

GIS内部電磁波の第一波波高値と累積波形指標を用いた部分放電識別

正員 蔦田 広幸 正員 長田 典子 正員 宮下 信 正員 亀井 光仁
 正員 井上 悟 非会員 高嶋 和夫 正員 宇佐美 照夫 (三菱電機)

Detection of Partial Discharge

Using First Peak Height and Cumulative Wave Parameter of Internal Electromagnetic Wave in GIS.

Hiroyuki Tsutada, Noriko Nagata, Makoto Miyashita, Mitsuhiro Kamei,
 Satoru Inoue, Kazuo Takashima, Teruo Usami (Mitsubishi Electric Corporation)

This paper proposes a new method for discriminating partial discharges (PD) from external noises by using the first peak height and cumulative wave parameter of internal electromagnetic waves in GIS. The first peak height and cumulative wave parameter in PD signals are new parameters that are related to the PD charge and the PD-sensor point range. The first peak height-cumulative wave parameter distribution consisting of many PD signals has two characteristics, (1) the distribution shape is on a proportional line and (2) slope of the line is related to the PD-sensor point range. These characteristics were confirmed from measured data of a model GIS. This paper proposes a discrimination method using these characteristics. Simulation results show that this method is effective for discriminating PD from noise signals that originate from various points.

キーワード：部分放電, GIS, 電磁波, SF₆, センサ

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear: GIS) は、電力供給に重要な役割を果たしている。万一、絶縁破壊による事故が発生すれば、電力供給に重大な支障を来すことが予想される。そこで絶縁破壊による事故の予兆現象である部分放電 (Partial Discharge: PD) を常時監視することで未然に絶縁破壊を予知するシステムも適用され始めている⁽¹⁾⁽²⁾。

部分放電は電磁波・音・光・機械的振動等を伴った物理的現象であるため様々な部分放電検出方式が提案されている⁽³⁾。その中の一つに部分放電発生時にGIS内部に放射される電磁波をUHFセンサを用いて測定することで部分放電を検出する方法がある。この方法は微小放電を感度良く検出することが可能であるものの、GIS外部から侵入する電磁波信号も検出するという欠点がある。絶縁診断の信頼性を向上させる上でGIS外部から侵入する電磁波信号と内部部分放電信号との識別が重要な課題となっている⁽⁴⁾。

これまでの部分放電識別における信号処理方式は大きく二つに分けられる。一つは放電信号波形の周波数スペクトラム分布を用いる方法である⁽⁵⁾。スペクトルは波形の特徴を精度良く表現するものの、タンク構造の影響を受けることや、放電源やセンサの設置位置に強く依存す

るため、各GISに対してダミー信号による校正を含むパラメータチューニングが必要である。一方、 $n-q-\phi$ をベースとした処理手法は、タンクの構造や計測系の構成の影響を受けない利点から広く用いられているが、発生頻度の低い部分放電が検出できないことや、電源位相に同期したノイズと部分放電の識別ができないといった問題がある⁽⁶⁾。そのためこれらに代わる新しいパラメータや処理手法の導入が期待されているのが現状である。

我々は、タンク構造や計測系の構成に左右されない波形特徴量として、第一波波高値-累積波形指標分布に着目した。GIS内において発生する部分放電は、特定地点から発生するインパルス現象であり、発生電荷量はバラツキを持っている。従って複数の波形を観測し第一波波高値-累積波形指標分布を作成すると、常に比例直線状に分布するとともに、分布の傾きが部分放電の発生地点特定にも有効な指標となり得るとの知見を得た。

そこで本論文では、部分放電において第一波波高値-累積波形指標分布が比例直線状に分布する原理について説明し、GISを模擬した試験タンクで計測された実測データにより上記現象を検証する。

さらに上記特徴を用いて、複数観測波形の分布形状から、外部よりGIS内部に侵入する電磁波信号と部分放電信号とを識別する手法を提案し、異なる地点から一様でなく発生するインパルス性や連続振動性等の外來伝播ノ

