自己回帰モデルを用いたガス絶縁開閉装置(GIS) 部分放電検出法の開発

正員 犬 島 浩 (三菱電機)
正員 榊 井 健 (三菱電機)
正員 前 川 洋 (三菱電機)

Development of Partial Discharge Detection Method Using an Auto-Regressive Model in Gas Insulated Switchgears (GIS)

Hiroshi Inujima, Member, Takeshi Masui, Member, Hiroshi Maekawa, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Gas insulated switchgears (GIS) are important equipment in electric-supply stations for that advanced techniques for safety and maintenance are required. So, we started developing a system that can automatically monitor and diagnose a GIS in service. This article focuses on some problems concerning insulating functions of GIS to discuss a method of signal processing for partial discharge detection and position identification. For sensors, potential detectors were installed on flanges of the GIS. Focusing on the potential fluctuations measured by these detectors, we created an auto-regressive model for potential fluctuation in a state without any partial discharge. This model is called a normal state model. Difference was found between potential fluctuations measured during partial discharge and those of the normal state model. The index of whiteness test method of the residual random process is a useful parameter for representing this difference and we found that using this allowed detection of partial discharge that could not be found at normal potential levels. These results mean bright prospects for manufacturing a monitoring system that can detect deterioration in GIS insulation with a high sensitivity in an early stage and that also operates on-line.

キーワード：GIS，部分放電，信号処理，異常診断，自己回帰モデル，検定

1. はじめに

エネルギー源として電力へ依存する割合が個人の生活や社会環境において増大し、電力の供給信頼性および質的改善に対する要求がいつそう高まっている。また、高度情報社会への進展による稼働中の設備事故の未然防止や、事故時の早期復旧に有効なシステムの要請も高まっている。

こうした背景から、変電所設備の異常早期発見および保守技術は一つの重要な課題といえる。現在は変電所設備の品質管理が徹底され信頼性が向上し、ほとん

ど故障しないという技術的背景があるうえに、特に重要な系統は多重系で構成され万全の措置がなされている。また、定期点検などの実施により、設備の性能確認および予防保全がされており、その効果も大きい。それでも、運転中にシステムとして機能喪失までには至らないが、設備の故障発生は皆無ではない。トリップなどが発生し機能喪失するとシステム全体に重大な影響を与える設備では、極力運転中の故障発生を回避したいのは当然である。これらの故障の発生要因を早期に検知し除去することで、設備の信頼性向上、稼働率向上を図る必要がある、大きな要請がある。

本論文では、変電所設備のなかで一つの重要な要素設備であるガス絶縁開閉装置 (GIS) を診断対象として選定している。GIS の内部異常は以下の監視対象に大別できる。

- (1) GIS 内部の絶縁異常
- (2) 導体接触部の通電異常
- (3) 遮断器などの開閉異常

これらの異常診断手法は、種々研究開発が進められているが、このなかで GIS 内部の絶縁異常に着目した。これは万一絶縁破壊を伴う故障が発生すると、復旧に多くの時間を要し系統運用にも重大な影響を与える特性を考慮した判断である。このことをふまえ、GIS の部分放電現象に診断対象を限定した。本論文では、部分放電発生から絶縁破壊に至るまでにはある程度時間が必要なことから、少ない検出器で確実に部分放電を高感度で早期に検知する診断法と位置標定について検討した。微少な部分放電検出が目的ではなく、あくまでも絶縁破壊阻止を目的としている。

2. GIS の絶縁診断技術の現状⁽¹⁾

GIS の部分放電を検出する手法として、電気的に検出するものと、機械的に検出する方法が開発されている。このほか、部分放電に起因する SF_6 ガスの分解生成物を検出する手法も報告されている。

〈2・1〉 電気的部分放電検出 GIS 内部で部分放電が発生すると、GIS 接地線に高周波電流が流れるのを検出する接地線電流法、絶縁スペーサに設置された電極と高電圧導体間の静電容量を利用した手法が紹介報告されている。GIS 中に部分放電が発生すると、接地構造物に急峻なパルス電流が流れる。このような高周波電流が流れると接地構造物の近傍にパルス波形に

近似した微少な電位差が発生する。これを直接測定する手法も提案されている。また、GIS 内部に発生した部分放電パルスが GIS 内部を進行波として伝搬すると、絶縁取付け部などの電気的インピーダンス不連続部分に電位差が発生する。これをとらえる手法も提案されている。

