光CTを用いた送電線故障様相判別に関する基礎検討

正員 荒金 昌克 (中部電力)
 正員 横谷 宗久 (中部電力)
 正員 勝川 裕幸 (日本ガイシ)
 非会員 鹿野 保 (日本ガイシ)
 非会員 徳山 幸司 (日本ガイシ)

Fundamental Examination on Cause Discrimination of Faults in Transmission Lines with Optical CT
 Masayoshi Arakane, Member, Munehisa Yokoya, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 Hiroyuki Katsukawa, Member, Tamotsu Kano, Non-member, Koji Tokuyama, Non-member (NGK Insulators, Ltd.)

Faults may occur in transmission lines due to various causes, including wind, salt, rainfall, snowfall, contact with wildlife and flying objects. When these types of faults occur, current and voltage waveforms undergo various changes depending on the particular cause. Since these changes are characteristic of the particular cause of the fault, it is possible to predict the cause of a fault based on these waveform characteristics. Therefore, we conducted artificial fault testing on an actual system scale to clarify the relationships between fault causes and changes in current and voltage waveforms.

Moreover, it was confirmed that the cause of a fault could be determined at a high rate of accuracy by the multi-discriminant and the neural network analysis. As a result of examination and evaluation of these findings, it was found that it will be possible in the future to automate the location of faults and their causes that have thus far been dependent on manual fault detection operations by maintenance personnel.

キーワード：光CT，故障様相，地絡電流，電流電圧波形，フラッシュオーバ，重判別分析，ニューラルネットワーク分

1. まえがき

送電線路は、風、塩、降雨、降雪、雷撃、鳥獣、飛来物の接触などさまざまな原因によって、故障に至る場合がある。このため、絶縁の強化、供給ルートの二重化、自動再閉路などの運転システムの強化、避雷装置の設置などの設備上の強化を図って、供給信頼度の確保につとめてきた。このため、現在では、供給支障に至ることは少なくなっている。しかし、再閉路のできないような永久故障の場合の復旧作業はもちろんのこと、再閉路によって復旧した場合でも、その後の巡視による故障原因の調査および設備損傷点検時の作業には、経過地が山岳地であったり広範囲であることから多大な時間と労力を要している。

一方、近年の光技術の進歩は、めざましいものがあり、中でも光計測は、電磁誘導やノイズに影響されにくい、絶

縁性が高いなどの理由から電力分野においても注目され、応用開発がさかんで実用段階に入りつつある。また、コンピュータ応用技術分野においては、人間の思考形態に近づけたファジー理論、ニューロなどを利用した判断処理技術は、電力設備においても導入され、その成果を上げている。

こうした状況から、本研究は、光計測技術とコンピュータ応用技術を組合せ、送電線路の故障原因を推定するシステムを構築することを目的に、中性点抵抗接地系を対象に人工故障時の電流、電圧波形の解析および判別を行い、自動化システムの可能性を見極めたものである。

2. 故障原因と電圧電流波形の特徴

送電線路の故障は、原因別に以下の4種類に大別できる。

- (1) 雷／開閉サージによる気中閃絡
- (2) 汚損、冠雪、着氷雪などによる沿面閃絡

- (3) 他物接触による閃絡
- (4) 有機絶縁物の劣化による閃絡

これら4種類の内、他物接触による閃絡以外は、研究例が多いため、ここでは、他物接触による閃絡について検討を進めることとした。

他物接触による閃絡は、接触物の性状のみならず、その物の接触のしかたによって、閃絡時の電圧、電流波形が異なるものとする。接触物としては、鳥獣、樹木、導電性の飛来物やクレーンのアームなどが想定でき、それぞれ接触時の表面および内部の抵抗が異なる。接触物の種類と抵抗値の分類を表1に整理した。

樹木の絶縁破壊は、初期の抵抗値に対応したもれ電流が表面を流れることによって、順次炭化導電路が形成され、最後に電極が閃絡できる距離に達したときにファイナルな閃絡に至り、大きな続流電流が流れるものと考えられる。従って、閃絡までの時間と電流・電圧の関係と炭化導電路の形成は、次の関係式に従うものとする。

$$V \cdot I \cdot t = k \cdot C \cdot \rho \cdot L \cdot S \cdot \Delta T \cdots (1)$$

ここで、
 V：対地電圧
 I：地絡電流
 t：ファイナルフラッシュオーバーまでの時間
 k：係数
 C：比熱容量
 ρ：比重
 L：対地間距離
 S：炭化した部分の平均断面積
 ΔT：発火温度と気温の差

従って、線路電圧が分っている場合、樹木の抵抗値によって前駆電流の継続時間が決まる。

鳥獣の絶縁破壊は、鳥獣の構成要素が主に筋肉、表皮および体液、血液などで構成されていることから、電流は、抵抗値の低いところを通りファイナルフラッシュオーバーに至ると考えられる。

金属抵抗による地絡は、金属物の抵抗値が地絡電流によって変化しないことから、接触抵抗、金属接触物のもつ抵抗値および回路定数で定まる地絡電流が継続するものとする。

表1 接触物の種別と抵抗値範囲

Table 1. Classification of contact objects and resistance ranges.