イズとの識別に対して本手法が有効であることを実測データに基づいて示す。

2. 第一波波高値－累積波形指標分布

<2.1>計測対象とセンサ SF₆ガス中の部分放電現象はナノ秒程度の非常に短いパルス現象である。GIS内部に部分放電が発生すると、SF₆ガスを経由して振動が外被に伝わるとともに、数kHz～数GHzの周波数帯域を有する電磁波が放射される⁽⁷⁾。本論文では、GIS内部においてこの放射電磁波を検出する内部UHFセンサを用いて検討を行った。内部UHFセンサの構造は検出電極P1と接地電極P2を薄いギャップで対向させたものであり、電極P1とGIS中心導体間の浮遊容量をC1、センサ内のP1・P2間の容量をC2とした時に、中心導体の電位を1/C1と1/C2で分圧した信号を検出する(図1)。内部UHFセンサにより計測された部分放電信号の一例を図2に示す。

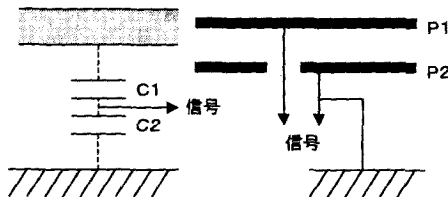


図1 内部UHFセンサ検出原理
Fig.1. Detection principle of UHF sensor.

検出される部分放電信号全体は500nsec程度の信号であり、部分放電発生位置から反射することなく直接センサへ到達した第一波の立ち上がり時間は約1nsecと急峻な波形である。

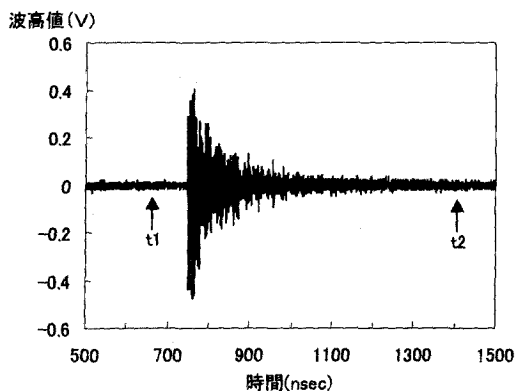


図2 部分放電検出信号例
Fig.2. A detection signal(PD).

<2.2>第一波波高値と累積波形指標 センサで得られた信号波形 $v(t)$ の一波形全体を含む区間 $[t_1, t_2]$ に対して、累積波形指標 E を(1)式で定義する。

$$E = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} v(t)^2 dt} \quad (1)$$

検出信号は発生現象がタンク内で反射・透過を繰り返したものである⁽⁸⁾から、累積波形指標 E は発生現象の電荷量と比例する。つまり、累積波形指標 E は発生現象がセンサに与えた総エネルギーの平方根に相当するパラメータであるといえる。

しかし、実際の発生電荷量を知ることは難しいので、第一波波高値で代用することを考える。第一波波高値とは、バックグラウンドノイズレベル以下にならない程度にトリガレベルを設定し、検出波形においてトリガレベルを超えた第一波目の波形のピークを指す。図3に図2の部分放電信号の先頭部分拡大図を示しているが、図中の先頭波形が第一波波高値に相当する。

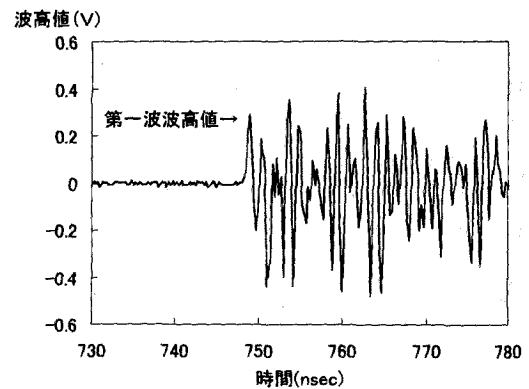


図3 第一波波高値の定義
Fig.3. Definition of the first peak height.

