位置標定における重畳最適化法を用いた 部分放電源空間標定

学生員 鈴木 雄 一 (大阪大学)
 学生員 川 田 昌 武 (大阪大学)
 正 員 河 崎 善一郎 (大阪大学)
 正 員 松 浦 虔 士 (大阪大学)
 非会員 川 崎 誠 (関西テック)

Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival

Yu-ichi Suzuki, Masatake Kawada, Zen-ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura (Osaka University)

Makoto Kawasaki (Kansai Technical Engineering Co.LTD)

A partial discharge (PD) inside a power apparatus is a symptom of an insulation breakdown and machine trouble, and the electromagnetic signals emitted from it interferes with a communication system as a noise. From above, detection and location PD are very important. The method of location PD based on several time delays of arrival of electromagnetic wave emitted from PD among antennas is well known. However, it is difficult to locate PD as a one point. It is better to locate as a space, but as a point. In this paper we propose "Superimposed Positioning Optimization on the Time delay of arrival (SPOT)" as a new method to locate PD. We discuss an effectiveness of "SPOT" and properties of the spaces located.

キーワード：部分放電、電磁波到達時間差、位置標定、電力機器設備

1. まえがき

電力機器・設備において発生する部分放電は、絶縁破壊・機器異常の予兆であり、部分放電を早期に検出し、その原因を排除することは、電力の安定供給という観点から非常に重要な課題となっている^{(1)~(14)}。また、部分放電によって放射される電磁波は、電磁波雑音(ノイズ)として、ラジオ放送やテレビ放送の受信、アマチュア無線や業務通信設備に障害を与えており、電磁環境問題という点からも深刻な問題となっている^{(15),(16)}。従って、その部分放電源を的確かつ迅速に位置標定し、その原因を排除する必要がある。

部分放電源を推定する器具として、部分放電に伴って発生する超音波をパラボラ集音器で受信することができる「超音波音響センサー」が知られているが⁽¹⁴⁾、対象物に焦点を合わせる必要があり、多くの対象物に対しては多大なる手間、時間を要することとなる。

部分放電源を推定する方法として、部分放電に起因して放射される電磁波を利用する方法が知られている。機器に直接備え付けたり、非接触に配置した複数本アンテナで電磁波を受信して、それぞれのアンテナの受信強度から放電源を推定する方法や、その電磁波到達時間差から放電源を推定する方法等が報告されている⁽¹²⁾。

これらの手法は、それぞれ位置標定の面では十分な成果を上げているが、いずれの方法も特定の機器向けであったり、システムを移動して多くの機器に適用することが困難な場合が多い。例えば、配電線において発生する部分放電源を推定する場合、広範な対象領域や立体的で多種多様な機器配置を考慮し、可搬性・汎用性を備える三次元標定方法が要求されることが考えられる。

即ち、我々は、広範囲を探索できる新しい位置標定手法として位置標定重畳最適化法 (SPOT: Superimposed Positioning Optimization on the Time delay of arrival) を提案する。

この手法の特徴は、点として放電源を標定するのではなく、存在し得る空間として標定することである。しかしながら、空間として捉えることによって、標定領域は大きくなる。そこで電力機器のどの部分から発生しているか判断するために、標定空間を縮小する必要がある。本手法は、任意にアンテナ配置を移動することにより複数の空間を作成し、その共通領域を求めることで、空間縮小を実現する。

本論文では、提案する SPOT を用いることで、空間的な位置標定を実現できることを数値計算及び模擬実験によって示す。

2. 位置標定重量最適化法 (SPOT)

配電線碍子を対象と考えると、対象物の配置は多種多様であるので、位置標定システムの可搬性・汎用性が重要視される。そこで、放電源の推定方法として、複数本アンテナで部分放電に伴う電磁波を受信しアンテナ間到達時間差を利用する。

本論文では、部分放電源を三次元で標定することを目的としているので、放電源座標(X, Y, Z)の3つの未知パラメータがある。そこで、それぞれ独立なアンテナ間到達時間差を得るために、アンテナは4本必要である。アンテナ配置図を図1に示す。なお図中の数字は、4本のアンテナを区別するために1から4の番号を記している。アンテナ配置は、一般には任意であるが、計算を簡単にするため本論文では正方形に配置する。