抵抗値	接 触 物
数100 Ω以下	鳥獣の内部、クレーン等の金属物
数kΩ～数100kΩ	鳥獣の表面、樹木
数100kΩ以上	樹木

3. 人工地絡試験による電流電圧波形の調査

送電線路の故障発生時の電流電圧波形は、前項の検討結果で分るように、故障原因となる接地導電物のみならず、変電所側の接地抵抗値、線路インピーダンスおよび線路電圧に左右される。このため、実線路で発生する故障時の電流電圧波形を人工試験によって模擬し、観測するために巨長1.2kmの(財)電力中央研究所赤城試験センターの22kV低接地系統の模擬線路を用いて人工地絡試験を実施した。

〈3.1〉試験回路および供試試料 試験回路を図1に示す。故障時の電流電圧は、雪平氏の論文⁽¹⁾で示されているようにmsオーダーの波形となることから、数10kHz以上の波形まで計測できる測定器とした。電流計測用CTは、巻線型の計測用CT(～20MHz)と光CT(～50kHz)を用いた。また、電圧計測用としては、各相電圧計測用に分圧器(～1MHz)を用い、更に、分圧器を人工地絡を行う極間に設置し、その2次側にポッケルス素子とO/E変換器(～50kHz)を取付けた。

供試試料の一覧を表2に示す。試験に用いた地絡物については、小動物はできるだけ生きた状態で、樹木等は伐採直後のものとし、自然状態を再現することに注力した。

〈3.2〉試験結果 地絡現象を特徴づける電流電圧波形は、地絡の初期段階から最終的なフラッシュオーバーに至るまでの間に種々変化を示す。以下に外的な地絡物による閃絡現象に絞って試験結果をまとめ、検討を進めた。

図1 人工試験回路(電力中央研究所赤城試験センター)
 Fig. 1. Block diagram of the artificial ground fault test.

表2 人工試験供試試料
Table 2. Test samples.

想 定 故 障	供 試 試 料		初期抵抗値[Ω]	試験回数
樹 木 接 触	樹 木	さんご樹, くりの木	約100 ～350k	0
		柳	幹200k, 枝1M	0
		樺, 竹, 桜, どんぐり 楠, 高	約20～3 M	30
		にわとり	数10～600k	3
鳥 獣 害	へ	しまへび	約10～600k	2
	び	うなぎ	約 5 ～ 8 k	6
ケーブル事故	地絡不良		0	0
碍子沿面閃絡	汚損(0.1mg/cm ²) [等価霧中法]		—	3
	氷(着氷雪)		～1.3 M	9
人工的飛来物	金 属 棒		0～1 k	25
人工的接地物	カーボンロッド		～ 4 M	6

(1) 樹木

樹木の電流電圧波形の代表例を図2に示す。この図から分かるように、地絡電流は、かなりの時間継続し、その後ファイナルフラッシュオーバーに至っており、前駆期間とファイナル期間に大別できる。

前駆期間の継続時間と注入エネルギーの計算結果を表3に示す。尚、注入エネルギーの計算は、第(1)式の左辺に従い、前駆期間の電流値、電圧値の瞬時値の積を時間積分したものである。

樹木の地絡現象は、前駆期間に小さなもれ電流によって、地絡物の炭化が生じる。炭化導電路の先で更に放電が生じ、最終的に全経路が低抵抗の炭化導電路になるまで継続し、ファイナルフラッシュオーバー期間に至る。これは、継続期間の注入エネルギーと樹木の比熱と体積から計算した炭化に必要なエネルギー量とオーダー的によく一致したことから裏付けられる。ここで、炭化導電路体積は、実験後のサンプルの炭化断面積から想定したものである。