検出波形の第一波は発生現象により放射された電磁波が反射することなく直接センサへ到達したものであり、発生現象をそのまま反映したものである。部分放電現象は単発パルス現象で、そのパルス幅はほとんど変化しないため、発生電荷量は第一波波高値と比例することになる⁽⁹⁾。結果として第一波波高値と累積波形指標は比例する。つまり部分放電では入力を第一波波高値、出力を累積波形指標としたときの関数は、放電源位置・センサ位置・タンク構造・測定系が一定であれば一定の比例関数で記述できる。

部分放電は特定地点において発生している状態でも、その発生電荷量にはバラツキがある。そこで複数回の観測信号で第一波波高値－累積波形指標分布を作成すると、比例直線状に広がりを持って分布することになると予想される。

<2.3>第一波波高値－累積波形指標分布の距離特性

放射電磁波がタンク内を伝播する際に、波形は徐々に減衰するが、高周波成分ほど減衰率が大いことが知られている。特にスペーサを通過する際にはスペーサが一

種のローパスフィルタとして作用するため、波形の高周波成分が大きく減衰する⁽¹⁰⁾。

累積波形指標は、部分放電のインパルス性現象がタンク内で反射・透過を繰り返すことで高周波成分が減衰した波形の重ねあわせを時間積分したものである。相対的に低周波成分の影響を受けたパラメータと解釈できる。一方、第一波は部分放電発生位置から反射することなく直接センサへ到達したものである。累積波形指標と比較して高周波成分の影響を受けたパラメータであるといえる。よって、放電源より離れるにつれて低周波成分の反映である累積波形指標よりも高周波成分の反映である第一波波高値の方が大きく減衰することになる。

そのため、第一波波高値-累積波形指標分布を作成すると、放電源が遠くなるにつれて分布の傾きが大きくなるという性質を持つと予想される。

3.検証試験

<3.1>部分放電試験 第2章で述べた部分放電における第一波波高値-累積波形指標分布の特徴を、実測データにより検証することを目的として、測定1において人工的な放電源を用いた部分放電信号及び無課電時の外来伝播ノイズ信号のデータ解析を行った。また第一波波高値-累積波形指標分布における距離分布特性の検討を目的として、測定2において部分放電を模擬したパルスによる長距離伝播時のデータ収集を行った。

測定の詳細について以下に述べる。

測定1 154kVモデルGIS（単相型：長さ3.7m、シース内径340mm、導体外径125mm、SF₆ガス圧0.5MPa）において、部分放電を表1に示す試験条件により発生させ、その時の放電信号を内部UHFセンサを用いて複数回測定した。また、無課電時にGISタンクに侵入した外来伝播ノイズ信号を内部UHFセンサを用いて複数回測定した（図4）。

内部UHFセンサAまたはBで検出された信号は直流アンプにより25dB増幅した後、デジタルオシロスコープ（センサAは8Gs/s・周波数帯域2GHz、センサBは4Gs/s・周波数帯域1GHz）で単発信号を収集した。

表1 部分放電試験条件

Table 1. Partial discharge experimental conditions.

センサ	放電源	サイズ(mm)	印加電圧
A	導体側針電極①	Φ1.0, 20	80kV
	沿面異物①	Φ0.2, 20	70kV
	浮き電極①	-	50kV
B	導体側針電極②	Φ1.0, 10	80kV
	沿面異物②	Φ0.2, 10	40kV
	浮き電極②	-	40kV
	フリー異物	Φ0.2, 10	55kV

