

(技術資料)

高炉炉頂圧発電機 (TRT) の前圧制御におけるフィード フォワード補償の適用

Introducing Feedforward Compensation in Top Pressure Recovery Turbine (TRT) Inlet-pressure Control of Blast Furnace



早田大希*¹
Daiki HAYATA



坂口健斗*¹
Kento SAKAGUCHI



村上 晃*² (博士(工学))
Dr. Akira MURAKAMI

Turbine inlet-pressure control of the TRT (Top pressure Recovery Turbine) has been improved to increase the amount of electricity generated. Conventionally, the inlet-pressure was set lower, due to the restriction of the blast furnace top-pressure rise during turbine trip. New feedforward compensation was added to the TRT inlet-pressure control system and has successfully suppressed the rise of the top pressure. This has been achieved by devising a new feedforward compensation method and simulating the model of the control system. The model was obtained through simultaneous estimation of parameters and disturbance. The feedforward compensation was introduced to the actual TRT control system with a minimum number of on-site tests. This method has been proved to be effective in building a simulation model using limited observed values.

まえがき = 当社は鋼材事業の収益力を強化する目的で、2017年10月に神戸製鉄所の上工程設備を休止し、加古川製鉄所に集約した。このため、加古川の2基の高炉から両製鉄所へ半製品を供給する必要が生じ、加古川の高炉操業の安定生産と操業コストの改善が求められている。

そこで当社は、加古川2高炉において、炉頂圧発電機 (Top pressure Recovery Turbine, 以下TRTという) の省エネに取り組み、実操業への影響を小さく抑えつつ、2高炉TRTの発電量を向上させる圧力制御ロジックを新たに開発した。圧力制御ロジックの有効性の検証には、操業上の制約から実地試験ができないため、シミュレーションにより確認した。シミュレーションに使用する高炉操業の制御モデルは、パラメータと外乱とを同時推定する手法を用いて構築した。

本稿では、パラメータと外乱とを同時推定する手法がプラント制御で使用する限定的な操業データから高精度なシミュレータを構築できる有効な手法であることを示すと同時に、制御ロジックの適用においては、シミュレーションと実地試験を組み合わせることで最小限の試運転で実機に導入した事例を紹介する。

1. 対象設備と課題

本開発において対象としているTRTは、製鉄工程で発生する高炉ガスの圧力エネルギーを電気エネルギーとして回収する発電設備である。図1にTRTの設備構成を示す。高炉ガスは多量の粉塵 (ふんじん) やミストを含んでおり、乾式集塵機 (Dust Catcher, 以下DCという) と湿式集塵機 (Ring Slit Washer, 以下RSWという)

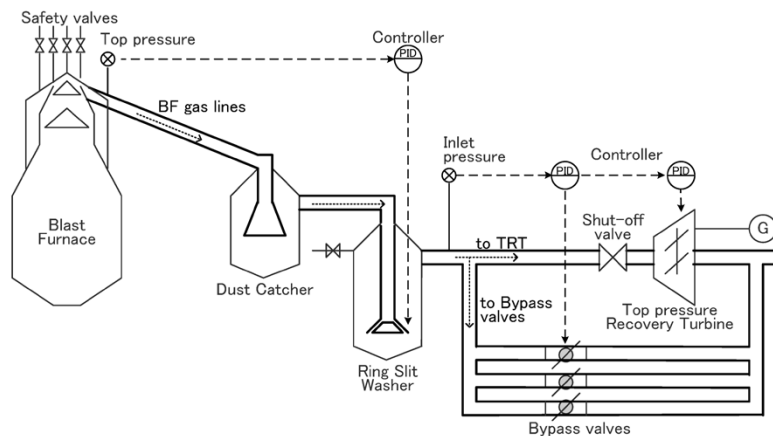


図1 高炉TRTの設備構成
Fig. 1 TRT configuration of blast furnace

*¹ 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 制御部 *² 技術開発本部 生産システム研究所

により除塵する。RSWは入側と出側との圧力差により除塵能力が決まる。このため、入力である高炉頂部の炉内圧力（以下、炉頂圧という）と出力であるタービン前圧の差圧が一定となるように制御される。なお、炉頂圧はRSWにより制御し、RSWの出側であるタービン前圧はTRTの翼弁により制御される。また、TRT停止時のタービン前圧はTRTの翼弁と同じ機能をもつバイパス弁で制御する。バイパス弁は、タービントリップ時に高炉ガスをバイパス経路に流入させてタービン前圧を一定に維持する機能ももつ。タービントリップとは、タービンを瞬時に停止させるための保安インタロックの保護動作のことである。タービンの過振動や発電機の電圧異常が発生した場合に起きる。

