

計器のオンライン状態監視技術

Online Monitoring of Nuclear Power Plants Instrumentation

(株)東芝	林 俊文	Toshifumi HAYASHI	
	玉置哲男	Tetsuo TAMAOKI	
	廣瀬行徳	Yukinori HIROSE	
	榎本光広	Mitsuhiro ENOMOTO	
	前川立行	Tatsuyuki MAEKAWA	
	真杉剛	Tsuyoshi MASUGI	
	清水俊一	Shunichi SHIMIZU	Member

The authors developed an online method to monitor the condition of sensors implemented in Nuclear Power Plants. The method employs Sequential Probability Ratio Test (SPRT), and calculates log-likelihood function of each sensor readings obtained through the plant process computer to determine whether the value of the log-likelihood function exceeds a statistically defined setpoint. A study on data collected during startup testing of a BWR power plant showed that the method was applicable for 1824 sensors being evaluated. The authors confirmed that the method detected sensor drifts beyond the required precision for almost all cases.

Keywords: Condition-based Maintenance, Nuclear Power Plants, Instrumentation, SPRT

1. 緒言

2008年度より新検査制度が導入され、適切な状態監視保全を行うことで原子力発電プラントの長期サイクル運転が可能となる。計器の状態として重要な点は、計測値の精度であり、そのためには、計測値の要求精度範囲を超えるドリフトが起こっていないことを担保することが重要である。

計器精度を保証するため、従来は定検時に毎回計器を校正するとともに、運転期間に起こり得るドリフトの大きさを予測し、精度を管理してきた。長期サイクル運転では、従来に比べ長期間に亘り計器の精度を保つことが要求される。従来は、計器ドリフトを検出するためには現場で計器を直接調べるよりなく、運転中のプラントでは難しかった。そこで、計測値に統計的仮説検定を適用することで、運転中のプラントの計器ドリフトを検出する手法を開発した。

連絡先：林俊文、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町8、(株)東芝電力システム社 電力・社会システム技術開発センター計測・検査技術開発部監視計装技術担当、電話：(045)770-2373、E-mail:toshifumi.hayashi@toshiba.co.jp

2. 課題

計器ドリフトを計測値から検出するために、以下の二つが課題として挙げられる：

(1) 計測値のしきい値を計器毎に用いないこと

計測値のしきい値を計器毎に設定し、しきい値を超えた時ドリフトと判定する方法は直感的で分かりやすい。しかしながら、計測値の揺らぎによってしきい値を超えたと判定する恐れがある。

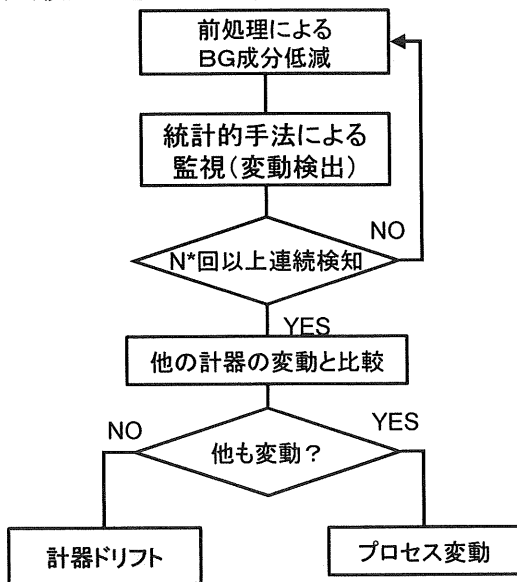
(2) 計器ドリフトによる計測値の変動とプロセスの変化による計測値の変動との区別

運転中のプラントでは、プロセスが変化すればプロセス値そのものが変動し、計測値も変動する。ドリフトによる変動をプロセスの変化に起因する計測値の変動から如何に区別するかが重要である。

3. ドリフト検出

上記の二つの課題を解決するため、基準となる値からの計測値の変動を対数尤度比を用いた統計的検定により検出する技術を開発した。なお、プロセス変動の少ない計測値と、プロセス変動のある計測値とは、