測定2 全長30mの同軸円筒構成の供試器端部(ガス圧0.4MPa)から波高値の異なる模擬パルス(パルス幅2nsec、波高値0.1V、0.5V、1V、5V)を注入した時の波形を設置位置の異なる内部UHFセンサa(4m)、b(9m)、c(30m)を用いて測定した。なお、放電源-a点間、a点-b点間、b点-c点間にそれぞれスペーサを配置した。

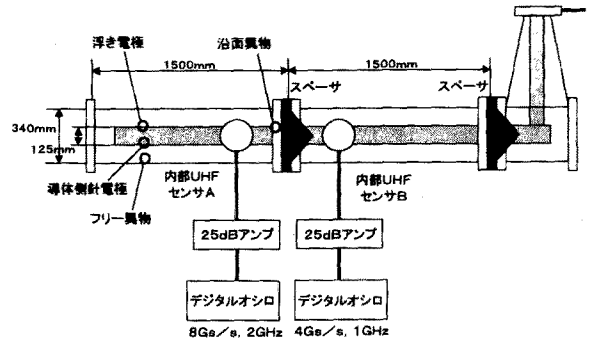


図4 部分放電試験装置構成 (測定1)

Fig.4. Configuration of PD test(Meas.1).

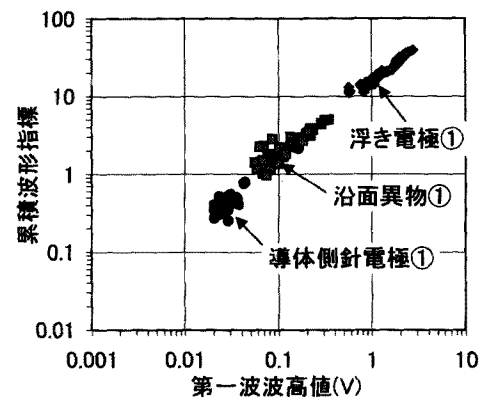


図5 分布算出結果(部分放電, センサA)

Fig.5. Distribution of partial discharges in sensor A.

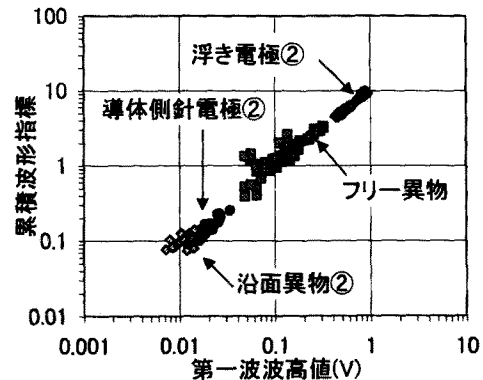


図6 分布算出結果(部分放電, センサB)

Fig.6. Distribution of partial discharges in sensor B.

<3.2>部分放電における分布の比例直線性の検討

測定1で測定された複数回信号における第一波波高値－累積波形指標分布について、センサAで得られた部分放電信号の処理結果を図5に示す。また、放電源条件、センサ位置（センサB）及び測定系を変えて同様の傾向を確認した結果を図6に示す。図5及び図6より各部分放電源について第一波波高値と累積波形指標がバラツキを持って分布しており、その分布形状は比例直線状に広がりを持っていることが確認できる。図5及び図6に示した以外の放電源サイズや印加電圧を変化させたケースにおいても同様の傾向を示しており、比例直線状に広がりを持つという性質は、放電源種類・放電源サイズ・印加電圧・センサ位置・測定系の条件に限定されないことが確認できる。

<3.3>放電源－センサ間距離による影響 測定2で得られた各センサの検出信号より第一波波高値－累積波形指標分布を作成し、分布に対して比例直線 $y=ax$ による最小二乗近似を行った。近似直線の傾き a を第一波波高値－累積波形指標分布の傾きと定義する。

