多 炭 種 対 応 新 制 御 技 術 の 開 発

Development of New Control Technology for Multi Coal Fired Boiler

技	術	本	部	森	山		功*'	園	F	Ŧ		隆 *2
原重	力機哥	「業本	本部	栗	原		幹*3	Щ	本	健	次	郞*4
長	崎道	11 船	所	高	橋	伸	之*5					

燃料性状が大幅に変化する石炭だきボイラでは、燃料やミルの特性及び伝熱面の汚れ状態による静特性/動特性の変化が、負 荷追従性や温度特性等でユニットの運用性へ大きな影響を及ぼす.本開発では、ファジィ推論手法を用いた状態推定モデルによ り各伝熱面の吸収熱量を正確に推定し、これを用いて刻々と変化するボイラの燃焼状態を的確に把握する指標を見いだした.ま た、燃料となる石炭の発熱量・水分率を自動的に推定する方式を確立した.この燃焼状態の指標や石炭の発熱量及び水分率の推 定値等を用いて、ボイラの運転状態に応じた最適な制御パラメータの自動設定が可能な制御を開発し、最新の1000 MW 石炭だ きボイラにおいて実用化した.

The operation of coal fired boilers is affected by the fuel characteristics, mill conditions and heating surface cleanliness. As a result, the unit load following capability and the temperature balance of boiler elements vary according to the type of coal. This makes multiple coal fired boiler control tuning difficult. To cope with this problem, we have developed a new multiple coal fired boiler control method. This paper gives an outline of the new method which utilizes fuzzy logic, enabling automatic control parameter setting according to the boiler operating conditions. The new method employs the combustion condition index, the estimated calorific value and the moistrue of coal. The combustion index is calculated by a fuzzy logic -based boiler model, which estimates the heat absorption of each heating surface of the boiler. This method has been successfully applied to a new 1 000 MW coal fired boiler.

1. まえがき

昨今の石油代替エネルギー導入促進の動きの中で、埋蔵量や価 格面の有利性から石炭だき発電用ボイラ等が数多く計画されてき ている.また、その石炭だき発電用ボイラにおいても、発電コス ト削減の要求から、従来に比べてより多くの炭種を運用性能を損 なわずに燃焼する技術が要求されている.しかし、石炭だきボイ ラは、重油・ガスだきボイラでは問題とならない燃料性状の差異 や伝熱面の汚れ等により、ボイラの静特性/動特性が大きく変化 する.

筆者らは、ファジィ手法による伝熱面状態推定を用いて、ボイ ラの伝熱特性をリアルタイムで把握する方式を確立した.さらに、 その伝熱特性を基に、制御のパラメータをオンラインで最適に自 動設定する制御方式を開発し、最新の1000 MW 石炭火力である 東北電力(株)原町火力発電所1号ボイラにおいてその機能を確認 した.

この度,この試運転調整において良好な結果が得られ,その実 運用を開始したので,以下に多炭種対応制御の概要を報告する.

2. 多炭種対応制御

2.1 特 徵

石炭だきボイラ多炭種対応制御は、以下の特徴を有している。 (1) ファジィ手法を用いて伝熱面を状態推定することにより、熱 吸収状態から炭種の影響をリアルタイムで精度良く把握するこ とができる^{(1)~(3)}.

(2) 多炭種対応機能はすべて自動プラント制御(APC制御)と同様に三菱制御演算ロジック向け言語 IDOL (Mitsubishi Interpreter DDC Oriented Language)により実現している。このため、APC制御装置に容易に組込むことが可能であり、専用の

装置は不要である。そして、制御装置と同様に、演算状態のモ ニタリングやパラメータの調整が容易にできるよう可視化され ている。

- (3) 炭種の切替えにおいても手動操作の介在は不要であり、ボイ ラの燃焼状態に応じ制御パラメータが炭種やボイラの負荷に合 せて自動的に刻々と変化する。また、炭種の影響のみならず伝 熱面の汚れやバーナパターンの影響に対しても自動的に補正が 行われる。
 - 2.2 機能構成

石炭だきボイラ多炭種対応制御の機能は、図1に示すように以 下の信号を作成する多炭種演算ロジックと従来の APC ロジックか



Functional configuration of multi-coal fired control system

三菱重工技報 Vol. 35 No. 1 (1998-1)

ら構成される.