統計的検定の適用方法が多少異なる。ここでは初めに、



Nはパラメータ

Fig. 1 Flow Chart of Drift Detection Method

プロセス変動の少ない計測値を対象として説明し、次に変動のある計測値に適用する際の変更点を説明する。

3.1 プロセス変動の少ない計測値

プロセス変動が少ない計測値に対する本技術の流れを Fig.1 を用いて説明する。

(1) 計測値の前処理による BG 成分の低減

生の計測値にはバックグラウンド(BG)が含まれるが、この成分を前処理によって低減し、変動の検出へのバックグラウンドの影響を小さくする。

(2) 対数尤度比による変動の検出

変動を検出するために、基準期間に計測される複数の計測値と、監視期間に計測される複数の計測値の平均値に差があるかどうかを統計的に検定する。本研究では、基準期間を運転サイクル初期とした。この期間は定期点検中の計器校正から時間が経っておらず、計器が高い精度を保っていると想定される。一方、監視期間は基準期間が終わってから運転サイクルが終わるまでの任意の期間である。

平均値の変化を統計的に検出する方法として、Student の t 検定、Welch の t 検定などがある[1]。これらの方法は、収集した計測値を一括処理するケースに

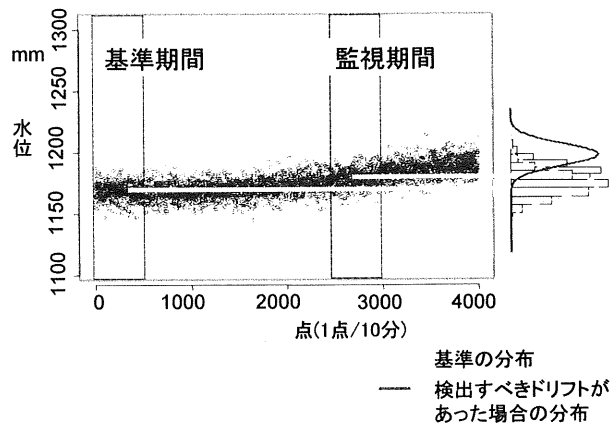


Fig.2 Comparison of two Distributions. One is the baseline; the other is of changed values.

向いている。それに対して、監視期間では計測値は時間の経過にしたがって逐次収集される。そこで、計測値の逐次処理が可能な、Wald の逐次確率比検定(SPRT)法[2]を採用した。

SPRT 法では、監視期間に計測された計測値から平均値 a_0 と標準偏差 σ を求める。要求精度範囲を超えるドリフトが発生した場合に想定される平均値を a_1 とする。

二つの仮説 H_0 と H_1 を考える。

H_0 : 計測値は平均値 a_0 標準偏差 σ の正規分布に従う。
(平均値に変動がない)

H_1 : 計測値は平均値 a_1 標準偏差 σ の正規分布に従う。
(平均値に変動がある)

Fig.2 は、 H_0 に基づく分布と H_1 に基づく分布が、計測値とどの様に対応するかを示す。監視期間における計測値の分布が、 H_0 に基づく分布と H_1 に基づく分布のどちらに近いかによって、要求精度範囲を超えたドリフト発生の有無が判定される。計測値が二つの分布のどちらに近いかを表す指標が対数尤度比である。k 番目の計測値 $\gamma(k)$ が得られたとき、k 番目の対数尤度比 $\lambda(k)$ は次の式で計算される。

$$\lambda(k) = \log \frac{P(\gamma(k) | H_1)}{P(\gamma(k) | H_0)} \dots\dots\dots ①$$

ここで、

$P(\gamma(k)|H_0)$: 仮説 H_0 の基で $\gamma(k)$ が得られた確率

$P(\gamma(k)|H_1)$: 仮説 H_1 の基で $\gamma(k)$ が得られた確率

正規分布に従うという仮定により、 $\lambda(k)$ は次の様に展

開される。

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + \frac{(a_1 - a_0)}{\sigma^2} \left\{ \gamma(k) - \frac{1}{2}(a_1 + a_0) \right\} \dots\dots\dots ②$$

