GIS 部分放電位置標定システムの開発と 実フィールドへの適用

正員 前川 洋 (三菱電機) 正員 梶井 健 (三菱電機)
正員 亀井 光仁 (三菱電機) 正員 宮本 憲繁 (中部電力)

Development and Application in Actual Switching Station of GIS Partial Discharge Locating System

Hiroshi Maekawa, Member, Takeshi Masui, Member, Mitsuhiro Kamei, Member (Mitsubishi Electric Corp.)
Norishige Miyamoto, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Gas-Insulated Switchgear (GIS) has very high reliability compared to Air-Insulated Switchgear (AIS). But any fault in it may once occur, the impacts due to it for modern society is vast and serious. The needs of predictive maintenance for GIS is on the rise, especially development of partial discharge sensor is strongly requested.

We have been developed the GIS partial discharge locating system whose advantages are simple construction, the least number of sensors, easy maintenance, and high reliability.

This paper describes about the basic experiment to develop the system, the principle of location of partial discharge source, application to the actual switching stations, Chubu Electric Power Co., Inc. TOYONE SW/S and consideration about the field data. We used the external type partial discharge sensor. The location of partial discharge can be calculated from the travel time differences between the partial discharge source and sensors. The data obtained in the SW/S shows the suggested algorithm for partial discharge judgment and location of partial discharge source is useful and function of external noise reduction effectively acts as we expected.

キーワード: GIS, 保守支援 (予測保全), 部分放電, センサ, 位置標定

1. はじめに

高度情報化社会の進展に伴い、供給電力には高品質が要求され、より信頼度の高い変電設備の構築が求められている。このような状況のもと、ガス絶縁開閉装置 (Gas-Insulated Switchgear, GIS) は気中絶縁変電所の機器に比べて、小型・高信頼性・メンテナンスが容易などの利点をもっているため、最近広く用いられている。しかし課電部分が全て金属の外被で覆われているため、内部の状態を把握するのが困難であり、また万一の地絡時にはその位置標定も難しい。よってGISにセンサを取付けて内部の状態把握を行い、事故を未然に防ぐ目的の保守支援 (予測保全) システムや、万一の事故時に早期復旧を目的とする運転支援システムの適用が盛んになり始めた。

GISの最も重要な機能である絶縁機能が劣化すると内部部分放電が発生し、放置しておくについには地絡・短絡

等の重大事故に至る場合がある。したがって内部部分放電を軽微な段階で確実にを見つけることは非常に重要であり、部分放電センサの研究の進歩にともない、部分放電監視装置のフィールドへの適用が始まっている。本論文では、GIS外部にセンサを設置し、部分放電の有無のみならず位置の標定も可能な性能を持つシステムを開発、中部電力豊根開閉所に適用した結果について述べる。

2. 現状の部分放電検出方式

現状の部分放電センサは、部分放電にともないGIS外被に引き起こされる微小機械振動を検出する機械式⁽¹⁾、GIS内部に発生する高周波信号を検出する電気式⁽²⁾およびGIS内部のSF₆ガスの分解ガス (HF等) を検出する化学式⁽³⁾に大別できる。

機械式は外部から手軽に測定できる利点をもつが、GISの形状や周辺環境・天候等の影響を受けやすい。また機

機械振動の伝搬減衰が大きいことから、位置の標定には有効であるが大規模GISには膨大な数のセンサが必要となり、オンラインのシステムを構築するには不適である。

一方、電気式はGIS内部に発生する、数MHzから数GHzにおよぶ高周波信号をGIS内部または外部に設置したセンサで検出する。センサをGIS内部に設置した場合、原理的に周辺ノイズの影響を受け難く感度が高くとりえる利点をもつが、既設GISには設置困難であり、センサ故障時はGISのガス処理をしないと復旧できない欠点がある。また電気信号は機械振動に比べ伝搬減衰が少ないため、センサ数は機械式より削減できるが、逆に位置の標定が困難である。よってGIS外部に容易に設置でき、しかも位置標定ができるシステムの構築が望まれている。