〈2・2〉 光学的部分放電検出 部分放電に起因する発光現象を検出する手法である。光電子増倍管により、光学窓を GIS に設置して内部の放電検出やホトトランジスタによる検出法が提案されている。

〈2・3〉 その他部分放電検出 部分放電に起因する振動を計測する手法⁽²⁾ である。GIS の外壁にマイクロフォンや加速度計を取り付けて内部の振動を計測し、信号は平均化処理を行って感度を向上させている。GIS 内部の異物検出にも有効であるとの報告もされている⁽³⁾。また、GIS 内部で長期間部分放電が発生すると SF_6 ガスが分解し、 SF_4 、 SOF_2 、 HF が生じる。これを検出するための簡易試薬やガスクロマトグラフィーを用いた装置が開発されている⁽⁴⁾。

3. 部分放電実験

図 1 に示す 550 kV の GIS を用いて導体とタンクシース間にギャップを設けて、部分放電の模擬実験を実施した。部分放電を発生させたのは図 1 の S 点であり、放電電荷量は 500 pC である。タンクフランジ部分に電位を観測するための銅板を取り付けてある。これを部分放電センサと呼び、図 2 に概要を示す。部分放電センサは GIS の 4 箇所を設置されており、図 1 の A、B、C、D に示した。

部分放電センサで検出された信号はデータ収集装置とトリガリング装置に接続されている。定められたし

図 1 550 kV GIS 部分放電センサ取付け位置

Fig. 1. Mounting position of partial discharge sensors on 550 kV GIS.

きい値を超えると、データ収集装置にトリガをかけ、前後のデータを記憶するよう設計されている。データ収集装置のサンプリング時間は1nsで、トリガ前後各々約8,000点の記憶が可能である。データ収集装置は、計算機と接続されており、最終的にはフロッピーディスク(FDD)にデータは記憶される。図3にデータ収集の概念図を示した。

部分放電発生時におけるA, B, C, D各計測点

図2 部分放電センサ概念図

Fig. 2. Schematic diagram of the partial discharge sensor.

の電位変動を図4に示す。部分放電発生点Sから0.8mに設置されたA点のセンサにおいては電位変動幅が大きくバックグラウンドに対して100倍程度大きいことがわかる。一方、S点から16.4m離れたB点での検出器にはほとんど変化が現れず0.2μs遅れてバックグラウンドに対して10倍程度大きくなっていることがわかる。更にS点から20.8m離れたC, D点での検出器にはほとんど変化が見られない。

4. 部分放電検出法

図1のA点で観測された電位変動であれば単に大きい値で部分放電を検出可能である。一方、B, C,

図3 データ収集システムの概要

Fig. 3. Schematic diagram of the data acquisition system.

図4 部分放電による電位変動

Fig. 4. Potential fluctuations under partial discharge condition.

図 5 電位変動のパワースペクトル密度

Fig. 5. Power spectral densities of potential fluctuation.

D点で観測された電位変動は単純なレベルに関するしきい値では検出できない。そこで電位変動の統計的な性質を検討し、部分放電が存在しない場合のバックグラウンドのモデルを作成し、これを基準とする検定問題として取り扱うこととした。

D点で観測された部分放電なし(図4の7.1 μs 前1,000点のデータ)と部分放電発生時(図4の7.2 μs 後1,000点のデータ)のパワースペクトル密度⁽⁴⁾⁽⁵⁾を図5に示す。パワースペクトル密度の形状には、部分放電の有無による違いが見られ、放電発生時に80 kHz付近にピークが見られる。一方、電位変動レベルは部分放電発生時と部分放電なしの場合ほとんど変化せず、125 mV付近で推移しており、エネルギーレベルでの部分放電の区別は困難であることがわかる。

更に、部分放電がない場合の電位変動について再現性を評価した。このために、観測された電位変動の時系列値 y_m に対して(1)式で表現される自己回帰モデル(Auto-Regressiveモデル; ARモデル)⁽⁴⁾⁽⁵⁾を導入し、異なる時点でのARモデル推定結果の同一性を評価した。これは、モデルの次数 M とARパラメータ $(a_1, a_2, \dots, a_M)$ の比較で実施可能である。

$$y_m = \hat{y}_m + \varepsilon_m$$

$$= \sum_{i=1}^M a_i y_{m-i} + \varepsilon_m \dots\dots\dots (1)$$

$\hat{y}_m$: y_m の予測値

ここで、ARパラメータは、正規性定常白色雑音を入力とする定係数線形フィルタの係数と同義である。異なる測定日に繰り返し測定した部分放電がない電位変動のデータ3ケースの評価を試みた。次数 M は赤池のFPE法により20と定められた⁽⁴⁾。最小二乗法によりそれぞれのデータに対し求めたARパラメータの値は表1のようである。再現性の評価はモデルの安定性も評価できる。すなわち、部分放電がない場合、観

表 1 同定されたARパラメータ

Table 1. Identified auto-regressive parameters.