- (1) ファジィ推論手法から求められる伝熱面の吸収熱量指標
- (2) 吸収熱量指標と同様の手法で求められる発熱量推定信号
- (3) ミルのヒートバランス計算から求められる石炭水分率推定信 号

以下に、これらの信号の求め方と APC ロジックとの関係につい て説明する.

2.3 伝熱面の吸収熱量推定

伝熱面を流れる流体(水又は蒸気)のエンタルピー(温度)は、 管長方向にモデル化することができる. 伝熱面を管の長さ方向に n分割し,分割内を集中系とすれば流体と管の熱収支は次式のよう に表される.

$$V_i \gamma_i \frac{\mathrm{d}h_i}{\mathrm{d}t} = M \left(h_{i-1} - h_i \right) + F_{\mathrm{D}i} \alpha_{\mathrm{D}i} \left(T_{\mathrm{m}i} - T_i \right) \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{m}i} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{m}i}}{\mathrm{d}t} = Q_i - F_{\mathrm{D}i}\alpha_{\mathrm{D}i} \left(T_{\mathrm{m}i} - T_i\right) \tag{2}$$

- F_{Di}:内表面積
- α_{Di}:熱伝達係数
- Vi:容積
- *C_{mi}*: 管の熱容量
- h_i:流体のエンタルピー
- T_i:流体の温度
- T_{mi}:メタル温度
- γ_i :比重量
- Qi: ガスからの吸収熱量
- M:流体の重量流量
- n:管長方向の分割数
- $i=1, 2 \cdots n$

ここで、状態推定を用いると、ボイラ伝熱面の出入口圧力・温 度及び流量から、直接計測できない流体内部の温度及びガスから の吸収熱量を動的に推定することができる。図2を用いてその原 理を簡単に分割数1の場合で説明する。





- 伝熱面の入口圧力と温度により伝熱面入口流体のエンタルピー を算出する。
- ② 伝熱面の入口エンタルピーと伝熱面出口エンタルピー推定値との差に伝熱面を流れる流体流量を乗じ、流体が持去る吸収熱量を算出する。
- ③②で算出した流体が持去る熱量に、メタルから流体への伝熱量 推定値、及び伝熱面出口温度推定値と実測値の差を入力とする ファジィ推定1の出力(補正信号)を加える。
- ④ ③で算出された信号を入力とする積分器にて伝熱面出口エンタ ルピー推定値を出力する。
- ⑤④で算出された伝熱面出口エンタルピー推定値及び実測した伝熱面出口圧力を入力とする温度演算器にて、伝熱面出口温度を 算出する.この伝熱面出口温度推定値と実測した伝熱面出口温 度との偏差を入力とするファジィ推定2の出力が、伝熱面の吸 収熱量推定値となる.
- ⑥ 一方,伝熱量推定器には、伝熱面出口温度推定値とメタル温度 推定値との差,及び計測した伝熱面を流れる流体流量が入力され、伝熱面メタルから流体への伝熱量が出力される。

以上のアルゴリズムによって、リアルタイムで伝熱面の吸収熱 量の推定を行う⁽⁴⁾⁽⁵⁾.実際には、演算精度を向上させるために分割 数を複数にしている.

2.4 吸収熱量指標

石炭性状の燃料比は、燃え切りやすさを示す値である。当社製 ボイラの運転実績から、ボイラ伝熱面の熱吸収分布と燃料比には 相関関係が存在することが明確になっている。筆者らはこの関係 に着目し、ボイラ各部のプロセス量から石炭の燃料比に相当する "吸収熱量指標"を前述の状態推定から求め、APC ロジックの関 連パラメータを補正する方式を考案した。

図3に吸収熱量指標を求めるアルゴリズムを示す.



図3 吸収熱量指標の生成アルゴリズム 吸収熱量指標は、伝熱面の熱吸 収の分布から生成する。 Algorithm of making out heat absorption index signal

APC ロジックでは, BIR (ボイラ入力加速信号) /バーナ角度 調整/蒸気温度制御関連の関数設定など幾つかの制御ロジックに おいて,図4に示すような負荷指令信号と吸収熱量指標を基にし た2変数関数による制御信号を求めている.