(2) 鳥獣

鳥獣類の波形例としてへびと鳥の波形を図3に示す。前駆期間は、比較的短時間で終了しており、上記のような注入エネルギー的な観点からすれば、鳥獣の表面の皮肉層から低抵抗の血管まで至るところまでは、注入エネルギー量に関連するが、その後は、鳥獣の低抵抗層を電流が流れ、フラッシュオーバーに至るものとする。鳥の場合は、皮肉層がうすく血管が太く抵抗が小さいため、2～3サイクルでフラッシュオーバーに至る。これに比べへびは、血管が皮肉層の中の方にあり、細いため、皮肉層を10数Aの電流が流れ、炭化導電路が形成されフラッシュオーバーに至るものとする。

(3) 導電性接触物

カーボンロッドの地絡時の波形を図4に示す。これによれば、ファイナルフラッシュオーバー期間の最初には、パルス状の電流波形が観測され、その後、アーク継続期間中、交流の地絡電流が継続する。

表3 フラッシュオーバー前の注入エネルギー
Table 3. Poured energy before flashover.

供試試料	前駆期間継続時間	注入エネルギー	炭化エネルギー
樹木 (樺)	約11秒	107000J	96000J
	約22秒	95000J	
へび	約7秒	61000J	—

*) 炭化エネルギーの計算式

$$[\text{炭化エネルギー}] = [\text{炭化係数}] \times [\text{比熱容量}] \times [\text{比重}] \times [\text{極間距離}] \times [\text{炭化断面積}]$$
$$\times [(\text{発火温度}) - (\text{気温})]$$

図2 樹木による電流電圧波形
Fig. 2. Ground fault voltage-current-waveform by trees.

図3 へびと鳥の電流電圧波形
Fig. 3. Ground fault voltage-current-waveform by snakes and birds.

図4 カーボンロッドによる電流電圧波形
Fig. 4. Ground fault voltage-current-waveform by carbon rods.

4. 故障原因判別の自動化の可能性

故障時の電流波形と故障原因の基礎検討並びに人工模擬試験の結果から、故障電流波形の特徴と故障原因の間にはある程度の関連が見出された。従って、電流波形の特徴を何らかの形で数値化、パターン化できれば、故障原因判別の自動化が可能であると考え。そこで、故障原因判別を行うコンピュータシステムの基礎検討を行った。

＜4.1＞ 故障様相判別システムの基本構想 故障様相判別システムの基本構想を図5に示す。第3項までの検討および人工試験結果から分かるように、故障電流波形は、多くの高周波成分が含まれており、故障原因との因果関係がみられる。このため、故障電流波形は、高周波成分まで計測される必要があり、変電所の送電端に設置されている従来の巻線型CTによる計測では高周波特性が悪く不十分であると考え。本システムでは、この計測手段として、線

路に容易に設置可能な碍子型光CTを用いた。光CTは、導体を取り囲むように鉄心を配置し、鉄心の一部をカットした部分にファラディセンサを取り付けて、ギャップ中の磁界を検出する方式⁽²⁾とした。課電側と接地側との間の光信号の伝送は、光ファイバを磁器の中に内蔵した碍子を用いた。⁽³⁾ 光CTは、送電線の電源側に当る変電所の送電線引出し部にそれぞれ設置し、故障電流を検出するものとした。故障電流波形は、3相の光CTで検出したものを零相電流として合成し、一旦記録し、親局側に電話を用いて伝送し、親システムで集約解析するものである。

＜4.2＞ 故障原因判別方法 故障電流波形の特徴を周波数スペクトルに置き換え重判別分析法とニューラルネットワーク手法を用いて検討した。判別手順は以下の通り。

- ① 電流波形の最大振幅での波形の正規化
- ② 周波数解析
- ③ 周波数パワースペクトル密度特徴抽出
- ④ 判別分析

＜4.3＞ 故障電流波形の周波数スペクトル 判別分析に先立って、人工地絡試験波形の周波数スペクトル分析を行った結果の例を図6に示す。この図は、ファイナルフラッシュオーバーの前後の波形を周波数解析したもので、各供試料別に並べた左側がフラッシュオーバー前、右側がフラッシュオーバー後の解析結果を示している。これによると、初期抵抗値の低い金属棒は、接触後、即時にフラッシュオーバーに至り、続流が流れるため、商用周波数成分がほとんどであり、他の試料と相違が明確に区分できる。また、沿面閃絡現象を模擬した氷や汚損などは、フラッシュオーバー後は、高周波成分がほとんど見られないことも特徴として上げられる。

図5 故障様相判別システムの基本構想図
Fig. 5. Block diagram of conception of the system.

図6 電流波形の周波数スペクトル
Fig. 6. Frequency spectrum analysis of current waveform.

