

GPS 利用送電線路故障点標定システム

東京電力株式会社 黒澤 潔¹・近藤 礼志²
エネルギー・配電事業部 天野 一夫³

Fault Location System for Power Transmission Lines Using GPS

K. Kurosawa, R. Kondo, and K. Amano

サージ受信型の電力ケーブル故障点標定装置は、故障点の早期発見・復旧に資するため、主に超高压系線路に導入がはかられている。本装置は、電力ケーブル地絡故障発生時のサージ電流の線路両端への到達時間差を GPS 同期信号を利用して特定するものである。サージ電流検出には電磁誘導型センサが適用されており、変電所等の強電磁ノイズ環境下での使用については信頼性の面で課題があった。そこで、ファラデー効果を利用した光ファイバ電流センサを故障点標定装置に適用したところ、良好な結果が得られたので報告する。

Surge-receiving-type fault location systems have recently been used for fast recovery of underground transmission lines from ground faults. Electromagnetic induction type sensors have mainly been used for detection of surge currents. However, they are susceptible to electromagnetic noise, which causes unstable system operation. To solve this problem, we have developed an innovative system using optical fiber current sensors.

1. ま え が き

地中送電線路での地絡故障発生時に変電所から故障点までの距離を標定することで故障箇所を特定し、線路を迅速に復旧するためのサージ受信型故障点標定装置（以下、標定装置と称す）が実用化されている¹⁾。本標定装置は故障と同時にケーブル内を伝搬する高周波サージ電流を検出し、故障点を特定するものである。

これまで、サージ電流検出には主に CT、ロゴウスキーコイル等の電磁誘導型センサが用いられてきたが、装置が設置される変電設備環境下では、電磁ノイズの影響を受け易く、標定装置の信頼性が課題となっていた。そこで、磁気光学効果（ファラデー効果）によりサージ電流を検出する光ファイバ電流センサを開発し、実線路への適用をはかった。

本報では標定装置の構成・動作、光ファイバ電流センサの原理・基本構成・特長、検証試験および実線路への適用について述べる。

2. 標 定 装 置

図 1 に光ファイバ電流センサ²⁾³⁾をサージ電流検出に用いた標定装置の全体構成を、表 1 に標定装置の標準仕様を示す。標定装置は、光ファイバ電流センサ 2 セット、子局 2 台、親局 1 台およびそれら装置のデータ伝送路で構成されている。光ファイバ電流センサは、各相のケーブル終端接続部に取付けられ、地絡故障時の各相サージ電流を検出する。子局は、光ファイバ電流センサから送られるサージ電流波形をもとに、サージデータ情報を親局へ伝送する。親局では、子局からの情報をもとに故障点を特定する。

標定原理は以下の通りである。ケーブルに地絡故障が発生した場合、故障点からケーブル両終端方向に向かってサージ電流が伝搬する。その伝搬速度はケーブル絶縁体の誘電率等により光速の約 45～60% となり、故障点からセンサまでの距離に比例して到達時刻に差が生じる。その時刻を GPS 衛星からの信号を利用した標定装置により高精度に測定し、相互の時間差から故障点を特定する。図 1 における変電所 A から事故点までの距離 X は、(1) 式で示される。

$$X = (L - v \Delta t) / 2 \dots \dots \dots (1)$$

L: 線路長

v: サージ伝搬速度

Δt : 線路両端へのサージ到達時間差

1 技術開発研究所スペシャリスト（工学博士）
2 技術開発研究所
3 エンジニアリング部グループ長

表 1 故障点標定装置標準仕様
Table 1. Specifications of fault location system.

項目	仕様
対象線路	地中線, 架空線, 海底線, および, それらの複合線路 6.6 kV ~ EHV クラス AC/DC
故障種類	地絡, 短絡, 断線, 雷撃
監視回路数	2 回線/ユニット (別ユニットの追加により拡張可能)
故障点検出用センサ	光ファイバ電流センサ, 電磁界センサ, ログウスキーセンサ, CT
標定精度	地中線 <+/- 50 m 架空線 <+/- 300 m
タイミングカウンタ精度	25×10^{-9} s
故障検出分解能	約 2 m (地中線)
通信インターフェース	LAN, シリアル, 電話回線, その他の通信装置
標定試験機能	擬似標定による自動システムチェック
アラーム発生条件	故障標定時, または, ユニット故障時
寸法・重量	マスターステーション: パソコンの仕様による ローカルステーション: W450 × H177 × D296mm, 15kg