図7に放電源－センサ間距離と第一波波高値－累積波形指標分布の傾きとの関係を示す。

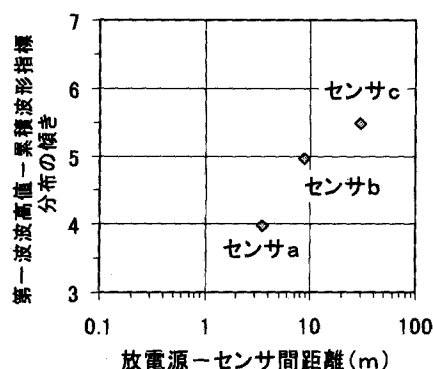


図7 放電源距離による分布の傾きの変化

Fig.7. Relationship between PD distance and the distribution slope.

図7より、放電源がセンサ位置から離れるにつれて第一波波高値－累積波形指標分布の傾きが大きくなっていることが確認できる。特に今回はa－b間及びb－c間にスペーサが存在していることから、傾きの変化が顕著に観測されたものと推測される。

実際のGISも一定距離毎にスペーサにより区画されており、放電源が遠くなるにつれて伝播時に通過するスペーサの数が多くなるので、分布の傾きは同様の傾向となるものと予想される。このように放電源－センサ間距離と分布の傾きが一意に変化する性質を持つことから、分布の傾きは放電発生位置推定に対して有効な指標になると考えられる。

4.部分放電識別アルゴリズム

本章では、部分放電信号の第一波波高値－累積波形指標分布が比例直線状に分布するという特徴を用いて、複数観測波形の分布形状から、外部よりGIS内部に侵入する電磁波信号と部分放電信号を識別する手法を提案する。

<4.1>部分放電と外来伝播ノイズによる分布の差異

外部からGIS内部に侵入する電磁波信号には様々なものが考えられるが、本論文ではこれらの信号を外来伝播ノイズと呼ぶことにする。無課電時のGISタンクにおいて測定1の試験装置で外来伝播ノイズを一定時間収集し、その第一波波高値－累積波形指標分布について検討を行った。

測定1において無課電時に計測された信号の一例を図8に示す。部分放電はインパルス性の現象であるため検出信号が図2のような形状となるのに対して、外来伝播ノイズの中には部分放電のようなインパルス性の現象だけでなく、図8に見られるような持続時間の長い連続振動性の現象も観測される。

測定1(センサA, 無課電時)で観測された信号より得られた第一波波高値－累積波形指標分布を図9に示す。

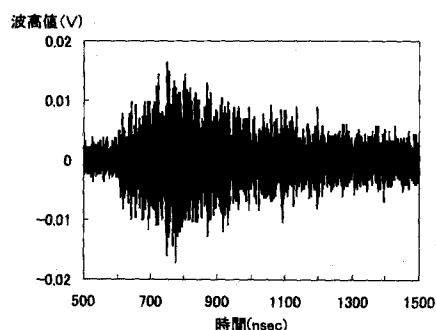


図8 外来伝播ノイズ検出信号例

Fig.8. A detection signal(external noise).

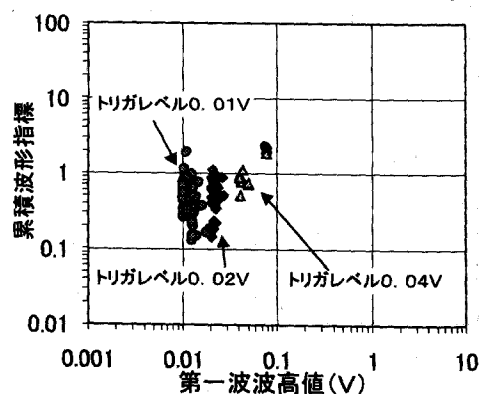


図9 分布算出結果(外来伝播ノイズ, センサA)

Fig.9. Distribution of external noises in sensor A.