タービントリップでは遮断弁を緊急閉動作させる。このため、バイパス弁によるタービン前圧制御が適正でない場合、高炉ガスの流入先がなくなって炉頂圧が上昇し、設備に悪影響を与える。この対策としては安全弁（ブリーダ弁）を開いて高炉ガスを大気放出するが、それと同時に大きな騒音と粉塵も放出することになる。定常操業では、タービントリップを起こす炉頂圧の上昇を考慮してタービン前圧を低く設定するため、発電量の低下を招いていた。

発電量を増やすべく炉頂圧制御を改善するためには、さまざまな操業条件下で実地試験する必要がある。しかし、これまでは操業上の制約から状態造りが難しく実現できていなかった。

今回の取り組みは、タービントリップ時のバイパス弁による圧力制御に着眼し、シミュレーションと最小限の実機検証によって新制御ロジックを実現したものである。次章でその概要を紹介する。

2. タービン前圧の新制御ロジック

2.1 タービントリップ時の炉頂圧の変動

本稿で示す圧力とは、ブリーダ弁の動作設定圧1に対する比率とする。各圧力設定値を表1に示す。現状では、炉頂圧とタービン前圧との差圧は0.122で設定している。これは、RSWの要求差圧（0.087）より大きく、タービン前圧の改善余地（0.035）がある。図2に示したタービントリップ時の炉頂圧変動の実績をみると、炉頂圧が0.024上昇する。ここで、ブリーダ弁の動作設定圧と炉頂圧との差圧0.071は、タービントリップ時の炉頂圧上昇の0.024、原料装入時圧力変動の0.018、および余裕度の0.029の和を偏差として設けている。

本取り組みの目標管理値を以下のとおり定める。

- ・定常時タービン前圧を0.807から0.842に上げる。
- ・タービントリップ時に発生する炉頂圧上昇を0.024以下とする。

ここで発電量とタービン前圧は比例する。

2.2 タービン前圧の新制御ロジックの開発

現状では、タービントリップ時のバイパス弁の圧力制御として、バイパス弁1および2はフィードバック制御（以下、FB制御という）、バイパス弁3はフィードワード制御（以下、FF制御という）を採用している。

バイパス弁2は待機予備としている。

タービン前圧の上昇はバイパス弁1の開放動作の遅れが要因である（図3）。タービン前圧制御の課題は、バイパス弁による高炉ガスの開放量とタービン側への流入量との合計値を常に一定にすることである。そこで、タービントリップ時のバイパス弁1の応答を早くするためにFF制御の機能を加えることにした。

バイパス弁に与えるFF補償量を計算する制御ロジックを考える。高炉ガス流量は、翼弁とバイパス弁の開度から調節弁の流量係数（以下、 C_v 値という）を求めて式（1）で計算する¹⁾。ここで弁の開度と C_v 値の関係を図4に示す。

$$Q=C_v \times a \times \sqrt{P_1^2 - P_2^2} / \sqrt{G(273+T)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに Q : 流量, G : 比重, T : 温度, C_v : 流量係数, a : 定数, P_1 : 入側圧力, P_2 : 出側圧力である。

表1 圧力設定値の改善
Table 1 Improvement of pressure setting value

	Safety valves pressure	Top pressure ①	Inlet pressure ②	ΔP (①-②)
Current	1 ← 0.071	0.929	0.807 ↓ +0.035	0.122 ↑ 0.035
Improve ment	1	0.929	0.842	0.087 (RSW require value)

