センサドリフト評価に基づく機器診断手法の検討

金田 昌基^{1,*}, 有田 節男¹, 多田 伸雄², 横田 勝男²

A Study of Equipment Diagnostic Method by Evaluating Sensor Drift

Masaki KANADA^{1,*}, Setsuo ARITA¹, Nobuo TADA² and Katsuo YOKOTA²

¹Hitachi, Ltd., Energy and Environmental Systems Laboratory, 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1221, Japan

²Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 317-0073, Japan

(Received May 25, 2010 and accepted in revised form October 13, 2010)

The importance of condition monitoring technology for sensors and equipment has increased with the introduction of condition-based maintenance in nuclear power plants. A diagnostic system must be able to distinguish between sensor drift and equipment failure. We have developed a diagnostic method using the Mahalanobis-Taguchi method for evaluating sensor drift and equipment failure. Through evaluation of several sets of simulation data we confirmed the effectiveness of the developed diagnostic method.

KEYWORDS: *plant equipment, pump, sensor, condition monitoring, diagnostic, drift, failure, Mahalanobis-Taguchi method*

I. はじめに

原子力プラントの設備保全においては、定期的に点検を実施する時間基準保全から、設備の健全性評価に基づき保守を実施する状態基準保全への移行が進められている。これにより、プラント運転中にセンサや機器などの健全性を診断する状態監視技術の重要性が高まっており、例えば、ポンプなどの回転機械については、振動計測、赤外線による温度計測、潤滑油の分析による診断方法がすでに実プラントにおいて適用されている。また、保守作業の実施を考慮すると、状態監視技術の精度向上と異常の早期検出が重要である。診断によって機器が故障する前に異常兆候を発見できれば、故障の回避策の検討、保守計画の策定、交換部品の調達など、保守効率化に寄与できる。

本研究では、プラントの主要なポンプを対象として、プロセス量を用いた診断技術を開発している。既存の診断方式に加え、プラントの特性を反映したプロセス量を用いることにより、診断精度の向上と異常の早期検出が期待できる。

プロセス量を用いた機器診断において監視すべき対象としては、センサ異常と機器異常が考えられる。このうちセンサ異常については、発生頻度の高いセンサドリフトが主

な診断対象である。これまでに、センサドリフト診断としてはニューラルネットを用いた手法¹⁾、逐次確率比検定²⁾などによる手法が開発されている。機器の診断としてはウェーブレット解析による手法³⁾などが報告されている。

我々はこれまでにセンサドリフトの診断方法として、相関をもって変化する複数のセンサを組み合わせ、MT(マハラノビス・タグチ)法⁴⁾を用いてドリフトの有無を診断する手法を開発した⁵⁾。また、機器診断についても、MT法により正常時からの差異を異常度として評価することで異常の有無を診断する手法を開発した。これらの診断技術により、センサと機器それぞれの診断は可能である。ただし、これらの手法により検知した異常がセンサドリフトと機器異常のいずれによるものかを区別することについては、以下の課題がある。

センサドリフト診断では、センサにドリフトが発生した場合にはセンサドリフトと判定するが、機器に異常が発生してプロセス値が変化した場合にも、その変化分をドリフトと誤判定する可能性がある。一方、機器診断では、機器に異常が発生してプロセス値が変化した場合には機器異常と判定するが、センサにドリフトが発生した場合にも、プロセス値の変化により機器異常と誤判定する可能性がある。したがって、センサドリフトと機器異常のいずれかが発生した場合に、センサドリフト診断手法と機器診断手法の両方で異常と判定するので、原因を区別するのが困難である。

状態監視技術をプラント実機に適用することを考える

¹ 株式会社日立製作所 エネルギー・環境システム研究所

² 日立 GE ニュークリア・エナジー㈱

* Corresponding author, E-mail: masaki.kanada.xw@hitachi.com

と、センサドリフトと機器異常とを区別できることは保守対応の点から重要である。対象や条件によっても異なるが、例えば、センサドリフトが発生した場合には次回の定期検査において校正を行えばよいが、機器異常であればプラント運転の即時停止が必要となる可能性がある。異常と検知した原因がセンサドリフトと機器異常のいずれによるものかを判定できなければ、運転員はより重大な機器異常を想定した対応をする必要があるため、異常の区別は重要な課題である。この課題に対して、本研究ではセンサドリフトの特性に着目し、発生したセンサドリフトを推定し、プロセス値を補償することにより機器診断を実施する診断方式について検討した。

