集, **32**, 6, pp.912-920 (1996)
- (8) Nagata, et al: ISA96 Chicago, Development of Load and Pressure Controller for the 200 tons per day Entrained Flow IGCC Pilot Plant



松浦 泰則 Yasunori Matsuura

火力事業部 火力制御システム技術部主査。
火力プラント制御システムのエンジニアリング業務に従事。
Thermal Power Plant Div.



小口 治男 Haruo Oguchi

京浜事業所 タービンプラントシステム部主務。
火力プラント制御の開発・設計に従事。計測自動制御学会
会員。
Keihin Product Operations



清水 佳子 Keiko Shimizu

重電技術研究所 システム技術開発部。
発電プラント制御の研究に従事。電気学会, 計測自動制御
学会, システム制御情報学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.