すなわち、 $\lambda(k)$ は k 番目の計測値 $\gamma(k)$ と、一つ前の $\lambda(k-1)$ から逐次的に計算される。これは、オンラインでデータを収集するアプリケーションに関して、SPRT 法の持つ優れた特質である。

監視期間では、 $\lambda(0)=0$ として判定が開始され、 $\lambda(k)$ が以下に定義される A を超えるか、 B を下回るまで $\lambda(k)$ を逐次計算する。一般に A は正、 B は負である。

$$A = \log \frac{1-\beta}{\alpha} \dots\dots\dots ③$$

$$B = \log \frac{\beta}{1-\alpha} \dots\dots\dots ④$$

ここで、

α : 変動を誤検出する確率

β : 変動の検出に失敗する確率

本研究では α, β は共に 0.001 とした。

$\lambda(k)$ が A を超えた時、変動ありと判定し、 B を下回った時、変動なしと判定する。

Fig.3 は、原子炉狭帯域水位計のデータに対してドリフトを模擬する変化を与えた時の、データの変化 (上) と、データに対応する対数尤度比の変化 (下)を示す。Fig.3 における水位信号は 4 で説明するように、起動試

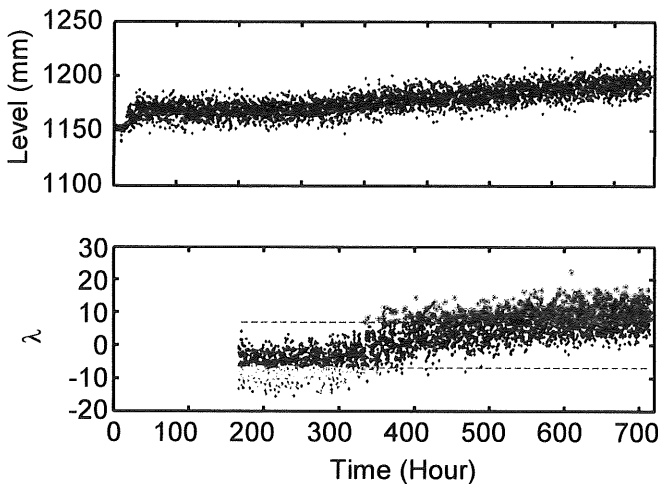


Fig. 3 Drift Simulated Reactor Level Signal and Corresponding Log-Likelihood Values

験中に収集された水位信号を基にしたものである。

(3) 変動の連続検出回数の評価

SRPT 法による判定は(2)の段階で終了する。しかしながら、実プラントの計測データを用いて検討した結果、(2)の段階で変動が判定されることはかなり多い。これはプロセスの一過性の変動によるもので、計器のドリフトを検出するためにスクリーニングする必要がある。

スクリーニングのため、変動を連続検出した回数が予め定めた数 N 以上となった時、次の段階の判定に進む。

(4) プロセス変化に起因する変動の区別

計器ドリフトに起因する計測値の変動とプロセス変化に起因する計測値の変動とを区別するため、当該計器と相関の強い計器の計測値を、確認用計測値として(1)から(3)と同様の方法で変動を検出する。そして、確認用計測値と異なる変動、例えば確認用計測値に減少が検出され時に、当該計測値に増加が検出された時、計器ドリフトが発生したと判定する。

3.1 プロセス変動のある計測値

次にプロセス変動のある計測値に適用する場合の変更点について説明する。ここでプロセス変動とは、計器の計測する真の値が変動することを指す。BWR 型原子力発電プラントでは、ドライウェル(D/W)内部と外部の差圧を複数の差圧計により、D/W 圧力として計測する。D/W 圧力は外気圧との差であるから、外気圧の変

