電力ケーブルの部分放電発生位置標定法の開発

正員 大野 博伸 (東京電力) 正員 海老沼 康光 (昭和電線電纜)
 正員 勝田 銀造 (東京電力) 正員 佐々木 伸洋 (昭和電線電纜)
 非会員 坂口 隆二 (東京電設サービス) 正員 永岡 明 (昭和電線電纜)

Development of Partial Discharge Location Method of Power Cable

Hironobu Ohno, Member, Ginzou Katsuta, Member (Tokyo Electric Power Company), Ryuji Sakaguchi, Non-member (Tokyo Densetsu Services Co., Ltd.), Yasumitsu Ebinuma, Member, Nobuhiro Sasaki, Member, Akira Nagaoka, Member (Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.)

Insulation deterioration of power cable can be measured by the method of partial discharge. If a large partial discharge is detected in a cable, the cable is concluded to be defective and a partial discharge is located to find the position of the defect. However partial discharge location methods have generally disadvantages that they require much skill for operation and are inferior sensitivity and accuracy.

To solve these problems, we have developed a locating method using two-phase cable and an automatic partial discharge locator which automatically localizes the generating site of discharge immediately after making partial discharge measurement by simple operations. We have made field measurements on SL (separately lead-covered) cables and other cables with the locator in order to test its accuracy and reliability, and it was found that the device is effective and useful.

キーワード：電力ケーブル，部分放電，位置標定，自動化，絶縁劣化診断

1. ま え が き

電力を安定に供給するため、既設電力ケーブルの絶縁破壊事故を未然に防止することは重要である。このために絶縁劣化診断が実施されており、その一つに部分放電測定がある。この測定で大きな部分放電が測定されると、その線路は「不良」または「要注意」と判断される。そして次に、どの位置から部分放電が発生しているか、すなわち位置標定が必要となる。その発生位置を検討し、修復または引換えが行われる。

従来から部分放電位置標定は行われていたが、

- (i) 熟練した技術が必要である
- (ii) 測定の感度や精度が悪い

などの欠点があった。そこで、これらの欠点を解消するため、部分放電の位置標定法を開発すると共に、自動位置標定器の開発を行った⁽¹⁾。自動標定器はデジタルメモリー、マイクロコンピュータおよびプリンタ

から構成され、簡単な操作で測定後ただちに発生位置を知ることができる。

開発した自動標定器の測定精度と信頼性の確認を行うために模擬線路で実験を行い、良好な結果を得た。また、現場測定にも用い、その測定精度を確認すると共に、部分放電が多数発生しているケーブル部を撤去し、確認試験を行った。

2. 従来の測定法とその欠点

従来の部分放電位置標定の測定回路を図1に示す。被測定ケーブルの測定端に結合コンデンサおよび検出器を取付け、高電圧を印加する。ケーブルで発生した部分放電パルスは、検出器で検出され、増幅された後オシロスコープ上に、図2に示すような波形として現れる。このオシロスコープ上の図2に示した第1波と第2波の時間差 T を計測し、これを(1)式に代入し、位置を算出している⁽²⁾。

$$X = L - \frac{V_p \times T}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V_p ：伝搬速度

更に、部分放電の発生箇所は1箇所集中しているわけではなく、複数箇所に分散している場合があるので、どの位置からの発生が多いかなどの統計処理を行っている。

しかし、前述の従来の測定法には次のような欠点があり、位置標定の実施を難しくしている。

- (i) 波形解析後の位置計算および統計処理に時間がかかる。
- (ii) 雑音の影響で高感度検出が難しい。
- (iii) ジョイントの影響で測定誤差を生じることがある。
- (iv) 伝搬によるパルス波高値の減衰で検出感度が低下する。

図 1 従来の部分放電発生位置測定法
Fig.1. Conventional circuit for partial discharge measurement.

図 2 測定端で観測される波形
Fig.2. Typical pulse waveform observed at measuring termination.

図 3 開発した部分放電位置標定法
Fig.3. Developed method of partial discharge location.