それぞれのアンテナで受信された時系列データから到達時間差の計算が必要となるが、同一信号の二点間の到達時間差を求める手法としては、相互相関法、最小2乗法や高次モーメントを利用する方法が知られている⁽¹⁷⁾。ここでは、計算負荷の小さい相互相関法を用いることにする。

アンテナ間到達時間差と放電源座標の間には次の式(1)が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{X^2+(Y-b)^2+Z^2} &= cT_1 \\ \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{(X-a)^2+Y^2+Z^2} &= cT_2 \\ \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{(X-a)^2+(Y-b)^2+Z^2} &= cT_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

X, Y, Z ; 放電源座標(m)

T_1 ; アンテナ1-2間時間差(s)

T_2 ; アンテナ1-3間時間差(s)

T_3 ; アンテナ1-4間時間差(s)

a, b ; アンテナ間隔(m)

c ; 光速

空間分解能、即ち式(1)の任意の到達時間差に対する解集合は、双曲面の交点となる(図2(a))。そのため、分解能の分布が規則的でなく、また分解能はアンテナ間隔と測定器のサンプリング時間に依存しているので、標定精度が実用に適しない場合がある。そこで、空間の任意の点に対して、

その点での放電源の存在可能性を調べる(図2(b))。その方法として、ある任意の点から電磁波が放射される場合の到達時間差を数値計算によって求め、この到達時間差が測定による到達時間差±サンプリング時間の間(図3(a))に含まれるか否かを調べる(図3(b))。3つの到達時間差に関して、全て含まれる(図3(c))と、即ちその点に放電源の存在する可能性があると判断する。この放電源存在有無判定を全空間で実行する。これは、即ち、式(2)を満たす(X, Y, Z)と等価である。

$$\left. \begin{aligned} c(T_1 - \sigma) &\leq \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{X^2+(Y-b)^2+Z^2} \leq c(T_1 + \sigma) \\ c(T_2 - \sigma) &\leq \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{(X-a)^2+Y^2+Z^2} \leq c(T_2 + \sigma) \\ c(T_3 - \sigma) &\leq \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} - \sqrt{(X-a)^2+(Y-b)^2+Z^2} \leq c(T_3 + \sigma) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

σ ; 測定器のサンプリング時間(s)

式(2)を満たす(X, Y, Z)を求めると、空間的な領域として解が求められる(図4(a))。しかしながら、このような単一の空間領域では、部分放電を発生している機器の特定までは至らない。

そこで、アンテナ配置を変更して(移動もしくはアンテナ間隔変更)異なるアンテナ間電磁波到達時間差を得て、前述と同様に空間的に標定する。同じ箇所の部分放電に伴う電磁波を受信しているのであれば、これらの空間は共通部分を有し(図4(b))、この共通部分領域に部分放電源が存在する。このような操作を繰り返すことで、共通空間領域は縮小し、部分放電発生機器の特定に至ることになる。

図1 アンテナ配置

Fig.1. An arrangement of antennas

図2 空間分解能
Fig.2. Space resolution

図3 放電源存在有無判定
Fig.3. Procedure of decision of source existence

図4 SPOTのアルゴリズム
Fig.4. Procedure of SPOT

表1 数値計算での各ケースの設定条件
Table1 The condition of each cases

ケース	アンテナ1 の座標(m)	アンテナ間到達時間差 (ns)		
		1-2 間	1-3 間	1-4 間
1	(0,0,0)	14	1	16
2	(2,0,0)	15	-1	13
3	(-2,0,0)	14	3	18
4	(5,0,0)	15	-4	9
5	(-5,0,0)	12	6	20
6	(7,0,0)	14	-6	7
7	(-7,0,0)	12	8	21
8	(10,0,0)	13	-8	3
9	(-10,0,0)	10	10	22
10	(15,0,0)	11	-11	-2
11	(-15,0,0)	9	12	22

表2 点標定における標定結果
Table2 The results of location

ケース	標定点(m)		
	X	Y	Z
1	3.02	8.16	1.57
2	3.98	8.16	1.57
3	3.63	15.70	6.30
4	4.48	11.26	4.08
5	3.11	13.07	5.94
6	-0.69	23.77	11.34
7	11.68	16.34	13.32
8	3.87	14.07	6.81
9	4.36	14.36	6.36
10	4.65	13.17	6.11
11	14.14	22.72	11.90