また、化学式はガスの抜き取りが必要であり、感度も上記二方式に比べて劣るが、確度が高く部分放電の最終判定のツールとして用いられている。

3. 検出原理

GIS内部の部分放電により発生した電磁波はGIS内部を伝搬し、その一部がGIS外被の不連続部分である、絶縁スペーサを挟んだフランジ部から外部に漏洩する。この電磁波は、フランジが絶縁取付け（通電用シャントがない）の場合にはフランジ間電位差として検出でき、短絡取付け（通電用シャントがある）の場合には絶縁スペーサ近傍にアンテナを設置することで、フランジとボルトに囲まれた空間からの漏洩分を検出できる。

図1にアンテナによる漏洩電磁波検出の基礎試験形態を

図1 工場における基礎試験形態

Fig.1. Configuration of the fundamental experiment

図2 基礎試験によるアンテナの検出波形

Fig.2. Example of detected waveform

示す。アンテナは本開発において制作したループコイルで、GIS側に開口を設けた鉄製の箱の中に箱の開口面とコイルの開口が平行になるように収納し、GISに絶縁取り付けをしている。供試器は500kV GISを用い、P点で針を用いた中間電極による部分放電を発生させて、アンテナの感度ならびに絶縁スペーサ周辺のGIS長手方向の電磁波強度の角度分布を調べた。図2に検出波形例を示す。使用したアンテナの共振周波数1GHzに対し、検出信号の周波数は500MHz程度であり、信号の波形は電磁波の挙動を忠実に反映しているといえる。なお、波形の中では第1波が部分放電の情報をもっており、第2波以降はGISタンクの形状に依存する反射等の影響があるため、以下の試験では信号第1波のピークを評価した。

図3に放電電荷量を一定にして、アンテナの開口をスペーサに向けたまま、スペーサを中心とした円弧に沿って回転移動させたときの、信号強度分布を示す。これはスペーサ周辺の電磁波強度分布を示すもので、スペーサの真上が最大感度を示した。これはアンテナがスペーサの開口部から漏洩する電磁波を検出している根拠を示すものである。

図4にこの最大感度位置における検出感度特性を示す。

図3 漏洩電磁波の強度分布

Fig.3. Intensity distribution of leakage electromagnetic waves

図4 アンテナの検出感度

Fig.4. Sensitivity of antenna

なお、電荷量は別途 E R A (English Research Association) 法にて校正しており、この結果 0.6 mV/pC 程度の比例出力が得られた。

G I S 内部の部分放電の位置標定は、信号の大きさや減衰から求める方式も提案されている。⁽⁴⁾しかしセンサの設置位置によっては、部分放電発生位置より遠い方が検出信号レベルが高かったり、第2波以降が歪変していることがある。よって正確さの面から、G I S に複数のセンサを設置し、部分放電発生位置から各センサまでの電磁波の伝搬時間差から位置を求める方式を選定した。これは電磁波の第1波は、センサまでの最短ルートをとっていることによる。また後述するようにこの方式を選ぶことにより、外部ノイズ除去のアルゴリズムが容易化できる。

4. システムの構成

図5に部分放電位置標定システムの構成を、図6に豊根開閉所におけるその配置を示す。G I S は2重母線構成で、センサは各母線毎にA, B, C, D 1箇所ずつ、合計4箇所の絶縁スペーサ横に設置した。各センサはA, BおよびC, Dを対として、2台のデータ収録装置に接続されているが、信号の減衰を少なくまた伝搬時間を同じにするため、

図5 部分放電位置標定システムの構成
Fig.5. Schematic diagram of PD locating system

図6 実開閉所におけるシステムの配置
Fig.6. Arrangement of system in actual SW/S

高周波用の同軸ケーブルを極力短く、同じ長さにして用いている。また全箇所のセンサは、トリガリング装置にも同様の配慮をして接続している。トリガリング装置から2台のデータ収録装置へは、データを収録するタイミング信号を送るため、同じ長さの光ファイバを接続している。これらの装置は全てG I S 近傍に設置されているが、位置標定用の演算装置だけは本館建屋内に設置され、データ収録装置ならびにトリガリング装置と光ファイバにより接続されている。