＜4.4＞ 重判別分析手法による判別結果 送電線保守の立場から故障原因を表2に示すように、樹木接触、鳥獣、碍子沿面、人工物の4群に分類した。それぞれの群の故障電流波形のファイナルフラッシュオーバー前後3波のパワースペクトルを求め、50～700Hzの間の高調波（1次～14次）をデータとして抽出し、トータル28変数とした。

全28変数による判別分析によって得た固有値の大きい2

図7 全28変数による分析結果例

Fig. 7. An example of the result of discriminant analysis

つの軸平面における各サンプルと各群の重心の位置関係を図7に示す。これによると、金属と樹木がよく分離しているが、鳥獣の群や碍子沿面の群は、他の群との分離が悪い、すなわち判別がむづかしいことが分る。

28変数の内、特徴的な周波数として、9変数を選び出し、それらの全データを用いて判別式を表4に示すように作成した。この判別式の判別性能を評価するためには、理想的には、判別式の作成に使用したデータ以外のデータを母集団から得て、テスト評価すべきであるが、今回の場合には、追加データが容易に得られない状況にある。そこで、再度、使用した全データを用いて判別分析すると共に、Leave One Out 法によって、データを抽出し、判別分析を行った。その結果、全データを使用した場合で、90.8%、Leave One Out 法の場合で82.9%であり、いずれも80%以上の判別率が得られた。

＜4.5＞ ニューラルネットワーク手法による判別結果

今回の判別では、入力層、隠れ層、出力層の3層構造によるバックプロパゲーションモデル⁽⁴⁾を採用した。入力層は、ファイナルフラッシュオーバー前後の1次～14次の高調波パワースペクトルの内、特徴的な周波数を変数とし、出力層は、判別結果として分類した4群とした。

ニューラルネットワークの学習は、通常、訓練データ集合、テストデータ集合に分けて、両データを使い分けて行うべきであるが、今回の場合は、データ数が76件と少ないことから、テストデータを全データ：76件とし、訓練データを全データ（76件）、全データの2/3（51件）、全データの1/2（38件）として、ネットワークの構築と判別率の評価を行った。尚、ネットワークの入力データは、ネットワーク内部の伝達関数（Sigmoid 関数）に対応し、各入力

表4 重判別分析の判別式
Table. 4. Discrimination equation by the multi-discriminant analysis.

判別 群	定 数	変 数								
		B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	A 1	A 2	A 3	A 4
鳥獣	21.5293635	-0.2528043	-0.9416579	1.7643179	-0.9667305	-0.2608494	-0.7273116	-0.2923499	-1.6509595	-1.8269616
金属	6.8530396	-0.2301135	-0.4101591	0.9691309	-0.3707034	-0.1746721	-0.3179379	-0.0892916	-1.0810161	-1.8253108
汚損	29.6399664	-0.4783749	-0.7894151	1.4312657	-0.3922019	0.2378340	-1.1200635	-0.0516327	-1.7743726	-5.0013189
樹木	61.6884499	-0.6070808	-1.3822254	2.7966013	-1.2033326	-0.2775922	-1.2631350	-0.3128229	-2.9778350	-5.1570920

注1) B 1～B 5 : フラッシュオーバー前3波分のパワースペクトル
A 1～A 4 : フラッシュオーバー後3波分のパワースペクトル

変数ごとに値の範囲が平均 0, 絶対値の最大 1 となるよう線形変換した。

重判別分析手法の場合と同様の 9 変数を入力層として使用し、隠れ層を 5, 6, 7 変数とした場合の判別結果を表 5 に示す。これによると判別率は、77.63 %～98.68 %の範囲にあり、比較的高い判別率を示すことが分った。また、隠れ層のユニット数をここでは、5, 6, 7 と変化させたが、判別率に影響しなかった。

＜4. 6＞ 自動化の可能性評価 重判別分析手法とニューラルネットワーク手法を用いた判別結果では、フラッシュオーバー前後で電流波形に特徴が見い出され、良好な判別結果を得た。この結果から、送電線設備の亘長が長く、地絡故障の実績の多い77kV抵抗接地系に置き換えてみると、電圧が 3.5 倍になっているため、第(1)式の考え方から鳥獣のような比較的低抵抗体は、1 サイクル以下でフラッシュオーバーに至ることが予測できる。また、樹木では、数10A 程度の電流の継続時間が22kVに比べ 1/3になるものと予測できる。従って、77kV抵抗接地系においては、地絡物の抵抗値の差