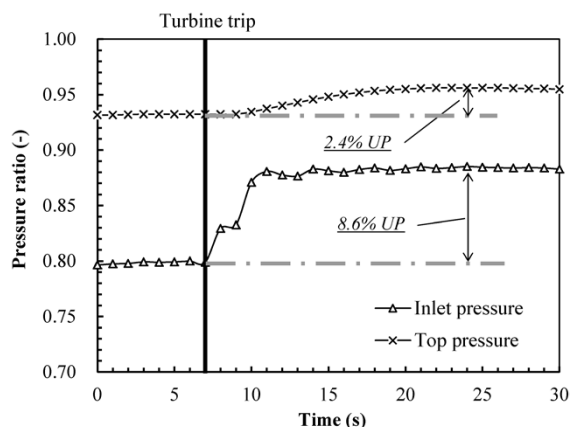


図2 タービントリップ時の圧力変化
Fig. 2 Pressure change in turbine trip

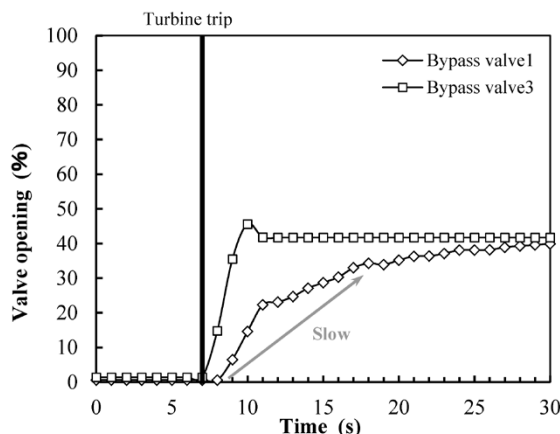


図3 タービントリップ時のバイパス弁動作
Fig. 3 Action of bypass valves in turbine trip

今回開発した新制御ロジックを図5に示す²⁾。タービントリップ後に高炉ガス流量をバイパス弁1で全量吸収できる場合 (Case1) と全量吸収できない場合 (Case2)

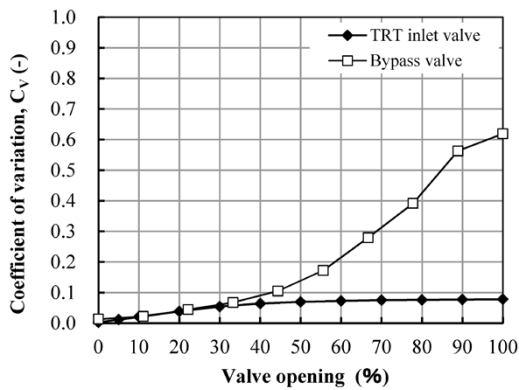


図4 バルブ開度とC_v値の関係
Fig. 4 Relationship between valve opening and C_v value

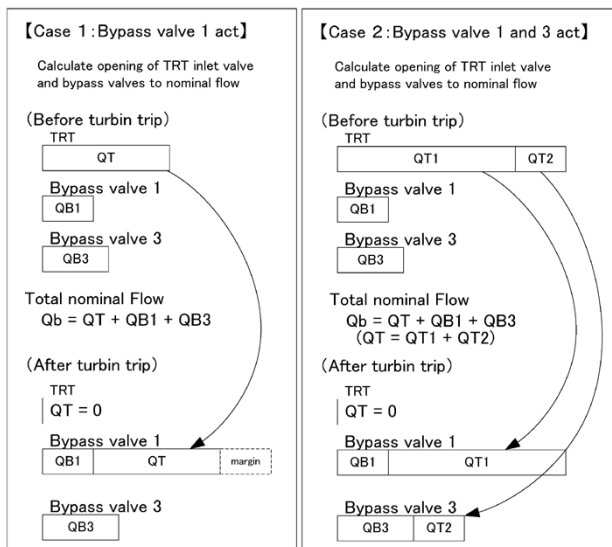


図5 タービントリップ時の制御ロジック
Fig. 5 Control logic in turbine trip

がある。制御ロジックではCase2のバイパス弁1と3に振り分ける機能を考える。まず、タービントリップ前の総流量Q_bを翼弁とバイパス弁の開度から計算する。つぎに、タービントリップ後の総流量Q_bをバイパス弁1に割り振る。バイパス弁1の最大流量からの超過分をバイパス弁3に振り分ける。最後に各バイパス弁に振り分けた流量Q_Tから弁開度を計算しFF補償量とした。