表3 点標定における標定結果と標定誤差
Table3 The results of location and errors of location

アンテナ配置 移動距離(m)	標定点の重心			標定誤差(m)
	X(m)	Y(m)	Z(m)	
2	3.54	10.67	3.14	4.73
5	3.53	10.83	3.86	4.16
7	4.67	19.42	8.74	5.84
10	3.75	12.20	4.91	2.47
15	7.27	14.68	6.53	3.82

表4 S P O Tにおける標定結果
Table4 The results of location by SPOT

アンテナ配置 移動距離(m)	標定空間の 体積(m ³)
2	10.25
5	2.75
7	10.25
10	7.25
15	10.25

3. 数値計算

本章では、第二章の連立方程式(1)によって放電源点標定とS P O Tによる標定を比較する。即ち、それぞれの標定誤差と標定空間の体積を数値計算で示す。両方式を比較するために点標定における標定誤差を空間に換算して、S P O Tによる空間の体積と比較する。

数値計算の設定として、部分放電源は任意に図1のX Y Z座標系で(3.5m, 14.4m, 6m)に設置し、アンテナ配置はa, bを5mとした正方形配置とし、測定器のサンプリング時間は1nsとする。アンテナ配置を変えた11のケースを設定し、表1に示す。アンテナ配置を示す数値としてアンテナ1の座標を示しているが、配置の順番は図1と同じである。ケース1を基準ケースとして、それ以外のケースは基準ケースをX軸方向に±2, 5, 7, 10, 15m 平行移動したアンテナ配置になっている。各ケースにおいて、アンテナ1-2間、1-3間、1-4間の電磁波到達時間差を任意に与えて、この数値を用いて各々のケースにおいて標定を行う。

表1の到達時間差を用いて連立方程式(1)から求められる標定点を表2に示す。この表から、点標定による標定点は、ケースに依存する分散が認められ、放電源の位置を特定することは容易ではない。

さらに、アンテナ配置移動距離が同じケース(例えば移動距離2mはケース1, 2, 3、移動距離5mはケース1, 4, 5)の標定点の重心を求め、その重心と標定誤差を表3に示す。重心を求めることによって、標定点の分散は低減されているが、放電源と標定点の距離である標定誤差は、約2~6mとなっている。

次に、S P O Tを用いて空間として標定し、その標定空間を計算する。表1の到達時間差を用いて各ケースごとに求めた放電源標定空間を基準ケースからの移動距離が同じ空間を基準ケースであるケース1を含めて、移動距離2mはケース1, 2, 3、移動距離5mはケース1, 4, 5のように重ね合わせる。その共通領域(標定空間)の体積と移動距離の関係を表4に示す。標定空間の体積は、2.75~10.25m³となっており、アンテナ配置移動距離と空間体積に相関関係は認められず、空間体積はこの近辺で飽和していると考えられる。

第二章において述べたように、点標定では、一点として標定できるが標定誤差が存在し、S P O Tでは、標定空間の分散は低減するが、空間として標定するので曖昧な標定となる。

その比較は、点標定における標定誤差をS P O Tにおける標定空間の体積に換算することで実現する。標定誤差を球の半径とみなし、その球をS P O Tにおける標定空間と考えて、その体積を求め、結果を図5に示す。点標定における標定誤差を標定空間の体積に換算すると、数百m³となっており、これはS P O Tにおける標定空間より一桁以上大きい数値となる。このことから、三次元標定に対しては、S P O Tの方がより適していると結論できる。

図5 数値計算から求められた放電源標定空間の体積
Fig. 5. The volume of locating spaces

図6 受信波形の代表例
Fig. 6. A typical wave form

(a) アンテナ配置移動前

(b) アンテナ配置移動後

図7 標定実験での放電源標定空間の分布
Fig. 7. Results of experiment

4. 標定実験

< 4. 1 > 実験機器・実験方法 部分放電源には、コロナ発生器を使用する。コロナ発生器は、針-半球電極を有し、寸法は高さ 21 cm、底面は一辺 14.6 cm の正方形である。また、放電電荷量は、約 1250pC であるが、これは通常の配電線碍子を考えると、金属接触箇所における微小ギャップで発生する部分放電を模擬している。アンテナは、バイコニカルアンテナ（帯域：20～200MHz）を使用し、受信信号は、サンプリング周波数が 1GHz で 4ch のデジタルオシロスコープで 4μs（4000 ポイント）記録する。