II. 診断方式の概要

1. センサドリフトと機器異常

機器診断において問題となるのは、センサドリフトによるプロセス値の変化と、プロセス値そのものの変化とを区別し難いことである。そこで、センサに発生したドリフト量を推定し、機器診断に用いるプロセス値からドリフトを除去しておくことで、機器診断を正しく実施する方式を提案した。本研究で提案するセンサドリフト補償による機器診断方式の処理フローを **Fig. 1** に示す。診断のための処理は、オンラインドリフト量推定、オフラインドリフト量評価、ドリフト除去、機器異常度評価から構成される。

オンラインドリフト量推定では計測したプロセス値のドリフト量を推定する。推定手法としては、MT 法を用いてドリフト量を推定する方式を開発した。計測したプロセス値から推定したドリフト量を差し引いて除去することによ

り、機器診断ではドリフトの影響を受けずに機器そのものの状態を診断できる。ただし、計測したプロセス値からドリフトを除去する際に、誤ったドリフト推定結果を用いると、機器診断の結果も誤る可能性がある。したがって、ドリフト除去の際には推定したドリフト量の妥当性を評価することが必要である。推定したドリフト量が妥当かどうかは、定期検査において確認されたドリフト量との比較が有効であり、その記録であるセンサ校正データを用いることで評価できる。そこで本研究では、オフラインのセンサ校正データによるドリフト分布をもとに、オンラインで推定したドリフト量の妥当性を評価する方式を提案した。

機器異常度評価では、計測したプロセス値またはドリフトを除去したプロセス値を用いて機器異常度を計算し、機器異常の有無を判定する。ドリフトを除去した場合には、機器診断はドリフトの影響を受けないので、機器そのものに異常があるかどうかを診断可能である。一方、ドリフトを除去できない場合には、センサの故障などドリフト以外の異常か、機器異常の可能性が高いと判断する。

以上の処理により、センサドリフトの影響を除いて機器診断を実施することが可能である。以下に、各処理の詳細について説明する。

2. オンラインドリフト量推定

オンラインデータからのドリフト量推定として、MT 法による手法を用いた。MT 法は対象システムの多数特徴量を総合評価し、基準とする正常状態との違いの程度をマハラノビス距離で判定する手法である。MT 法は正常時のデータをもとに異常を診断できるのが大きな特徴である。MT 法で診断の基準となるマハラノビス距離は、いくつかの変数間で相関関係をもつ多次元空間中の距離を測定する尺度である。多変数ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ の平均を $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ 、共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}$ とすると、MT 法で定義されるマハラノビス距離 D は (1) 式で表される。

$$D = \sqrt{\frac{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})}{n}} \quad (1)$$

MT 法では、まず正常時のデータを基準データとして定義し、基準データから単位空間を作成する。次に、診断対象とするデータに対するマハラノビス距離を計算する。

本研究では MT 法を用いてドリフト量を推定する手法を開発した。ドリフト量を推定するために、まずは正常状態のデータ分布を作成する。これはプラント起動直後などドリフトが十分小さいと考えられるときに一定期間のプロセス値を計測して用いる。用いるプロセス値は 2 つ以上で、相関をもって変化する組み合わせ（給水流量 A、B など）が含まれるように選択する。また、このプロセス値は機器診断にも用いるので、機器異常とプロセス値の変化との関連が明らかなものを選択する。なお、出力値などの状態が変化する場合には、各状態ごとに正常状態のプロセス値を計測してデータ分布を作成しておき、その状態のデー