3. 部分放電位置標定法の開発

今回開発した部分放電位置標定法を図3に示す。

この位置標定法は従来の欠点に対して表1に示す対策を施している。その詳細は次のとおりである。

〈3・1〉 位置標定器の自動化

(1) 構成と機能 自動標定器はデジタルメモリー、マイクロコンピュータおよびプリンタから構成されている。その外観を図4に示す。自動標定器は測定車に搭載されている。

波形観測には高速処理可能なデジタルメモリーを採用し、このデジタルメモリーから順次送られてくる波形から、パルスの到達時間差を計算し、(1)式の計算を実行する。また、測定時間内に多数取入れられた部分放電の発生位置とその頻度の統計処理(頻度グラフの作成)を行いプリントアウトする。なお、端末部からパルスを注入し、伝搬速度 V_p を測定する。

(2) パルスの時間差の測定 パルスの立上り点を正確に読取ることは位置標定を行ううえで重要であるが、雑音による基線の乱れや、パルスの波形ひずみにより、正確に読取ることは難しい。測定者がパルス波形写真より立上り点を読取る場合は、パルスの立上りスロープを延長し、基線と交わる点を立上り点とすることで、これらの影響を少なくできる。マイクロコンピュータによる立上り点の読取りにおいても、測定

表 1 開発内容
Table 1. Developed items.

問題となる項目	対 策	
(1) ・熟練した技術の必要性 ・データ処理	・マイクロコンピュータによる計算 ・プリンタによる出力	自動標定器の開発
(2) ・雑音対策	・位相調整による正弦波ノイズ除去	
(3) ・ジョイントによる影響	・三相ケーブルのうちの二相を測定に用いた新方式の開発	
(4) ・パルス減衰	・遠方端への増幅器の設置

図 4 自動標定器の外観

Fig. 4. Appearance of the automatic partial discharge locator.

図 5 パルスの立上りの読取り

Fig. 5. Reading method of the point of rise of a pulse.

者による読取り方法に近づけるため、次のような工夫をした。

図 5 に示すように、あるしきい値 V_s を設定し、パルスの到達をまずマイコンに入力する。次に、記憶されているパルス波形から時間をさかのぼって、 $V_s/2$ に相当する時刻を読取る。これら V_s と $V_s/2$ の時間を直線外挿して、立上り時刻 t_{12} , t_{34} および時間差 T を算出する。すなわち、

$$t_{12} = t_1 - (t_2 - t_1) = 2t_1 - t_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$t_{34} = 2t_3 - t_4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T = t_{34} - t_{12} = 2(t_3 - t_1) - (t_4 - t_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3) 自動位置標定器の特性 自動位置標定器の主な特性を表 2 に示す。

測定、計算、プリントアウトの動作は 10 パルスごとに行われる。1 パルスの測定および計算の処理時間は約 300 ms であり、10 パルスのプリントアウトに約 3 秒かかる。従って、1 パルスの平均測定時間は約 0.6 秒である。これは、直流電圧課電時の基準放電電荷⁽³⁾が 1 パルス/秒の頻度で発生する放電であることを考えると十分な処理速度である。

表 2 自動標定器の主な特性

Table 2. Major characteristics of the automatic locator.

項 目	特 性
測定可能な放電大きさ	最小 50 pc
位置標定の測定誤差	約 50 m 以内
1 パルスの測定時間	約 0.6 秒

図 6 位相調整によるノイズ除去回路

Fig. 6. Phase-adjusted noise elimination circuit.