実験配置は図1のように地面を $Z=0$ として X, Y, Z 座標系を定め、部分放電源は任意の $P(3.5m, 14.4m, 6m)$ の地点に設置し、アンテナ配置は $a, b=5m$ の正方形の頂点に配置する。

実験では、アンテナ 1 を原点に置く配置でコロナ発生器を動作させ、放射される電磁波を測定し、アンテナ 1-2 間、1-3 間、1-4 間における到達時間差を計算する。コロナ発生器の部分放電から放射される電磁波を受信する以外に別の外来信号を受信することもあるので、計測は 10 回ずつ行うことにする。さらに、アンテナ配置を X 軸方向に $\pm 2m$ 移動して同様の計測を行う。

受信した波形の代表例を図 6 に示す。同図では、2000ns 付近の鋭いピークが部分放電であり、持続時間は約 150ns である。また、他の振幅はバックグラウンドノイズを示している。

< 4. 2 > 標定結果 標定実験で得られた標定空間の分布を図 7 に示す。アンテナ配置を移動する前の測定によって得られた 10 組のデータから作成される標定空間の共通領域を図 7(a) に示す。同図から、標定空間は絞り込まれておらず、放電源の存在する方向がだまかにわかるのみである。

次に、アンテナ配置を X 軸方向に $\pm 2m$ 移動して得られた 20 組のデータから作成される標定空間を追加して合計 30 個の標定空間を作成し、その共通領域を図 7(b) に示す。アンテナ配置を移動することによって、標定空間が絞り込まれていることが明らかである。

図 7(b) の放電源標定空間に対して、その分布状況について検討する。標定空間が部分放電源を設置した座標を含んでいるか調べる。そこで、図 7(b) の放電源標定空間が X 軸に関しては $X=3.5m \sim 4.0m$ に分布していたので、この付近の拡大図を図 8 に示す。この図よりコロナ発生器を設置した座標 (3.5m, 14.4m, 6m) は、この放電源標定空間内に含まれていることが確認できる。

さらに、標定空間の分布状況を座標ごとに調べるために、 X, Y, Z 方向それぞれに 50 cm 間隔に区切り、度数表示したものをその分散値と共に図 9 に示す。標定空間の分散及び分布状況は、各座標間で差異が認められる。 X 座標の分散は小さく、実際の放電源の近辺に空間が存在していることが分かる。それに対して Y 座標、 Z 座標の分散値は大き

く、標定空間がX座標と比較して広範囲に広がっていることがわかる。これはアンテナ配置がX軸に沿って移動したため、X座標方向の領域が最も縮小しているものと考えられる。すなわち、標定空間の形状は、アンテナ配置の移動方向に依存すると考えられる。

本実験の放電源標定空間の体積は、 2.75m^3 となり、第4章の数値計算で求められた空間体積と比較すると、最も体積の小さい5m移動した場合と同じとなっている。数値計算では、アンテナ配置ごとに1組のデータを用いて放電源標定空間を求めたが、実験ではアンテナ配置ごとに10組のデータを測定したことによって、数値計算より標定空間の体積は、小さくなっているものと考えられる。

図8 放電源標定空間の拡大図
Fig.8. An expansion of the locating space

図9 放電源標定空間の各座標の分布状況と分散値
Fig.9. The distributions and variances of the locating space in each coordinate

図10 重なり度合いが1以上の放電源標定空間の分布
Fig.10. The distribution of a locating space which the overlapping degree is more than 1

標定実験で使用したコロナ発生器から放射している電磁波以外の信号(雑音)の影響を調べるために、アンテナ配置3カ所で測定された30組のデータから求められた標定空間を全てプロットしたもの、即ち、30個の標定空間の和集合の領域を図10に示す。あらゆる方向に空間が分布しており、図7(a),(b)と比較すると、多くの空間が重ね合わせの過程で除去されている。このことは、電力設備等の劣化による部分放電現象が電源周期に依存し定常的に電磁波を放射するので、標定空間の重ね合わせの過程で重なり度合いの大きい領域として現れるのに対して、定常的に放射しない部分放電は、重なり度合いの小さい領域になるためである。このことから、SPOTを用いることで、電力機器以外から発せられる様々な信号の影響を受けずに電力機器の部分放電源を標定できることが確かめられた。

5. まとめ

本論文では、部分放電源位置標定として、空間標定の概念を取り入れた新手法「SPOT」を提案し、理論的検討と実験的検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