Fig. 1 Flowchart of diagnosis method of sensor and equipment

タ分布を用いてドリフト量を推定する必要がある。

次に、この正常状態のデータ分布から **Fig. 2** に示すように各プロセス値方向に分布を移動してドリフトが発生した場合のデータ分布を作成する。ドリフト診断時においては、これらのドリフト発生時のデータ分布それぞれを単位空間として、計測データに対するマハラノビス距離を計算し、最短となるデータ分布のドリフト量を計測データのドリフト量と推定する。このドリフト量推定は計測データが入力するたびに実施して、推定ドリフト量の時系列データを得る。

なお、ドリフト発生時のデータ分布は、各プロセス値ごとに、複数のドリフト発生パターンを作成する。後述の評価例では、各プロセス値の方向に $-2.0 \sim 2.0\%$ FS の範囲で、 0.01% FS ステップごとにパターンを作成した。複数のプロセス値にドリフトが発生すると考えられる場合にはさらにその組み合わせのパターンを作成する。

ただし、複数のプロセス値のドリフトを推定するには、それより多数のプロセス値を組み合わせる必要がある。例えば、2つのセンサを用いて診断する場合、2つのセンサとも $+1\%$ のドリフトが発生したのか、プロセス値そのものが $+1\%$ 増加したのかは区別できない。したがって、複

数のプロセス値にドリフトの発生を想定する場合にはプロセス値の組み合わせが適当になるようにする必要がある。

3. オフラインドリフト量評価

オンラインドリフト推定で得られたドリフト量を、計測したプロセス値から差し引くには、そのドリフト量が予想されるドリフト分布に対して妥当であるか確認する必要がある。センサに発生するドリフト分布は、定検時における校正作業の記録である校正データをもとに予想できる。すなわち、過去のドリフト発生事例をもとに、現在運転中に発生すると考えられるドリフトの範囲を予想する。

センサの校正データの例を **Table 1** に示す。校正作業は対象とするセンサに出力値 0, 20, 40, 60, 80, 100, 80, 60, 40, 20, 0% に相当する基準信号を順に加え、基準値との差をドリフトとして記録し、定められたドリフト許容値(例えば 0.5% FS) 以下になるように調整する。センサは型式や設置場所などでグループ化した場合、発生するドリフト量の分布は正規分布とみなすことができる⁶⁾。この特性を用いると、正規分布の再現性により、校正からの任意の時刻 t におけるドリフト量 x の分布 $f(x)$ は次の (2) ~ (4) 式で推定できる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{t}{t_0} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{t}{t_0}} \quad (4)$$

ここで、時刻 t におけるドリフトの平均値を μ 、標準偏差を σ とした。 t_0 は校正から次の校正までの間隔である。校正作業において各センサのドリフトを確認し、グループ化したセンサのドリフトの平均値が μ_0 、標準偏差が σ_0 である。ドリフト分布は基準信号の出力値ごとに計算し、任意の出力値におけるドリフト分布は前後の出力値からの内挿により計算する。例えば、50%出力のドリフト分布は40%出力と60%出力から内挿して計算する。

Fig. 2 Sensor drift estimation by MT method

Table 1 Sensor calibration data

Calibration point (%)	Standard output (mA)	Output Before calibration (mA)	Error before calibration (%)	Output after calibration (mA)	Error after calibration (%)
0	4.000	4.013	0.078	3.994	-0.038
20	7.200	7.283	0.519	7.201	0.009
40	10.400	10.434	0.212	10.402	0.010
60	13.600	13.669	0.434	13.604	0.023
80	16.800	16.895	0.594	16.793	-0.043
100	20.000	20.050	0.313	20.001	0.004
80	16.800	16.888	0.551	16.790	-0.060
60	13.600	13.683	0.519	13.591	-0.053
40	10.400	10.398	-0.015	10.391	-0.053
20	7.200	7.275	0.469	7.199	-0.003
0	4.000	4.051	0.316	4.005	0.031

ドリフト推定によって得られたドリフト量 d が、校正データに基づくドリフト分布に従う条件は、95%信頼区間で評価すると(5)式で表される。この式を満たすときは、オンライン推定ドリフト量は過去のドリフト分布に従っているため、ドリフトとみなすことが妥当であると考えられる。

$$\mu - 2\sigma < d < \mu + 2\sigma \quad (5)$$

4. ドリフト除去

オンラインドリフト量推定により推定したドリフト量が、オフラインドリフト量評価により妥当と判定された場合には、計測したプロセス値から推定したドリフト量を差し引き、これを真値とみなすことができる。この真値を用いて機器診断を実施することにより、機器そのものの状態を診断可能である。