ARパラメータ	実験ケース1	実験ケース2	実験ケース3
a_1	-0.16	-0.29	-0.20
a_2	-0.03	-0.08	-0.10
a_3	-0.04	0.02	0.03
a_4	-0.15	-0.24	-0.18
a_5	-0.12	-0.12	-0.09
a_6	-0.09	-0.17	-0.13
a_7	-0.08	0.04	-0.00
a_8	-0.09	-0.08	-0.04
a_9	0.08	0.00	0.00
a_{10}	-0.15	-0.15	-0.13
a_{11}	-0.18	-0.08	-0.05
a_{12}	0.06	-0.06	-0.05
a_{13}	-0.00	0.13	0.07
a_{14}	-0.06	0.00	-0.03
a_{15}	0.05	0.07	0.02
a_{16}	-0.03	0.01	-0.10
a_{17}	-0.01	0.04	0.01
a_{18}	-0.08	-0.09	0.03
a_{19}	-0.02	0.05	0.04
a_{20}	-0.08	0.01	-0.06

測されたデータから決定される自己回帰モデルの次数およびARパラメータが変化しないことを検証できる。次数は3回の測定とともに20次が最適という結果が得られている。

ARパラメータについては、表1にも示した。3回の測定で得られたARパラメータ値は、次数が大きくなるにつれて極端に大きくなったりせず、おおむね ± 0.2 内のゼロ近傍の値で推移していることがわかる。これは過去の観測値の影響が小さいことを示しており、 $1/f$ 雑音に近い性質を有していると考えられる。以上の観点で、モデルの安定性はほぼ保証されている。

電位変動波形はパワースペクトル密度にも示したように白色ではない。正常時の電位変動波形の自己回帰

モデルを作り、そのモデルによる予測値と観測対象である実測値の差（残差列）が白色である場合、観測対象は正常と決めた電位変動と統計的に同一とみなせる。すなわち、白色性がくずれた場合、正常時とは違ってくる。その概念を図6に示す。

白色性の検定指標としては、残差列の自己相関関数と時間軸で囲まれた面積で評価する。白色の場合、面積はほぼ0となり、相関が大きいほど面積が大きくなることを利用している。

さて、安定なモデルが求められているから電位変動

を予測することができる。

$$\hat{y}_m = a_1 y_{m-1} + a_2 y_{m-2} + \dots + a_M y_{m-M} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\hat{y}_m$: y_m の予測値

$M+1 \leq m \leq N$, N : 全データ数

一方、実測値も観測できることから実測値と予測値の差 ε_m を求めることができ、これは通常残差と呼ばれている。

$$\varepsilon_m = \hat{y}_m - y_m \quad (m = M+1, M+2, \dots, N) \quad \dots\dots\dots (3)$$

この残差列が白色であれば、想定しているモデルで適合していることを示している。ここで、白色性を評価する指標として ε_m の自己相関関数 $\phi_k(m)$ を計算する。ここで、

$$\phi_k(m) = \frac{1}{L} \sum_{h=0}^{L-1} \varepsilon_{m-h} \varepsilon_{m-h-k} \quad (k = 1, 2, \dots, \tau_{\max}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、自己相関関数 $\phi_k(m)$ の時間軸と相関関数で囲まれた面積を計算し、それを白色性検定指標とする。理論的には時刻0のとき、相関関数は1で、ほかは0

図6 検出方法の概念
Fig. 6. Schematic diagram of the detection method.

図7 部分放電における白色性検定指標
Fig. 7. Whiteness test method indexes under partial discharge condition.