3. 新制御ロジック適用のシミュレーション検証

新制御ロジックの適用には、高炉の生産量を変化させてさまざまな操業条件での検証を必要とする。しかしながら、減産や状態作りの長期化などの制約があることから、本検証ではシミュレーションと実地試験を組み合わせた検証方法を採用した。

今回、シミュレーション検証には高炉ガス流量を推定する制御モデルを構築している。制御モデルの構築には、パラメータと外乱を同時推定する手法を用い、実測値に基づく最適化計算を行っている³⁾。

3.1 高炉ガス流量のモデル化

高炉からTRTおよびバイパス弁までの高炉ガス流量を推定する制御モデルを構築する。図6に示す制御モデルは、高炉ガスの状態方程式、PIDコントローラの式、RSW・TRT・バイパス弁特性を表す式で構成する。ここでは高炉ガス流量の変動を外乱として扱っている。PIDコントローラの伝達関数K(s)を式(2)に示す。

$$K_{RSW}(S) = K_{pRSW} \left(1 + \frac{1}{T_{IRSW}S} + T_{DRSW}S \right)$$

$$K_{TRT}(S) = K_{pTRT} \left(1 + \frac{1}{T_{ITRT}S} + T_{DTRT}S \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$K_{Bypass}(S) = K_{pBypass1} \left(1 + \frac{1}{T_{IBypass}S} + T_{DBypass}S \right)$$