このように分布にバラツキが見られるのは、持続時間や発生位置の異なるインパルス性や連続振動性等の様々な現象が確率的に一樣でない状態で発生している複数回信号を観測したためである。第一波波高値は発生現象の第一波目のみを反映しているの、例えば連続振動性ノイズがGISに侵入した場合は、第一波波高値と累積波形指標には全く相関がない。また、インパルス性ノイズでもパルス幅や発生源からの距離が変動すれば、第一波波高値と累積波形指標の関係は一意に決定することができない。

つまり、外来伝播ノイズは現象が一樣でないことから、複数回の観測信号で第一波波高値-累積波形指標分布を作成すると、比例直線状ではない形状でバラツキを持って分布するといえる。

以上のことから、複数観測信号に対する第一波波高値-累積波形指標分布の比例直線性を判定することで、連続して観測した信号が部分放電分布なのか、異なる地点から一樣でなく発生する外来伝播ノイズかを識別することが可能となる。

<4.2>識別アルゴリズム 前節の結果より複数回信号の第一波波高値-累積波形指標分布の比例直線性を判定することで、連続して観測した信号が部分放電分布であるかどうかを識別できることがわかった。そこで、比例直線性を示す指標として寄与率 R^2 を用いる。

寄与率 R^2 は、第一波波高値-累積波形指標分布に対して比例直線($y=ax$)で最小二乗近似を行い、近似直線 $y=ax$ によりどれだけ分布を近似できたかという指標である。寄与率が1に近いほど分布を比例直線で近似できることを示し、0に近いほど分布を比例直線では近似できていないことを示す数値であり、(2)式で定義される。

$$R^2 = 1 - \frac{\text{残差平方和}}{\text{総平方和}} = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

ここに、 x_i : 第一波波高値、 y_i : 累積波形指標、

a : 回帰直線の傾き、 $\hat{y}_i = ax_i$ 、 $\bar{y}$: y_i の平均値

図5、図6、図9に示す部分放電信号及び外来伝播ノイズ信号における分布に対して寄与率を算出した結果を表2に示す。

表2 寄与率算出結果

Table 2. Contribution rate.

信号種別	寄与率
部分放電(センサA)	0.9937
部分放電(センサB)	0.9924
外来伝播ノイズ	0.2984

表2に示すように比例直線性の高い部分放電信号の分

布は寄与率が高く、分布にバラツキのある外来伝播ノイズの分布は寄与率が低いことがわかる。

そこで図10に示す識別アルゴリズムを提案する。

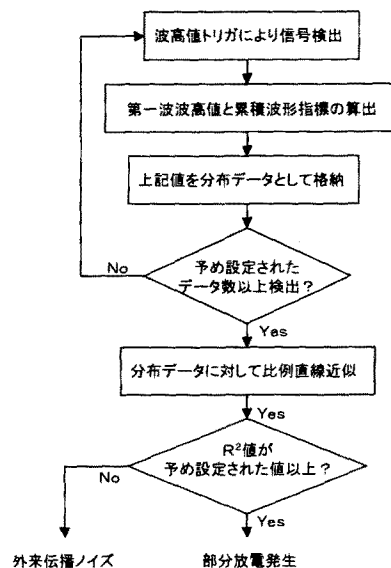


図10 識別アルゴリズムフローチャート

Fig.10. Discrimination algorithm flow.

識別方法としては、一定時間もしくは一定数以上の検出波形に対して第一波波高値-累積波形指標分布を作成し、比例直線で最小二乗近似を行った時の寄与率を算出する。そして、寄与率の大小により部分放電かどうかを識別する。

<4.3>識別シミュレーション 実環境では部分放電発生中にも外来伝播ノイズが発生するので、連続して観測された複数回の電磁波信号により第一波波高値-累積波形指標分布を作成すると、外来伝播ノイズによる分布と部分放電による分布が同時にできることになる。よって分布作成時における部分放電と外来伝播ノイズの発生割合によって寄与率が変化することが予想される。そこで、部分放電データに一定の比率でノイズデータを加えるシミュレーションを行った。