逆に、オンラインで推定したドリフト量がオフラインドリフト量評価で予想されるドリフト分布に従わなければ、推定したドリフト量はドリフトを正しく見積もったものではなく、センサの故障などドリフト以外の異常か、機器異常に伴うプロセス値の変化分をドリフトと誤認識していると考えられる。この場合は、ドリフト除去はできないので計測したプロセス値を用いて機器診断を行う。

センサのドリフト以外の異常としては、通常の実検で確認されるドリフトを大きく上回るドリフトの発生や、センサの偶発的故障などが考えられる。この場合は、機器そのものの異常と区別することはできないが、発生頻度は低いと考えられる。

5. 機器異常度評価

機器異常度評価として、正常状態からのマハラノビス距離をもとに異常度を評価する手法を用いた。異常有無を判定するしきい値として、本研究では、センサの要求精度であるドリフト許容値(0.5%FS)に相当するセンサドリフトが発生したときのマハラノビス距離の値 D_0 に設定した。異常度 E は(6)式で表され、1.0を超えた場合には機器異常と判定できる。

$$E = D/D_0 \quad (6)$$

6. 異常の区別

以上のセンサ診断および機器診断の結果から、異常の種類は以下のように分類できる。

(1) ドリフト推定が妥当で、機器診断結果が正常のとき

機器は正常であると判定する。センサは、ドリフト量が許容値より小さければ正常であり、許容値を逸脱していれば校正が必要な状態である。

(2) ドリフト推定が妥当で、機器診断結果が異常のとき

機器に異常が発生していると判定する。センサは、ドリ

フト量が許容値より小さければ正常であり、許容値を逸脱していれば校正が必要な状態である。

(3) ドリフト推定が妥当でないとき

機器診断で正常と判定した場合には異常予兆の段階で、機器診断で異常と判定した場合にドリフト以外のセンサ異常か機器異常であると判定する。

III. 模擬診断結果と考察

前述した診断方法の妥当性を検証するために、プラント機器の異常事例に基づく模擬データを用いて評価を行った。評価には、実機の渦巻ポンプにおいて、センサドリフトが発生した事例と、機器異常が発生した事例をもとに、比較可能なデータとして加工した模擬データを用いた。診断に用いたプロセス値は第一段圧力(P_1)の平方根、第二段圧力(P_2)の平方根、第一段温度(T_1)と第二段温度(T_2)の差、ブリードオフ流量 Q である。このうち圧力の平方根とブリードオフ流量には一定の相関があることがわかっている。模擬データの例を Figs. 3~5 に示す。

Figure 3 はある運転サイクルにおける正常な場合のデータである。

Figure 4 はブリードオフ流量センサにドリフト発生を模擬した場合である。正常時データのブリードオフ流量

Fig. 3 Simulation data of normal state

Fig. 4 Simulation data of drift state

Fig. 5 Simulation data of a failed state

Fig. 6 Estimated sensor drift value in drift state

に、運転サイクル前後の定期検査の校正作業で確認されたブリードオフ流量のドリフト量が線形で増加するように加えたものである。

Figure 5は機器異常を模擬した場合である。正常時データのブリードオフ流量に、ブリードオフ配管の漏れを想定したブリードオフ流量の低下分を加えたものである。なお、各データのもとになる正常時データは異なる運転サイクルのものを用了。

評価方法としては、正常時データを学習に用い、ドリフト発生時と機器異常時におけるブリードオフ流量のドリフト量を推定した。

ブリードオフ流量センサのドリフト発生を模擬したデータについて、オンラインドリフト推定により推定したブリードオフ流量センサのドリフト量と、オフラインドリフト評価により校正データから予想したブリードオフ流量センサのドリフト分布の上限および下限を Fig. 6 に示す。この結果、推定したドリフト量はドリフト分布の範囲内にあり、ドリフトと判断するのが妥当であることがわかる。したがって、推定ドリフト量をプロセス値から差し引き、真値を求めることが可能である。なお、模擬ドリフト量と推定ドリフト量との誤差は最大0.26%FSであり、これは