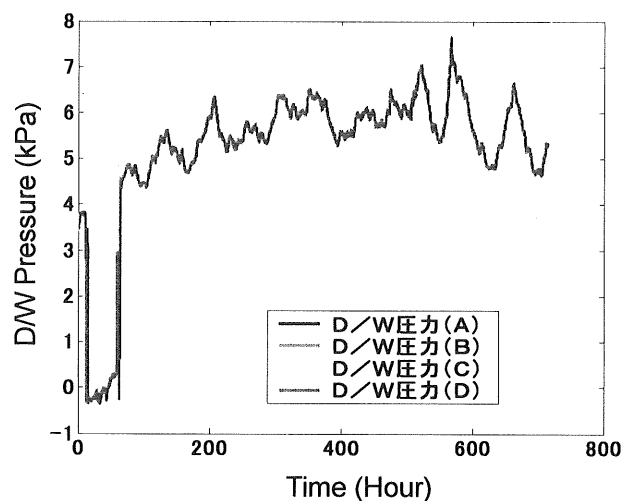


Fig.4 Trend Graphs of four D/W Pressure Readings

化により変動する。Fig. 4 に起動試験中に実プラントで計測された D/W 圧力の変化を示す。D/W 圧力は、A, B, C, および D の 4 つの差圧計で計測されている。D/W 圧力の要求精度は計器のフルスケールの 0.7% であるが、実際には peak-to-peak でその十倍以上の変動がある。

しかしながら、同時に 4 つの D/W 圧力がほぼ同じ変化を示すため、グラフ上では重なっていることも見て取れる。そこでこのケースに対しては、(2)対数尤度比による変動の検出を、計測値そのものではなく、監視対象となる計器の計測値と、他の三つの計器の計測値の平均との差に対して適用する。D/W 圧力に関しては、差圧計 A の計測値と、差圧系 B, C, および D の計測値の平均値との差である。

また、計器が多重化されていない場合は、関連の高い計測値からのモデル推定値を計算し、これと計測値の差に対して変動を検出する。

4. 評価

開発した技術の有効性を確認するため、BWR 型原子力発電プラントの起動試験中にプロセス計算機が収集した実プラントの計測データを用いた評価を行った。計測データには、原子炉、タービンの主要系に加え補器系が含まれる。対象となる計器の種類は、流量計、圧力計、および温度計を含む。

4.1 評価方法

起動試験中のデータは、1585 個の計器に関するもので、約 1 ヶ月間に亘り、10 分周期で収集されたものである。計器は校正されており、また期間も 1 ヶ月と短いため、収集された実プラントデータでは、計器ドリフトの心配はない。そこで、実プラントデータに計器ドリフトを模擬した変化を加え、本技術を適用した場合に検出できるドリフトの大きさを評価した。

4.2 評価結果

評価した 1585 個の計器のデータ中で 1584 個について要求精度範囲を超える計器ドリフトを検出できた。例として、原子炉水位に対しては、フルスケールの 0.35% のドリフトを検出できた。

4.3 考察

3 で説明したように、変動の大きな計器に対しては、計器ドリフトに起因する計測値の変動とプロセス変化に起因する変動の区別が重要である。どの程度区別できるかは、対象となる計器の計測値と、確認用に使用される計器の計測値との相関の強さに依存する。

実プラントデータによる評価は、可能な限り関連の高い確認用計器を探し出して行なった。重要度の高いプロセス値は、複数の冗長化された計器によって計測される。冗長化された計器の計測値は互いに相関が高いため、確認用計器として使うことで、計器ドリフトに起因する計測値の変動とプロセス変化に起因する変動を適切に区別できる。

計器ドリフトの検出が出来なかった 1 個の計器は、確認用の適当な計器が見つからない、システムの中で孤立した計器であった。この信号についても、必要に応じて確認用の計器を設置すれば、要求精度範囲を超える計器ドリフトの検出が可能となると考えられる。

5. 結言

本報告では、計器の計測値から統計的な手法の一つである SPRT 法を用いて計器の状態を監視し、ドリフトを検出する技術について説明した。起動試験中にプロセス計算機が収集した実プラントデータに計器ドリフトを模擬した変化を加え、検出できるドリフトの大きさを評価した結果、要求精度範囲を超える計器ドリフトはほぼ全て検出できることを確認した。

今後、実用化に向け、実機データを用いたより広い検証を行ないたいと考えている。

参考文献

- [1] NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, May, 2008.
- [2] 中溝高好、秋月影雄、添田 喬、“システムの統計的故障検知法”、計測と制御、Vol.18, No.6, 1979, pp.471-480.