測定1(センサA)で観測された部分放電信号に、測定1(センサA)で無課電時に観測された電磁波信号を外来伝播ノイズの一例として、一定の比率でデータを加えた時の寄与率を算出した結果を図11に示す。部分放電データとノイズデータの割合を変化させて寄与率の変化を検討した。図中のノイズ比率とは、第一波波高値-累積波形指標分布を作成する際に使用した、全データ個数に対するノイズデータの個数の割合を示している。図中の対ノイズ振幅とは、外来伝播ノイズ信号における最大振幅の平均値に対して、各々の部分放電信号における最大振幅の平均値が何倍にあたるかを示している。

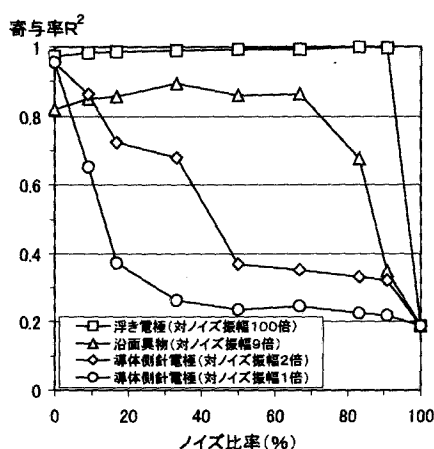


図11 寄与率算出結果

Fig.11. Contribution rate.

外来伝播ノイズのみが検出された状況(ノイズ比率100%)では寄与率は0.2程度であるが、部分放電のみが検出された状況(ノイズ比率0%)では寄与率が0.8以上となっており、この中間に閾値を設定することで部分放電の識別が可能である。これまでの経験上、部分放電発生時における最大のノイズ比率は15%程度であったことから、寄与率の閾値を0.5程度に設定し、分布を近似した比例直線の寄与率 R^2 値が0.5以上であれば部分放電発生、0.5未満であれば外来伝播ノイズの分布とみなすことで、外来伝播ノイズとほぼ同振幅の微小放電も検出可能であることが図11より確認できる。なお、試験条件を変更した測定1(センサB)のケースにおいても同様の結果を確認している。

以上より、今回提案したアルゴリズムは、外来伝播ノイズ発生下での部分放電識別に対して有効であることが示された。本方式は、様々な地点から一様でなく発生するノイズに対しては安定した識別が可能であるが、外部コロナ放電のようにインパルス性現象が同一地点から発生するケース、検出波形に全くバラツキのないケースなどについては誤識別が予想される。今後、様々な条件下で本識別方式の有効性や問題点について検討することが必要である。

5. むすび

本論文では、内部UHFセンサから得られた複数回の検出信号より得られる、第一波波高値と累積波形指標の二つのパラメータより分布を作成すると、分布形状が常に比例直線状となるという事象に着目し、GISを模擬した直管構成のタンクにおける実測データを用いて検証した。放電源位置・センサ位置・タンク構造・測定系の差異は第一波波高値-累積波形指標分布の傾きにのみ反映されるので、分岐管等の存在する他のタンクにおいても部分放電信号による分布の比例直線性は保たれると考えられ

る。今後、他のタンク構造におけるデータ解析を通じて追加検証を実施する予定である。

また、分布の傾きが放電源とセンサ間の距離に応じて変化することを実測データを用いて検証し、分布形状が部分放電発生地点特定にも有効な指標となり得るとの知見を得た。この特徴については、分岐等の存在するタンクにおいて有効かどうか更なる検討を行う必要がある。

さらに、分布形状の特徴に基づき、比例直線近似の寄与率を用いて部分放電識別を行うアルゴリズムを提案し、部分放電とはほぼ同振幅の外来伝播ノイズと発生下での部分放電識別に対しても有効であることを示した。

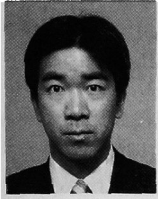
(平成11年2月8日受付, 同11年8月18日再受付)