〈3・2〉 位相調整 (遅延線) による正弦波雑音除去

部分放電測定では雑音除去が重要な課題である。雑音除去としては平衡法 (バランス法) がよく用いられる。著者らも、まずそれを試みた。当初は現場測定でも良好な結果が得られたが⁽⁴⁾、雑音の侵入形態が複雑であり、常に改善できる方法ではなかった。

実測によると雑音波形は正弦波であった。この点に着目し、図 6 のように遅延線を用い雑音波形の 1/2 周期だけ遅らせた信号と元の信号を加算し、雑音を除去する方式を開発した⁽⁵⁾。この遅延線は、0~0.5 μ s の間で連続的に遅延時間を調整することができる。

〈3・3〉 ジョイントの影響の除去

部分放電の発生位置標定は通常被測定ケーブルの一端 (測定端) で放電パルスを観測し、その第 1 波と第 2 波の時間差 T を測定している (図 1, 図 2 参照)。

ところが、実布設ケーブルはサージインピーダンスの異なる異種または異径ジョイントを含んでいる場合が多い。これらのジョイントで、部分放電パルスは反射し、測定端で第 2 波として検出されることがあり、測定ミスを起こす危険があった。

そこで、図 3 に示すように被測定ケーブルで発生した部分放電パルスを遠方端でも検出し、そのパルスを残り 2 相のうち 1 相 (以下、パルス返しケーブルという) に注入し、測定端へ戻す方式を開発した。本方式では測定端で被測定ケーブルからの信号とパルス返しケーブルからの信号の各々第 1 波を観測し、それから時間差 T を算出する (図 7 参照)。ジョイントからの反射波は第 1 波の到達以後に現れるため、本方式のような第 1 波のみを用いる位置標定法ではジョイントからの反射波の影響を受けない。

図 7 二相方式における時間差の測定例
Fig. 7. Measurement of time difference of two-phase method.

〈3・4〉 パルス減衰の補償と校正方法 パルスの波高値はケーブル伝搬距離に従って小さくなるため検出感度が低下する。そこで図3に示すように、遠方端でパルスを検出し、パルス返しケーブルにパルスを入力する前に増幅する方法を採用した。

この方法を採用するにあたり、パルス検出感度は次のように設定した。すなわち、被測定ケーブル測定端に測定したい大きさの校正パルスを入力し、デジタルメモリー CH 1 の検出電圧を入力したパルス波高値に設定する。次に、同じ大きさの校正パルスを被測定ケーブル遠方端に注入し、CH 2 の検出電圧をこの波高値に設定する。CH 1, CH 2 とも設定電圧以上であるパルスについてのみ位置標定を行うようにプログラムする。この校正方法により、被測定ケーブルのいかなる点で発生した、設定パルス以上の部分放電も検出できることが保証できる。

なお、パルスの検出感度は校正を行う位置により変化するため、雑音レベルも変わる。この位置標定方法では雑音レベルを、パルス検出感度が最低となる点、すなわち測定端に校正パルスを入力したときの CH 1 のパルス検出感度より算出している。

4. 自動標定器の動作確認試験

〈4・1〉 自動標定器による位置標定結果 A 線路 (22 kVSL ケーブル、亘長 1,740 m) において、図3の測定回路を組み、直流電圧 30 kV を印加した際の測定結果を図8に示す。

同図は 500 pC 以上の部分放電 (雑音レベル: 250 pC) を測定後、プリンタによって出力されたものである。グラフの上に打出されている数値は、各々の部分放電の発生位置 (測定端からの距離) を示し、この発生位置を頻度グラフ化したものが下のグラフである。この線路では、100~200 m 付近に発生位置が集中していることがわかる。このように、自動位置標定器を用いれば、特に操作に熟練した技術を必要とせず、測定可能である。

X =	158	144	103	109	104	158	185	171	117	115
X =	119	127	103	90	101	119	195	141	168	184
X =	160	119	84	127	112	177	122	114	119	163
X =	130	139	163	141	136	107	120			
X =	95	185	131	101	114	176

図 8 自動標定器による測定結果
Fig. 8. Results from the automatic locator.