標定実験の結果、SPOTを用いて算定された放電源標定空間の体積は、 2.75m^3 であった。また、標定実験でアンテナは、模擬放電源であるコロナ発生器から放射している電磁波以外の信号を受信していたが、標定空間は一つの領域のみを示した。つまり、SPOTを用いることで、電力機器以外から発せられる様々な信号の影響を受けずに電力機器の部分放電源を標定できることがわかった。

今後、配電線等、電力設備機器への適用を行う予定であり、その際設置環境、移動の簡便さを考慮して、アンテナ間隔を縮小したコンパクトなシステムについて検討する必要がある。

(平成9年4月24日受付、同9年9月22日再受付)

文献

- (1) BFruth, L.Niemeyer : "The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.27 No.1, pp60-69, 1992
- (2) J.Fuhr, M.Haessig, P.Boss, D.TSchudi, R.A.King : "Detection and Location of the Insulation of Power Transformers", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.28 No.6, pp1057-1067, 1993
- (3) U.Koph, K.Feser : "Rejection of Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD Measurements", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.6, pp1180-1191, 1995
- (4) Edward Gulski : "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.5, pp822-837, 1995
- (5) R.E.James, B.T.Phung : "Development of Computer-based Measurements of their Application to PD Pattern Analysis", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.5, pp838-856, 1995
- (6) P.von Glahn, R.J.Van Brunt : "Continuous Recording and Stochastic Analysis of PD", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.4, pp590-601, 1995
- (7) R.Bozzo, F.Guastavino : "PD Detection and Localization by means of Acoustic Measurements on Hydrogenerator Stator Bars", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.4, pp660-666, 1995
- (8) Edward Gulski, Andrej Krivda : "Influence of Aging on Classification of PD in HV Components", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.4, pp676-684, 1995
- (9) Sher Zaman Khan, Zhu Deheng, Jin Xianhe, Tan Kexiong : "A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2 No.6, pp770-707, 1995
- (10) 犬島、梶井、前川 : "自己帰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, Vol.113-B, No.11, '93
- (11) 木村、春浪、金万、斎藤 : "外部アンテナを用いたGISの絶縁診断方法", 電学論, Vol.115-B, No.10, '95
- (12) 川田、河崎、松浦、川崎 : "電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法", 電学論, Vol.115-B, No.10, '95
- (13) 電気学会 : "電気設備の診断技術", 1988
- (14) 電気協同研究会 : "配電機材劣化診断技術", 第43号, 第2号
- (15) 電気学会 : "電磁波雑音のタイムドメイン計測技術", 1995
- (16) 電子情報通信学会 : "電磁妨害波の基本と対策", 1995
- (17) Xinyu Ma, Chrysostomos L. Nikias : "Joint Estimation of Time Delay and Frequency Delay in Impulsive Noise Using Fractional Lower Order Statistics", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.44 No.11, pp2669-2687, 1996

鈴木 雄一

(学生員) 1971年8月30日生。1994年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。1996年4月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程進学、現在に至る。電力機器・設備の診断技術、信号処理技術の応用に関する研究に従事。

川田 昌武

(学生員) 1971年1月25日生。1995年3月武蔵工業大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程進学、現在に至る。1995年電気学会論文発表受賞。電力機器・設備の診断技術、信号処理技術、画像処理技術の応用に関する研究に従事。

河崎 善一郎

(正員) 1949年1月17日生。1978年3月大阪大学大学院博士課程修了。1979年4月名古屋大学空電研究所勤務。1989年7月大阪大学工学部講師。1991年同助教授、現在に至る。工学博士。電磁界理論、環境電磁工学、雷観測、電力機器の絶縁診断に関する研究に従事。1993年日本大気電気学会賞受賞、日本学会会議・電波研連委員。

松浦 虔士

(正員) 1938年1月1日生。1962年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。1977年1月大阪大学工学部助教授、1988年3月同教授、現在、同大学大学院工学研究科電気工学専攻教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・変換・制御に関する教育・研究に従事。CIGRE、ITS、エネルギー・資源学会各会員。ITAアカデミシアン。

川崎 誠

(非会員) 1960年6月9日生。1979年3月大阪市立都島工業高等学校電気科卒業。同年4月(株)関西テック入社、現在に至る。絶縁診断技術の開発に関する研究に従事。