であるから面積が 0 に近いほど白色といえる。

$$I(m) = \sum_{k=1}^{m_{\max}} |\phi_k(m)|^2 \dots \dots \dots (5)$$

実際には白色性検定指標はある分散をもっており、白色であると判定する範囲を分散の 3 倍 I_{limit} などに設定する。

$$(O <) I(m) \leq I_{\text{limit}} \dots \dots \dots (6)$$

5. 白色性検定指標の部分放電に対する感度評価

第 4 章の (5) 式で導入した白色性検定指標の適用結果を図 7 に示す。図 1 の A, B, C, D 各点において測定された電位変動に適用した。この結果、きわめて感度良く部分放電が検出されていることがわかる。部分放電がない区間の白色性検定指標の分散値を計算しその 3 倍を超えた時間を部分放電発生を検知した時間とすると、A, B, C, D 各点での検出時間を求めることができる。また、部分放電発生点 S と A, B, C, D 各点との距離は

S-A 間 0.8 m

S-B 間 16.4 m

S-C 間 20.8 m

S-D 間 20.8 m

であり、A 点で観測された時間と B, C, D 各点で観測された時間差は

A-B 間 71 ns

A-C 間 98 ns

A-D 間 98 ns

である。距離と時間の比をそれぞれ計算すると

距離：

$$\frac{A-B \text{ 間}}{A-C \text{ 間}} = \frac{15.6 \text{ m}}{20.0 \text{ m}} = 0.78$$

時間：

$$\frac{A-B \text{ 間}}{A-C \text{ 間}} = \frac{71 \text{ ns}}{98 \text{ ns}} = 0.72$$

とよく一致していることがわかる。ただし、伝搬速度は 0.22 m/ns 程度と評価され、他の手法で測定された 0.27 m/ns 程度に比べ小さな値になっている⁽⁶⁾。このように部分放電現象を感度良く検出でき、GIS に設置された検出器の位置と各々の時間差が計測できることから、部分放電場所の標定も可能であることがわかった。

6. おわりに

雷などの自然現象や外部からの雑音など部分放電に起因しない電位変動に対しては、各計測点で観測され

た発生時間ベースとしたルールを設定して部分放電現象との区別や、想定される雑音のみをあらかじめ除去しておくなどの工夫⁽⁷⁾が必要であろう。

検出感度は部分放電の位置および放電電荷と検出器の位置関係に依存する。本論文では、通常行われているレベルによるしきい値で、検出できないほど減衰した部分放電現象に起因する電位変動の変化の検出法を報告した。また、GIS の構成に依存するが、実用的には 4 点程度の検出点を設置することで、おおよその部分放電位置の標定ができる可能性を示した。この意味で高感度測定の実現がなされていると考えられる。

放電電荷量が小さくなると、部分放電の位置が検出器の近傍（数十センチメートル）ならば検出可能なことはわかっているが、複数のフランジや断路器を経た部分放電に起因する電位変動の伝搬に関しては、今後の検討課題である。検出可能な放電電荷量の評価を引き続き検討する予定である。現在、部分放電検出システムとして製作し、実際の開閉所で運用を開始している。これを通じてシステムの性能を向上させるとともに、電力の供給信頼性および質の改善に対する要求に応え、稼動 GIS の事故未然防止や、事故時の早期復旧に有効なシステムの確立を図る所存である。

(平成 4 年 8 月 24 日受付, 同 4 年 11 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 電力設備の運転中絶縁診断技術：電学技報（II 部），No. 402（平 4）
- (2) N. Okuta, et al.: "Pattern recognition of vibration in metal enclosures of gas insulated equipment and its application", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-100, No. 6 (1981)
- (3) Y. Fujimoto, et al.: "Operation of an on-line substation diagnosis system", *ibid.*, 3, No. 4 (1988)
- (4) 赤池・中川：ダイナミックシステムの統計的解析と制御（昭 47）サイエンス社
- (5) 得丸・添田・中溝・秋月：計数・測定（昭 57）培風館
- (6) 電気協同研究, 44, No. 3, 27 (1988)
- (7) 犬島：「信号処理によるノイズ除去はどこまで可能か」, エレクトロニクス, 37, No. 10, 31（平 4）

犬 島 浩（正員）

昭和 50 年 3 月北海道大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社。現在、同産業システム研究所制御システム開発部第 1 グループに所属。プラントの診断・制御に関する研究に従事。工学博士。平成 2 年電気学会論文賞受賞。日本原子力学会、計測自動制御学会、情報処理学会会員。

樹 井 健 (正員)

昭和 61 年 3 月徳島大学工学部電気工
学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社。
伊丹製作所において、変電機器監視シス
テムの開発に従事。

前 川 洋 (正員)

昭和 47 年 3 月大阪府立大学大学院修
士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入
社。現在、同伊丹製作所に勤務。主とし
て、変電機器監視システムの開発に従

事。シミュレーション学会会員。