ここにK_p: 比例ゲイン, T_i: 積分ゲイン, T_d: 微分ゲインであり、それぞれの添え字はRSW, TRT, バイパス弁を示す。

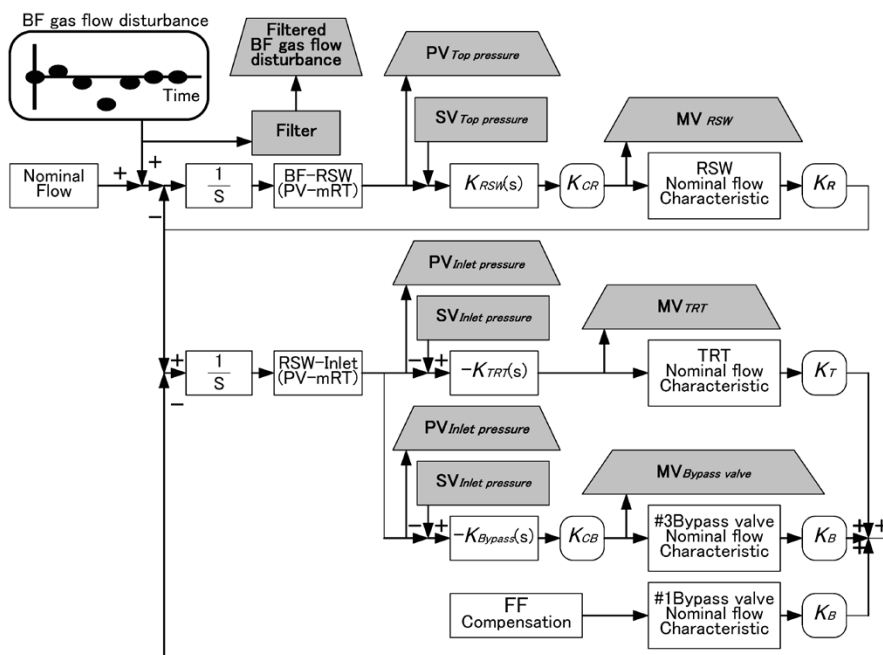


図6 炉頂圧及びTRT前圧の制御モデル
Fig. 6 Control model of top and inlet pressure

図6の制御モデル内のパラメータ（以下、補正係数という）と外乱を同時に推定することを考える。制御モデルの補正係数は、RSWのPIDコントローラの K_{CR} 、RSWの計算流量の K_R 、TRTの計算流量の K_T 、バイパス弁のPIDコントローラの K_{CB} 、バイパス弁の計算流量 K_B で構成する。ここで、補正係数は制御モデル内の理論式による計算値と実測値を一致させるための係数である。外乱は高炉ガス流量の変動であり、図6に高炉ガス流量の黒丸で模式的に示している。この変数値と制御モデルの補正係数を同時に最適化する。実測値が得られているのは、RSW、TRT、およびバイパス弁のそれぞれのPIDコントローラのSV値（圧力設定値）・MV値（弁の操作量）・PV値（圧力実測値）である。つぎに最適化の評価関数を式（3）に示す。評価関数 J はPIDコントローラの実測値（測定値と操作量）とシミュレーションによる計算値の差 ΔPi の2乗和とし、評価関数 J が最小値となる制御モデルの補正係数と外乱を計算する。

$$\begin{aligned}
 J = & \sum_{i=1}^L \frac{4.0}{L} (\Delta PV_{TOP\ pressure\ i})^2 \\
 & + \sum_{i=1}^L \frac{4.0}{L} (\Delta PV_{Inlet\ pressure\ i})^2 \\
 & + \sum_{i=1}^L \frac{4.0}{L} (\Delta MV_{RSW\ i})^2 \\
 & + \sum_{i=1}^L \frac{4.0}{L} (\Delta MV_{TRT\ i})^2 \\
 & + \sum_{i=1}^L \frac{4.0}{L} (\Delta MV_{Bypass\ valve\ i})^2 \\
 & + \sum_{i=1}^L \frac{1 \times 10^4}{L} (Filtered\ BF\ gas\ flow\ disturbance\ i)^2
 \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta PV_i &= PV_{act\ i} - PV_{sim\ i} \\
 \Delta MV_i &= MV_{act\ i} - MV_{sim\ i}
 \end{aligned}$$

ここで、 L は1秒周期のサンプル数であり $L=101$ 点と

する。また $PV_{act\ i}$ ：圧力実測値、 $PV_{sim\ i}$ ：圧力計算値、 $MV_{act\ i}$ ：弁操作実測値、 $MV_{sim\ i}$ ：弁操作計算値であり、添え字Top, Inlet, RSW, TRT, Bypassはそれぞれ炉頂、タービン前、RSW, TRT, バイパス弁を示す。

3.2 補正係数と外乱の計算

補正係数と外乱を同時に最適化し、これらの値を用いてシミュレーションした結果を図7に示す。実線が実測値、破線がシミュレーションによる計算値である。高炉ガス流量の外乱の時系列値は、図7(d)のように推定されている。変動の原因は、主に原料装入時の流量変動と考えている。図7(a)(b)(c)(e)(f)に示すように、炉頂圧PV値、タービン前圧PV値、バイパス弁MV値、RSW MV値、TRT MV値がシミュレーションによりほぼ再現できたことが分かる。図7(g)のバイパス弁のFF補償量はシミュレーションでも実測値を用いている。最適化計算により得られた補正係数を式（4）に示す。

$$\left. \begin{aligned}
 K_{CR} &= 0.99 \\
 K_{CB} &= 0.86 \\
 K_R &= 0.86 \\
 K_T &= 0.81 \\
 K_B &= 0.65
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで最適化により得られた補正係数は、FF補償量に用いるTRTおよびバイパス弁の C_v 値に反映する。すなわち、図4で示す C_v 値からTRTでは K_T を乗算し、バイパス弁では K_B を乗算して新 C_v 値として用いる。これにより高精度なFF補償が得られる。なお、前述した例の最適化で得られた補正係数の場合、同じ操業条件では高精度に制御できるが、操業条件が異なると誤差が生じることがある。このため、2/4負荷遮断、過振動トリップなどでも同様の最適化を行い、補正係数の平均値で