〈4・2〉 雑音除去効果 屋外実験場における模擬線路 (22 kVVCV ケーブル、亘長 335 m) で実際に侵入してくる雑音で雑音除去効果の確認を行った。模擬線路の模擬欠陥部に校正パルス 500 pC を注入し、雑音除去回路を取付けた場合と取付けなかった場合の出力波形を観測した結果を図9に示す。これによると、約 250 pC あった雑音が約 50 pC に低減されていることがわかる。なお、(a)図の正弦波雑音は 1,422 kHz であり、ラジオノイズである。

〈4・3〉 ジョイントの影響の除去効果 A 線路において、図3に示したパルス返しケーブルを用いず、図1の基本回路に自動標定器を取付け測定した結果を図10に示す。同図も図8と同様に 500 pC 以上 (雑音ノイズレベル: 250 pC) の部分放電を測定した結果である。図8と図10を比較すると、両方共 100~200 m の位置に部分放電パルスが測定されているが、図10には、1,640 m の位置にも多くのパルスが観測される。

A 線路はすべて SL ケーブルであるが、測定端から 83 m の位置に異径ジョイント (150 mm²: 100 mm²) がある。従って、第1波が測定端に達した後、反射してそのジョイントで再び反射してくると、遠方端から 83 m の位置、すなわち測定端から 1,657 m の位置で部分放電が発生したものと出力される。すなわち、図10の 1,640 m に現れている測定値は、ジョイ

(a) 雑音除去回路なし
CH 1 : 100 mV/div, CH 2 : 40 mV/div, 2 μ s/div

(b) 雑音除去回路あり
CH 1 : 100 mV/div, CH 2 : 40 mV/div, 2 μ s/div

図 9 雑音除去回路の効果

Fig. 9. Effects of noise elimination circuit.

図 10 位置標定結果 (パルス返しケーブルを使用しない場合)

Fig. 10. Results of partial discharge location (not using a pulse return cable).

ントの反射による測定ミスである。これに対して、ジョイントの反射の影響を除去できる二相方式での結果(図 8)には、1,657 m 付近には全く観測結果が現れず、期待どおりの効果が得られた。

〈4・4〉 パルス減衰の補償効果の確認 パルス減衰の補償効果を確認するため、従来の位置標定方式における第 2 波(図 2 参照)と、今回開発した方法におけるパルス返しケーブルで検出した第 1 波(図 7 参照)の検出感度を、現場にて測定、比較した。その結果を表 3 に示す。

表 3 パルス検出感度の比較

Table 3. Comparison of detection sensitivity of partial discharge pulse.

線路 No.	パルス感度 (mv/100 pc)		パルス感度の比率 (B)/(A)
	従来法における第 2 波(A)	パルス返し相からの第 1 波(B)	
1	0.80	5.2	6.5
2	8.0	28	3.5
3	1.0	6.0	6.0
4	1.6	8.0	5.0
5	0.20	4.0	20
6	1.2	10	8.3
7	0.80	2.0	2.5
8	0.80	2.4	3.0
9	3.2	12	3.8
10	1.2	9.6	8.0

同表によると、従来法における第 2 波の検出感度より、パルス返し相から検出した第 1 波が約 2~20 倍検出感度が高くなっており、パルス減衰の補償効果が確認できた。

5. 自動標定器の現地検証

位置標定器の精度と信頼性を確認するため、約 10 回線の線路で現場測定を行った⁽⁶⁾。現場測定では、一つの被測定線路に対し、両終端から位置標定を行い結果を比較した。更に、部分放電が多数発生した箇所を撤去し、詳細に調査した⁽⁷⁾。

結果の一例として、B 線路 (22 kV, SL ケーブル、亘長 1,411 m) での測定結果を図 11 に示す。

部分放電位置標定は直流電圧 30 kV 印加直後および 3 分後の各々 10 秒行い、両結果をプリンタに打出した。部分放電の発生が多かった 200 m の区間については、撤去後再度部分放電位置標定を行い、その後更に短く切分け各部の精密な部分放電測定を行った。

同図によると、両端からの位置標定結果はよく一致しており、また、短く切分けた後の部分放電測定結果共一致している。これらのことより、自動標定器の信頼性が確認できたといえる。

6. あとがき

現地における部分放電位置標定の、測定の簡素化および測定精度向上のため、新しい位置標定法および自動部分放電位置標定器を開発した。

(1) 自動部分放電位置標定器では、パルス波形の解析などをマイクロコンピュータで行うため、測定に熟練した技術を必要としない。更に、二相方式の採用により、ジョイントからの反射による測定ミスをなくすることができた。

図 11 部分放電位置標定検証試験結果
Fig.11. Result of comfirmation test for the partial discharge locator.