文献

- (1) 前川洋・梶井健・亀井光仁・宮本憲繁:「GIS部、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」, 電学論B, Vol.116-B, No.12, pp.1575-1579, 1996
- (2) 木村喬・春浪隆夫・金万直弘・斎藤宗敬:「外部アンテナを用いた絶縁診断方法」, 電学論B, Vol.115-B, No.10, pp.1199-1207, 1995
- (3) 電気学会編:「電気設備の診断技術」, pp.165-180, 1993
- (4) 匹田政幸:「ノイズ除去技術」, 電気学会東海支部専門講習会「最新コンピュータ技術による絶縁診断技術の動向と将来展望」論文集, pp.35-45, 1994
- (5) 大木功・灰田武史・泉井良夫・小林誠治:「逐次分類型ニューラルネットワークによるGIS内部異常診断」, 電学論B, Vol.116-B, No.6, 1996
- (6) E.Gulski: "Computer-aided Measurement of Partial Discharges in HV Equipment", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.28, No.6, pp.969-983, 1993
- (7) R.Baumgartner, B.Fruth, W.Lanz, K.Pettersson: "Partial Discharge in Gas Insulated Substation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.8, No.1, 1992
- (8) M.D.Judd, O.Farish, B.F.Hampton: "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.3, No.2, pp.213-228, 1996
- (9) 大久保仁・加藤達朗・鈴木淳史・吉田昌展・早川直樹・匹田政幸:「SF₆ガス中における部分放電電流パルス波形の電圧位相依存性とその周波数特性」, 電学論B, Vol.117-B, No.1, pp.101-106, 1997

- (10) 吉田昌展・高橋俊裕・星野俊弘・匹田政幸・宮崎明延・大久保仁：「実規模GILにおける部分放電の発生と電磁波の放射・伝搬特性」，電学論B，Vol.117-B，No.8，pp.1204-1209，1997

高嶋 和夫



(正員) 1997年3月大阪大学大学院基礎工学研究科システム工学専攻修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在，同社産業システム研究所において，プラント機器の信号処理技術に関する研究開発に従事。

宇佐美 照夫



(非会員) 1969年3月神戸市立御影工業高等学校卒業。同年4月三菱電機(株)入社。主として計測技術の研究開発に従事。現在，同社産業システム研究所センシングシステム開発部2グループ。計測自動制御学会会員。

長田 典子



(正員) 1983年3月京都大学理学部数学系卒業。同年4月三菱電機(株)入社。現在，同社産業システム研究所において，知識情報処理の計測システムへの応用に関する研究に従事。96年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。情報処理学会，システム制御情報学会，電子情報通信学会各会員。

宮下 信



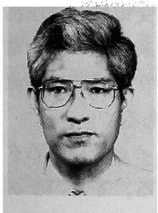
(正員) 1971年大阪市立大学工学部応用物理卒。1973年3月修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在，同社産業システム研究所にてプラント機器の診断に関する研究に従事。計測自動制御学会，IEEE会員。

亀井 光仁



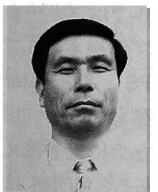
(正員) 1992年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。現在，同社系統変電・交通システム事業所開発部エネルギー技術グループに勤務。主として，GISガス絶縁技術および診断技術の開発に従事。

井上 悟



(正員) 1971年3月奈良高専電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。主として，計測技術の研究を経て，変電機器監視装置の開発・設計に従事。現在，同社系統変電・交通システム事業所開閉機器製造部監視装置設計課。計測自動制御学会会員。

井上 悟



(正員) 1970年3月御坊商工高等学校卒業。同年4月三菱電機(株)入社。主として，産業用センシングシステム技術の研究開発に従事。現在，同社産業システム研究所センシングシステム開発部首席研究員。計測自動制御学会会員。