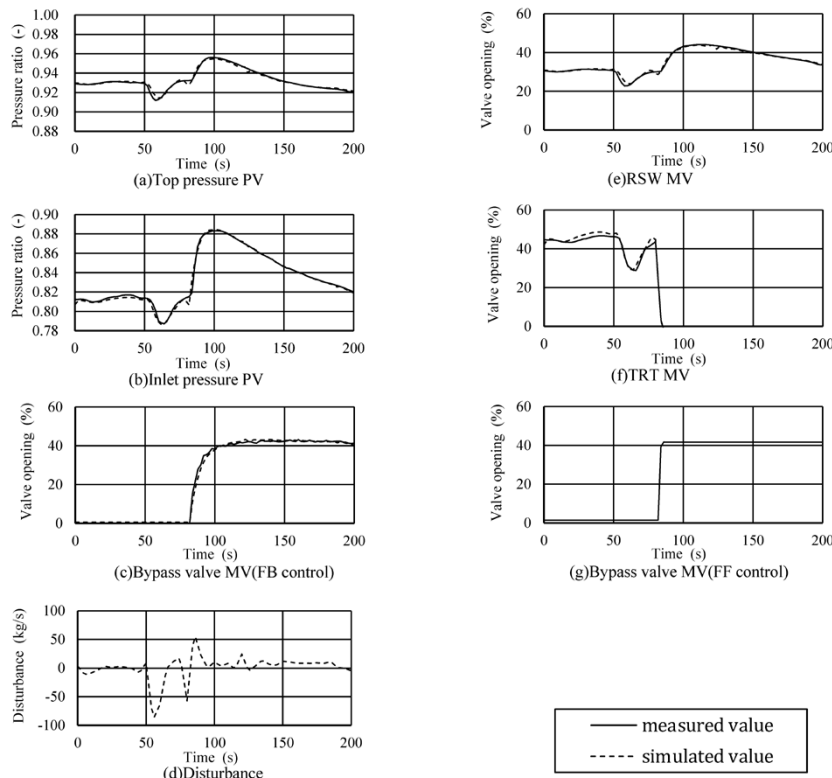


図7 実測値とシミュレーション値の比較
Fig. 7 Comparison of measured and simulated values

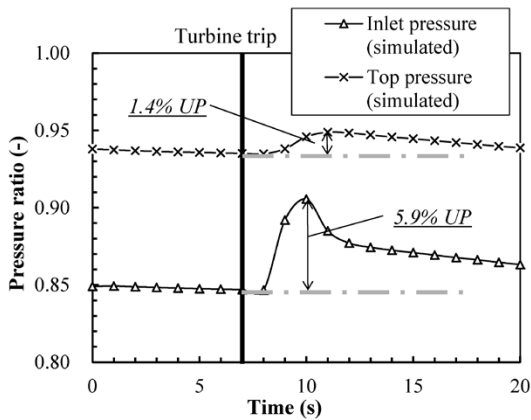


図8 タービントリップ時の圧力変化 (シミュレーション結果)
Fig.8 Pressure change in turbine trip (simulation results)

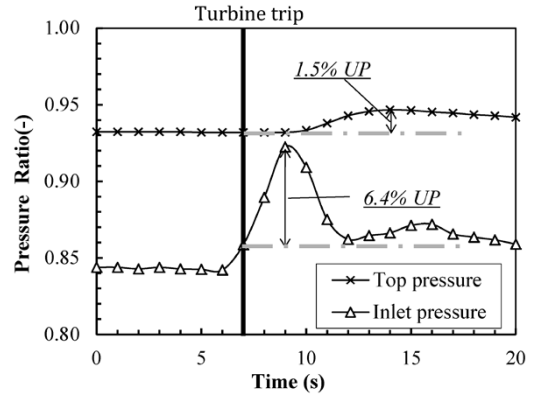


図10 タービントリップ時の圧力変化 (実地試験)
Fig.10 Pressure change in turbine trip (field test)

ある $K_T=0.84$, $K_B=0.73$ を実機に採用している。

以上により、制御モデルの補正係数と外乱とを同時に推定することができた。任意の波形の外乱を考慮して推定することにより、外乱が制御モデルの補正係数の推定に悪影響を及ぼすことを防止し、高精度な制御モデルの補正係数を得ることができるようになっている。

3.3 新制御ロジックでのシミュレーション

2章で述べた新制御ロジックを制御モデルに組み込んでシミュレーションを行った。結果の一例を図8に示す。タービン前圧を0.842に変更してシミュレーションすると、炉頂圧は0.014上昇する結果が得られた。これによりシミュレーションで目標値0.024以下に収まることを示し、新制御ロジックの効果を定量的に証明できた。