Fig. 7 Failure indexes in drift state

Fig. 8 Estimated sensor drift value in a failed state

元となる正常時データの運転サイクル間の誤差を含んでいる。

ドリフト補正を行わずに機器診断を実施した場合と、ドリフト補正を行って得られた真値を用いて機器診断を実施した場合の結果を Fig. 7 に示す。この結果、ドリフトを補正しない場合は異常度が1.0を超えて機器異常と誤判定される可能性があるのに対し、ドリフトを補正した場合は異常度が1.0以下であるので機器は正常と正しく判定できることがわかった。

機器異常時のデータについて、オンラインドリフト推定により推定したブリードオフ流量センサのドリフト量と、オフラインドリフト評価により校正データから予想したブリードオフ流量センサのドリフト分布の上限および下限を Fig. 8 に示す。この結果、推定したドリフト量はある時点からドリフト分布の範囲外に逸脱し、ドリフトと判断するのは妥当ではないことがわかる。したがって、推定ドリフト量をプロセス値から差し引くことはできない。ドリフト補正を行わず機器診断を実施した結果を Fig. 9 に示す。なお、本評価ではドリフト分布からの逸脱前の期間についても補正は行っていない。この結果、異常度が1.0を

Fig. 9 Failure index in a failed state

超えるので機器に異常があると判定することになる。

以上の結果から、センサドリフト発生時にはセンサドリフトと診断し、機器異常発生時には機器異常と診断できることを確認した。本手法によりセンサドリフトの影響を除いて機器診断が可能であると考ええる。

本評価では、1つのセンサにドリフトが発生した場合と、機器の異常が発生した場合について、センサドリフトの評価によりその影響を受けずに機器診断が可能となることを確認した。ただし、実用を考えた場合には複数のセンサにドリフトが発生する場合、ドリフトと機器異常が同時に発生する場合も考えられる。このような場合、センサドリフトの診断精度が低下する問題があり、診断に用いるプロセス値の組み合わせを増やすことが必要と考えており、今後の課題としたい。

IV. ま と め

本研究では、センサドリフトと機器異常とを区別する方式を検討した。MT法によるセンサドリフト量推定方式を開発し、センサ校正データに基づくドリフト分布評価により、ドリフトを除去して機器診断を行う手法を提案した。これにより、機器診断においてセンサドリフトの影響を除去して診断することが可能である。実機ポンプの異常事例をもとにした模擬データ評価では、センサドリフトの影響を除いて機器診断が可能であることを確認した。

— 参考文献 —

- 1) N. Kusumi, Y. Ohga, M. Fukuda *et al.*, “Development of basic system for sensor calibration support in nuclear power plant,” *Proc. 6th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety* (2004).
- 2) Y. Hirose, T. Tamaoki, T. Hayashi *et al.*, “Online inspection of sensors in nuclear power plants,” *7th Symp. Evaluation and Diagnosis*, JSME (2008).
- 3) Y. Hayashi, Y. Ohga, “Development of safety support system for nuclear power plant, —Anomaly early detection system (Pump moving components)—,” *2000 Ann. Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*, **R2** (2000), [in Japanese].
- 4) G. Taguchi, “*MTsisutemuniokerugijutukaihatsu*,” Nihon-kikakukyokai, ISBN 978-4542511149 (2002), [in Japanese].
- 5) M. Kanada, A. Fushimi, “Study on diagnosis method of sensors by MT method,” *2009 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*, **G37**, ISBN 978-4-89047-146-1 (2009), [in Japanese] [CD-ROM].
- 6) Gensiryokukikakuinnkai, “*Guideline for the Evaluation of Safety Protection System Instrument Drift*,” Nihondenkikyokai, JEAG 4621-2007, ISBN 978-4-88948-180-8 (2008), [in Japanese].