が大きく表われ、4 種類（樹木、鳥獣、汚損、金属棒）の分類は、可能であると考ええる。

次に、重判別分析手法とニューラルネットワーク手法による判別結果を比較してみると、今回の判別結果からすると、データを統計的に取り扱って処理した重判別分析手法の方が良好な判別結果が得られた。ニューラルネットワークによる判別は、学習させることができるので、新しいデータを取り入れて判断学習を行い改善できる点で、重判別分析のように固定した判別式を用いる方式に比べ、最終的に正解率の高いシステムができる可能性がある。今回は、データ量が不足しており、十分な判別正解率を得ることができなかったが、今後、データ量が増えれば、正解率を向上させることができると考える。

5. まとめ

送電線路の保守業務の合理化、効率化を目的に、光計測技術とコンピュータ応用技術を組合せ、送電線路の故障原因を推定するシステムに関する基礎検討を行った。これまで、送電線路を模擬して実際の地絡物による人工試験で電流、電圧の波形データを収集し、その生波形データを用いた判別分析を行った例はなく、今回の判別分析結果から、判別の自動化の可能性が見い出された。これらのことから、送電線の保守業務に活用できる故障様相判別システムの実現の可能性が見極められたので、今後は、実線路での故障電流波形による判別性能の評価を進め、本システムの実用化を図って行きたい。最後に、本研究の中で、人工試験を実施するに当たり、多大なる御指導、御協力をいただいた財電力中央研究所の主任研究員の雪平氏と横田氏に厚く御礼申し上げます。

表5 ニューラルネットワークによる判別結果例
Table. 5. An example of the result of the neural network analysis.

隠れ層 ユニット数	訓練データ数別判別結果					
	全データ	A(2/3)	B(2/3)	C(2/3)	D(1/2)	E(1/2)
5	90.79	94.79	89.47	86.84	84.21	78.95
	7	4	8	10	12	16
	21600	14600	14000	14600	12960	12960
6	93.42	88.16	85.53	84.21	77.63	84.21
	5	9	11	12	17	12
	21600	14600	14000	14600	12960	12960
7	98.68	90.79	94.74	85.53	84.21	81.58
	1	7	4	11	12	14
	21600	14600	14000	14000	10800	12960

注1)入力層：9 変数，出力層：4 群

隠れ層：ユニット数を 5, 6, 7 としてネットワークを設定した。

注2)訓練データ：全データ，全データの中の2/3 および全データの中の2/1 を訓練データとして選択した。

テストデータ：全ケース共に全データを使用した。

注3)表中の枠内の見方

90.79	←判別正解率
7	←誤判別データ数
21600	←訓練回数

文 献

- (1) 雪平：「配電線の間欠弧光地絡時における電流波形形状の解明と故障点探査への適用」電力中央研究所報告 185 016 (1985)
- (2) 後藤, 緒志, 川口, 勝川, 阿部：「変電所故障区間検出装置の開発」平成元年電気学会全国大会No.1245(1989)
- (3) Y. Yamagata, T. Oshi, H. Katsukawa, S. Kato, Y. Sakurai : Development of Optical Current Transformers and Application to Fault Location Systems for Substations, IEEE 92 SM 351-7 PWRD(1992)
- (4) 麻生英樹：「ニューラルネットワーク 情報処理」産業図書(株)

(平成 5 年 10 月 12 日受付)

荒金 昌克 (正員) 1939 年 6 月 22 日生まれ。1958 年 3 月 大分工業高校電気科卒業。同年 中部電力(株)入社。現在、同社技術研究所に勤務。主として、送電線の故障対策および雷サージ解析に関する研究に従事。

横谷 宗久 (正員) 1952 年 9 月 1 日生まれ。1977 年 3 月 名古屋大学電気工学科卒業。同年 中部電力(株)入社。現在、同社技術研究所 研究主査。主として、送電関係の雷対策および設備保守技術に関する研究に従事。

勝川 裕幸 (正員) 1954 年 7 月 6 日生まれ。1979 年 3 月 名古屋大学大学院修士課程修了。同年 日本碍子(株)入社。現在、同社電力事業本部 機器装置技術部に勤務。主として、光変流器などの光計測技術やそれらを応用した電力設備の監視システムの開発研究に従事。

鹿野 保 (非会員) 1956 年 7 月 20 日生まれ。1979 年 3 月 名古屋工業大学情報工学科卒業。同年 日本碍子(株)入社。現在、同社生産技術本部情報システム部に勤務。主として、製造・管理に関する情報処理システムの設計開発業務に従事。

徳山 幸司 (非会員) 1964 年 8 月 31 日生まれ。1990 年 3 月 北海道大学理学部物理学科卒業。同年 日本碍子(株)入社。現在、同社電力事業本部ガイシ技術部に勤務。主として、碍子装置の設計業務に従事。