4. 新制御ロジックによる実地試験

新制御ロジックを適用し、タービン前圧を0.842に上げて実地試験した。このときのバイパス弁の動作および圧力変動の結果をそれぞれ図9、図10に示す。炉頂圧は0.015上昇して目標値は0.024以下となり、タービン前圧を0.842に設定しても問題ないことを確認した。発電量は計算上1.043倍の改善となる。

つぎに、図11にてシミュレーション結果を検証する。炉頂圧の上昇幅では、計算値0.014に対して実測値0.015となり良好な結果が得られた。いっぽう、炉頂圧のピークへの到達に3秒の差があるのは、FB制御の動作タイ

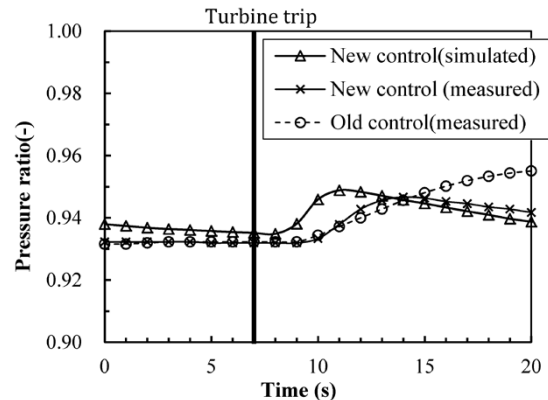


図11 炉頂圧変動の実測値とシミュレーション値の比較
Fig.11 Comparison of measured value and simulated value of pressure fluctuation at furnace top

ミングや制御装置の通信時間の影響と考えられる。

以上の検証から、炉頂圧の上昇幅に差異はなく、シミュレーションによる推定に問題ないことが分かった。

むすび=加古川2高炉TRTのタービントリップ時の新制御ロジックの適用において、シミュレーションを組み合わせることによって高炉の生産量を減産することなく、かつ短期間の試験により実機化することができた。これは、高炉ガス流量の制御モデルの構築によって圧力の上昇幅を推定し、実地試験で高炉の生産に影響しないこと、いわゆる炉頂圧が上限まで到達しないことを定量的に証明できたことで実現した。とくに、補正係数と外乱を同時推定する手法は、プラント制御で得られる限定的な実測値であっても、高精度な制御モデルの構築が可能であることを証明した。

今後、操業時のデータが少ない場合や非定常な操業条件の場合でもこの手法によって制御モデルの構築が可能となり、制御ロジックの収益改善につながる制御ロジックの改造や補正係数の最適化に役立つと考えている。

参考文献

- 1) 山武 (Azbil) 調節弁ハンドブック委員会. 工業用プロセスハンドブック
- 2) 榊神戸製鋼所. 村上 晃. 高炉の炉頂圧発電設備におけるバイパス弁の操作方法. 特許第6249920号. 2017-12-20.
- 3) 榊神戸製鋼所. 松浦 徹. 制御モデルのパラメータと外乱との同時推定方法. 及びこの同時推定方法を用いた制御対象の制御方法. 特許第6084312号. 2017-02-22.

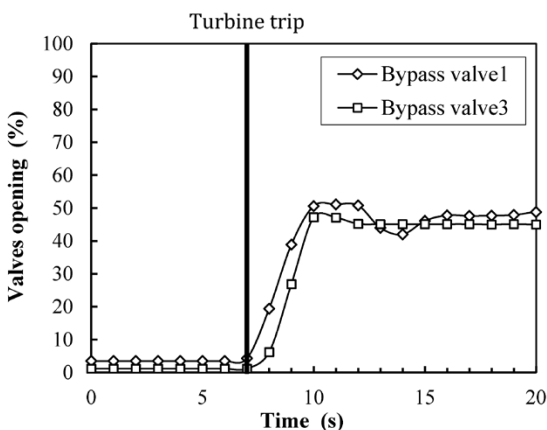


図9 タービントリップ時のバイパス弁位置 (実地試験)
Fig.9 Position of bypass valves in turbine trip (field test)