以下にこのシステムの動作を説明する。部分放電により発生した電磁波はG I S 内部を伝搬し、部分放電発生位置に近い順に各センサに到達する。センサで検出された信号は、高周波用の同軸ケーブルでトリガリング装置および2台のデータ収録装置に入力される。データ収録装置はセンサからの入力信号を常時 1 ns でサンプリングしており、波形データは 16 K バイト/チャンネルのメモリに上書きさせている。トリガリング装置では、入力された信号が1つでもしきい値を越えた場合に、2台のデータ収録装置に対し同時にサンプリングを停止させるためのタイミング信号を送出する。データ収録装置では次のサンプリング開始要求が来るまで、この時の波形データを保持する。

一方、位置標定用演算装置はトリガリング装置とデータ収録装置の状態を常にモニタしており、トリガリング装置がタイミング信号を送出したことを確認すると、2台のデータ収録装置が保持している波形データを自身に転送させる。続いてそれぞれの波形から部分放電による信号の第1波の立上り時刻を求め、その時間差から位置を標定する。ノイズを含んだ波形から信号の第1波の立上りを精度よく検出するため、信号処理手法として自己回帰モデルを用いた。⁽⁵⁾この手法によると、検出信号にトリガリング装置のしきい値より小さいものがあったとしても第1波の立上りを検出することが可能であり、単純なしきい値処理に比べて感度が向上したことになる。また演算装置はシステム全体の管理・制御として、各装置の初期化や健全性確認の他、トリガリング装置のしきい値やデータ収録装置の各種パラメータを設定したり、判定結果の表示や保存、上位マンマシンへの出力等も行っている。

5. 位置標定のアルゴリズム

伝搬時間差による位置標定のためには、電磁波の伝搬速度を明確にする必要がある。この試験には供試器がある程度の長さを必要とするため、運開前の豊根開閉所の実G I S を使用した。図7に試験形態を示す。実G I S では実際に内部部分放電を起こすことはできないので、試験では接地開閉器E S 1の接地端子を開放し、ここから波高値 10 V 、パルス幅 10 ns のパルスを入力して各センサへの伝搬時間差を測定した。伝搬速度はスペーサの比誘電率が大きい見かけ上光速よりも減速し、測定では光速の 90% すなわち $270 \text{ m}/\mu\text{s}$ となった。⁽⁶⁾

図8に近接するC, Dでの検出信号の波形例を示す。波

図7 実開閉所における試験形態

Fig.7. Configuration of the experiment in actual SW/S

図8 接地開閉器からの模擬入力による検出波形
Fig.8. Detected waveforms using simulated pulse

形の第1波の立上りはDがCより9 ns 早く、これは2.4 mに相当する。ES1からの距離はCがDより2.5 m 遠く、このように接近した母線であっても、伝搬時間差による標定が可能である。またこの図から解るように、信号の振幅比較による位置標定は困難である。なお、図中の時間差は全て波形を自己回帰モデルで自動処理して得られた立ち上がり点間の時間差を自動計測したものである⁵⁾。

今回用いたアルゴリズムでは、1個のセンサへの信号入力の継続性を見るのではなく、4個のセンサの検出信号から伝搬時間差を算出、位置標定を行い、さらにこの動作を繰り返し行った結果が継続して同じであるときに始めて部分放電であるとの判定を行う。これにより断路器操作等の散発的ノイズは除去され、さらに気中放電等による限られたセンサへのノイズ入力は、検出されても位置標定ができないことで除去される。したがって位置標定を繰り返すことは、強力なノイズ除去機能が自動的に働いていることになる。位置標定演算は、最短で2分半に1回行っている。

6. 実開閉所での適用結果

このシステムは平成5年6月に豊根開閉所に設置、運用を開始した。調整試験時にGISの断路器を操作して、断路器サージを検出した例を図9に示す。この試験はGIS母線を充電後、図7に示す断路器DS1を開操作したもので、4個のセンサは信号を確実にとらえている。位置標定用演算装置による波形の第1波の立上り検出は、人間の目で認識するのと同様に正しく行われており、実際の断路器