(2) 遅延線を利用した正弦波雑音除去方式の開発により、雑音レベルを約 1/5 に抑えることができた。また、遠方端でもパルスを検出し、増幅して送り返す方式により、測定感度を 2~20 倍上げることができた。

(3) 模擬線路における測定および現場測定を行い、開発した部分放電位置標定器が期待どおりに動作することを確認した。更に、約 10 回線の線路で現場測定を行い測定精度と信頼性を確認した。

なお、本自動位置標定器は自動測定システム⁽⁸⁾に組み込み、現在稼働中である。

(平成 3 年 7 月 16 日受付、同 4 年 1 月 14 日再受付)

文 献

- (1) 坂口，他：電力ケーブルの部分放電発生位置標定器の改良 (その 2)，昭 59 電気学会全大 12，1656
- (2) 電気学会技術報告 (II 部)，No. 4，No. 51 (昭 43)
- (3) 電気協同研究，23，No. 5，33 (昭 42)
- (4) 遠藤，他：「電力ケーブルの部分放電発生位置標定器の開発」，昭和電線電纜レビュー，33，No. 2，43 (昭 58-12)
- (5) 坂口，他：「電力ケーブルの部分放電位置標定器の改良 (その 2)」，昭 59 電気学会全大，p. 1656
- (6) 大野，他：「部分放電発生位置自動標定器による 22 kV 経年 SL ケーブルの劣化調査結果」，昭 60 電気学会東京支大，p. 218
- (7) 小松，他：「SL ケーブルの部分放電測定による劣化診断」，昭 63 電気学会全大，No. 11，1776
- (8) 大野，他：「自動絶縁測定システムの開発」，昭 62 同上，No. 12，1784

大野 博 伸 (正員)

昭和 25 年 2 月 25 日生。47 年茨城大学電気工学科卒業。同年 4 月東京電力 (株) 入社。現在工務部地中線課長。主として、地中送電線路の設計、建設、保守業務に従事し、現在に至る。

勝田 銀 造 (正員)

昭和 30 年 8 月 30 日生。53 年東京電機大学電気工学科卒業。同年 4 月東京電力 (株) 入社。現在工務部地中線課副長。主として、地中送電線路の設計、建設、保守業務に従事し、現在に至る。

坂口 隆 二 (非会員)

昭和 6 年 11 月 30 日生。27 年新潟県立六日町高校普通科卒業。同年 4 月東京電力 (株) 入社。主として、地中送電線路の建設、保守業務に従事し、平成元年 9 月同社を退社。現在、東京電設サービス (株) 北支社工務部地中線課長 (総括)。

海老沼 康 光 (正員)

昭和 22 年 10 月 5 日生。47 年東京大学大学院修士課程修了。同年昭和電線電纜 (株) 入社。高压ケーブルの絶縁設計と絶縁診断方法の開発に従事、現在、高电压研究室長。平成元年電気学会論文賞受賞。

佐々木 伸 洋 (正員)

昭和 24 年 11 月 19 日生。43 年宮城県立米谷工業高校卒業。同年 4 月昭和電線電纜 (株) 入社。主として、電力ケーブルの保守点検および監視システムの開発、設計に従事し、現在、線路システム研究室主任。

永岡 明 (正員)

昭和 35 年 6 月 4 日生。58 年九州工業大学電気工学科卒業。同年 4 月昭和電線電纜 (株) 入社。主として、電力ケーブルの絶縁診断方法の研究開発に従事し、現在、電力技術第一課主任。