このような吸収熱量指標によって APC ロジックを補正する方式 は、単に燃料比の影響を補正するばかりでなく、混炭時の燃料比 の複合的な影響や、伝熱面の汚れ状態、スートブロワ動作、バー ナパターンなどが及ぼすボイラ熱吸収状態のすべての影響を網羅 したものとなっており、燃料比を基準とした補正方法に比べより

三菱重工技報 Vol. 35 No. 1 (1998-1)



図4 吸収熱量指標の APC ロジックへの補正方法 各制御信号は、負荷と吸収熱量指標の値に応じた関数で自動的 に決定される。

Heat absorption index signal applied for APC control

最適な補正が可能となっている.

2.5 発熱量推定信号

従来の発熱量補正は,水燃比の偏差が規定値以上となった場合 にその偏差をなくすように発熱量を強制的に修正する方式を採用 していた.

今回,各伝熱面の吸収熱量推定を用いて,石炭及び空気の入熱 並びにボイラ出口のガス出熱をオンラインで演算することにより, 高い精度で発熱量を推定する新しい方式を開発した.この発熱量 推定信号は,負荷変化等の外乱の影響を受けにくいため,炭種切 替えの際に負荷を一定にする等のプラント運用への制約がなくなった.

2.6 石炭水分率信号とミル関連制御

本多炭種対応制御では、石炭水分率をミルモータ発熱を含めた ミル内のヒートバランスから推定する手法を確立した.この石炭 水分率推定値やミル電流値などの運転状態量によりミル内の石炭 性状変化を把握し、これに基づいてミル出口温度、ミル回転分級 機回転数、ミル加圧装置油圧などのミル関連パラメータを自動設 定することが可能となった.

3. 運用確認試験結果

多炭種対応制御における各種確認試験は、東北電力(株)原町1 号ボイラの試運転調整に合せて平成9年1月から開始した。

まず,実際の試運転における負荷変動時や炭種切替え時の各推 定信号の挙動が計画どおりであること並びに制御に使用可能な安 定な信号であることを確認した.約3箇月の間,十分に確認を実 施した後,平成9年4月から各信号を実際の制御に適用し,約3 箇月間 APC 調整を含めた確認試験を実施した.

3.1 各推定信号の挙動

今回開発した多炭種対応制御における各基本信号の調整結果を 以下に示す.

(1) 吸収熱量指標

試運転において使用した各石炭に対する吸収熱量指標の変動 範囲と燃料比との関係を表1に示す.吸収熱量指標は0.8から 1.2を信号レンジとして、1.0が標準炭の燃料比相当信号となる ように基準化しているが、火炉壁の汚れ状態も含めたボイラ全 体の伝熱状態を示す指標であり、同じ石炭でもある範囲内で変 動している.試運転の結果、本指標を用いることによりAPC ロ ジックに対して適切な自動補正が設定可能であることが確認で きた.

表1 吸収熱量指標の調整結果

Actual test results of heat absorption index

出活	撤到長八七法	吸収熱量指標			
灰 俚	然不平16577月11년。	最小值	最大值		
A 炭(低 HGI/低燃料比炭)	0.92	0.80	0.92		
B 炭(低燃料比/高水分炭)	1.17	0.80	0.99		
C 炭 (標準炭)	1.43	0.93	1.13		
D 炭 (高燃料比炭)	2.03	0.97	1.20		

表2 発熱量推定信号の調整結果

Estimated results of coal heat value						
世 孫	低位発熱量 分析値(MJ/kg)	発熱量推定信号 (MJ/kg)				
灰竹里		最小值	最大值			
A炭(低HGI/低燃料比炭)	27.1	26.4	27.3			
B 炭(低燃料比/高水分炭)	21.7	21.5	22.4			
C 炭 (標準炭)	26.0	25.3	26.3			
D 炭 (高燃料比炭)	26.4	26.2	27.0			

表3 水分率推定信号の調整結果

Estimated results of coal moist rate signal

出 孫	水分率分析值 (%)	水分率推定值信号(%)			
灰俚		最小值	最大值		
A 炭(低 HGI/低燃料比炭)	7.6	7.4	12.6		
B 炭(低燃料比/高水分炭)	14.5	13.5	19.9		
C 炭 (標準炭)	9.2	7.6	11.4		
D 炭 (高燃料比炭)	9.0	7.5	11.1		

(2) 発熱量推定信号

表2に,全調整期間中の各炭種における発熱量推定値の変動 範囲と実際の分析値を示す.各炭種共,推定値はほぼ分析値に 近く,良好な推定結果が得られている.