図9 断路器操作による検出波形

Fig.9. Detected waveforms due to DS operating

図10 実開閉所のノイズ例

Fig.10. Examples of BGN in actual SW/S

の位置と標定結果の差はわずか0.6 mであった。

またトリガリング装置に設定したしきい値以上の信号が入力された場合、演算装置はその波形を一定量保存している。一例を図10に示す。信号は母線を挟んで2.5 mしか離れていないCとDのみほぼ同時に入力され、GISの長手方向に約7.5 m離れているAとBには観測されていないことや、信号そのものが単発で繰返しが観測されなかったことから、アンテナにGIS外部から侵入したノイズと判断された。

外部ノイズの発生頻度は、トリガリング装置のしきい値にも依存するが、その設定を40 mVにした場合1日当たり40回程度であり、これらノイズ環境にあっても部分放電検出の誤警報が出力されていないことから、本システムのノイズ除去機能が実フィールドで有効に動作することが確認された。本システムは現在およそ100 pC程度の実用検出感度を持つ部分放電監視システムとしてフィールド稼働中である。

7. 結論

本論文では、GIS内部の部分放電検出とその位置標定を行うシステムについて、実際の開閉所での運用結果をまじえてその性能を明らかにした。その内容を要約すると、次のようである。

(1) GIS 内部の部分放電により発生した電磁波は、絶縁スペーサ部から漏洩し、外部アンテナで検出することができる。

(2) GIS 各母線に設置したアンテナからの信号の立上りを検出することで、伝搬時間差による部分放電の位置標定ができる。

(3) この原理を用いた部分放電位置標定システムを製品化し、中部電力豊根開閉所他に設置した。現在に至るまで、システムは現在およそ 100 pC 程度の実用検出感度を持つ部分放電監視システムとしてフィールド稼働中である。

(4) 実開閉所での運用とデータ収集の結果、位置標定アルゴリズムの外部ノイズ除去の有効性が検証された。

8. 今後の展望

今後はさらにフィールドデータを蓄積、ノイズ除去技術の向上・高感度化を図るとともに、位置標定の高精度化を指向している。また放電要因等とフラッシュオーバーまでの時間関係を明らかにする事により、一層確度の高い GIS の絶縁診断システムの構築をめざして研究を進めていく予定である。

(平成 8 年 2 月 1 日受付、同年 6 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 武井秀実・興梠秀隆・広兼昇一・細川育雄・大上瑞枝：「可搬形絶縁診断装置」，平元電気学会全大，No.1386
- (2) 亀井光仁・宮下信・井波潔・榊井健・西田智恵子・前川洋・佐久間秀一：「部分放電センサの開発」，平 6 電気学会全大，No.1474
- (3) 山内四郎・高橋久光・亀井光仁・前川洋・山本治：「固体電解質を用いた SF₆ 分解ガスセンサ」，平 7 電気学会全大，No.454
- (4) 岡島行隆・友江英司・佐藤義則・山田洋・青木泰雄・蛭田光博・石川俊雄・田川承位：「内蔵電極を用いた GIS の絶縁監視装置の開発」，平 5 電気学会 B 部門，No.596
- (5) 犬島浩・榊井健・前川洋：「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」，電学論 B，113，1292～1298(平5-11)
- (6) 宮本憲繁・榊井健・前川洋・小林誠治・犬島浩：「GIS 部分放電位置標定システムの開発(その 3)」，平 5 電気学会 B 部門，No.595

前川 洋

(正員)1946年12月13生まれ。72年3月大阪府立大学大学院電気工学科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。主として電力制御技術の研究をへて、変電機器監視システムの開発・設計に従事。現在、伊丹製作所電力交通変電システム部監視装置設計課課長。93年電気学会進歩賞受賞。

榊井 健

(正員)1964年4月1日生まれ。86年3月徳島大学電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。主として変電機器監視システムの開発・設計に従事。

亀井 光仁

(正員)1951年2月17日生まれ。71年3月奈良高専電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。主として計測技術の研究をへて、変電機器監視装置の開発・設計に従事。計測自動制御学会、応用物理学会・日本光学会会員。

宮本 憲繁

(正員)1948年10月6日生まれ。67年3月岡崎工業高校電気科卒業。同年中部電力(株)入社。主として変電所の設計・建設に従事。現在、本店工務部発変電課 副長。