(3) 水分率信号

表3に、全調整期間中の各炭種における水分率推定値の変動 範囲と実際の分析値を示す。各炭種共、最大値が分析値に比べ て大きく増加しているが、これは雨天後の水分を多く含んだ状 態での推定値であり、通常時はほぼ分析値に近い値を推定して いることが確認された。

3.2 炭種切替え試験実績

実際に多炭種対応制御を使用して、負荷変動中に標準炭(C炭) から低燃料比/高水分炭(B炭)への炭種切替えを実施したとき の多炭種対応制御における各基本信号のトレンドを図5に示す.

吸収熱量指標は、一時的にスートブロワの影響等による変動を 繰返しながらも、標準炭の領域から低燃料比の領域へと変動して おり、炭種切替えによる伝熱特性の変動を反映した挙動となって いることが確認できた.

発熱量信号は,表2に記載した各石炭の発熱量とおおむね等しい値を示している.また,負荷変化時においても発熱量が良好に 推定され,給炭量補正が有効に作用していることが確認できた.

石炭水分率信号は,標準炭から高水分炭へ移行したことを示し ており,これは性状分析値に合致している.

図6に炭種切替え中に4%/minで60~80%の負荷変動を実施 した際の各主要プロセス値偏差のトレンドを示す.

炭種の性状が大きく変る今回のような炭種切替えにおいても, 負荷変化試験(60~100%は4%/min,40~60%は2%/minの 変化率)における主要プロセス値の変動はすべて目標値以内に収

三菱重工技報 Vol. 35 No. 1 (1998-1)



図5 炭種切替え試験における各推定信号の挙動 炭種切替え試験における多炭種対応制御関連信号は、炭種の性状に応じた挙 動を示している.

Actual trend of basic signals for multi-coal fired control



 図6 炭種切替え試験における各主要プロセス信号の挙動
 炭種切替え時の負荷変化においても、各主要プロセス値信号の偏差は少なく、良好な制御性が 確認された。
 Actual trend of main process data

まっており,良好な制御性が確認できた.このほか,ランバック 試験等のいずれの特殊試験においても良好な結果が得られたこと から,同発電所の運転開始とともに実運用を開始した.

4.む す び

石炭だきボイラにおいて、運転員による石炭性状データの手動 入力及び制御パラメータの手動切替えを必要とせず、ファジィ手 法によるボイラの伝熱状態から見た最適な制御パラメータを自動 で設定する制御を開発した。そして最新の1000 MW 石炭だきボ イラにおいて、APC 調整並びにランバック試験等を含めた各種特 殊試験を実施し、多炭種対応制御における各推定信号の妥当性及 び有効性を確認し、実用化した。

本多炭種対応制御は,既に東北電力(株)原町火力発電所におい て実運用中であるが,今後使用される予定の様々な石炭に対して, 本制御方式の有効性の確認を継続していく予定である.また,本 制御方式の高度化を更に進めて機能向上を図っていきたい. 終りに,本多炭種対応制御の開発・検証試験において,多大な 御支援,御指導を頂いた東北電力(株)原町火力発電所の関係者に 厚く感謝の意を表する.

参考文献

- (1) 相楽和男ほか、計測不可能な入力の推定機能をもつオブザーバ(ボイラ伝熱面のオブザーバの構成について)、日本機械学会論文集 Vol.63 C No.605 (1997) p.121~127
- (2) Luenberger, D. G., Observers for Multivariable Systems, IEEE Trans. AC-11 No.2 (1996) p.190~197
- (3) Kalman, R. E. et al., New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Trans. ASME Series D 83-1 (1961) p.95~108
- (4) 相楽和男ほか、ボイラ伝熱面動特性のディジタルシミュレーションの一方法、三菱重工技報 Vol.13 No.5 (1976)
 p.776~782
- (5) Bhattacheryya, S. P., Observer Design for Linear Systems with Unknown Input, IEEE Trans. AC-23 (1973) p.483~ 484