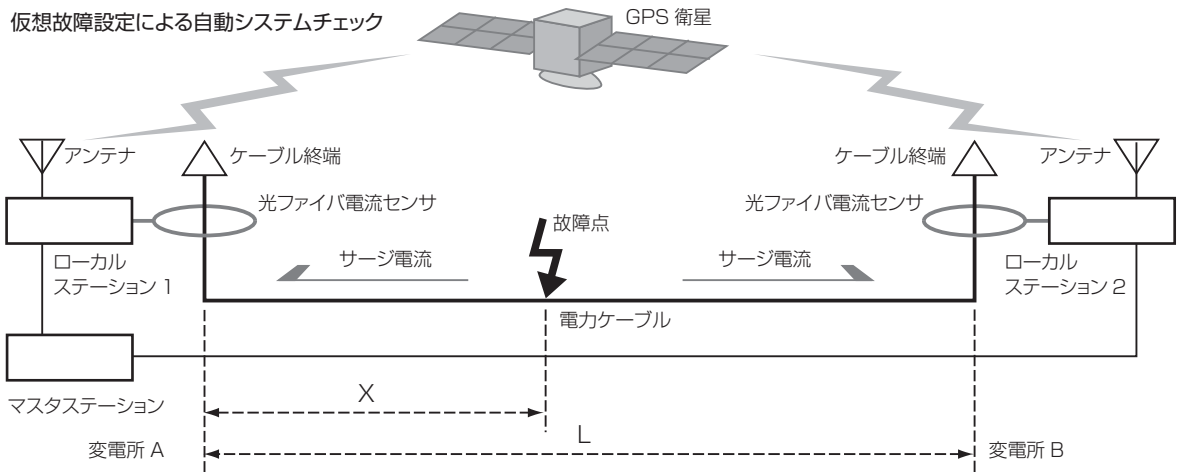


図 1 地中線故障点標定装置
Fig.1. Fault point locating system for underground transmission lines.

3. 光ファイバ電流センサ

3.1 検出原理

図 2 に光ファイバ電流センサの検出原理を示す。磁界中に置かれた透明媒質に光を通過させると、磁界の強さに比例して光波の振動方向（偏波面）が回転する。これはファラデー効果とよばれる。光ファイバ電流センサは、センサ素子（ファラデー素子）である光ファイバを通過するファラデー効果の量すなわちファラデー回転角を検出することにより、磁界の強さ（電流）が計測できる。ファラデー回転角の一般式を (2) 式に示す。これよりファラデー効果は磁界の強さと磁界を受ける素子の長さに比例することがわかる。また、素子固有のファラデー効果の感度を表したものがヴェルデ定数である。

$$\theta_F = V_e \cdot H \cdot L \dots\dots\dots (2)$$

- θ_F : ファラデー回転角 (度)
- V_e : ヴェルデ定数 (度/A)
- H : 磁界強度 (A/m)
- L : 光波路長 (m)

3.2 基本構成

光ファイバ電流センサの基本構成を図 3 に示す。センサファイバには低複屈折ガラスファイバ⁴⁾を適用している。光源からの光が偏光子によって直線偏光に変えられた後、センサファイバに入射し、先端に取り付けられたミラーで反射し光源側へ戻ってくる。センサファイバの中では、導体を流れる電流の周囲に発生する磁界によりファラデー効果が生じる。センサファイバ中を反射して戻ってきた光は、検光子に入射し、偏光方位が直交する 2 本のビームに分離される。検光子を通過した 2 つの光の強度は偏波面の回転に応じて変化する。センサ出力と被測定電流の間の直線性を確保するため、偏光子と検光子の主軸方位には通常 45° の差（光学バイアス）が設けられる。検光子通過光は、それぞれ受光ファイバで電子回路部に送られ、受光素子により受光強度に比例した電気信号に変えられる。

3.3 特長

光ファイバ電流センサの特長を以下に示す。

- a. 小型軽量: CT のように鉄心を有しないこと、および絶縁が容易であることから、装置の小型・

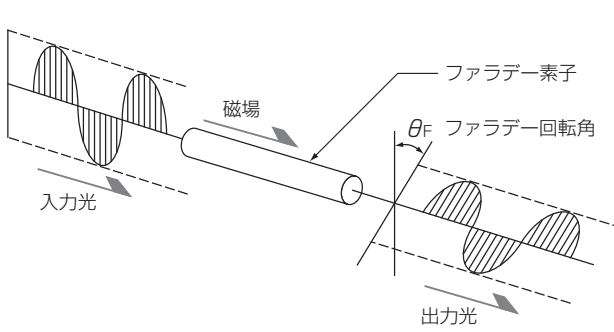


図2 ファラデー効果
Fig.2. Faraday effect.

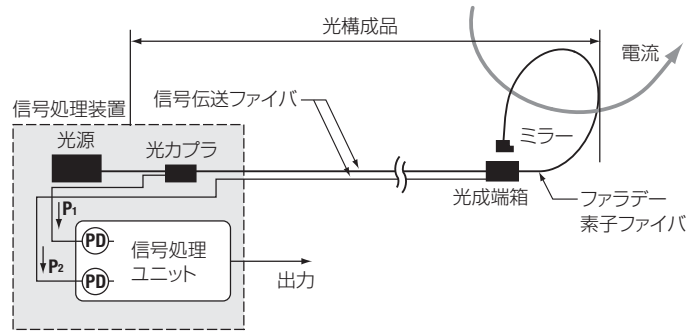


図3 光ファイバ電流センサの構成
Fig.3. Configuration of optical current sensor.

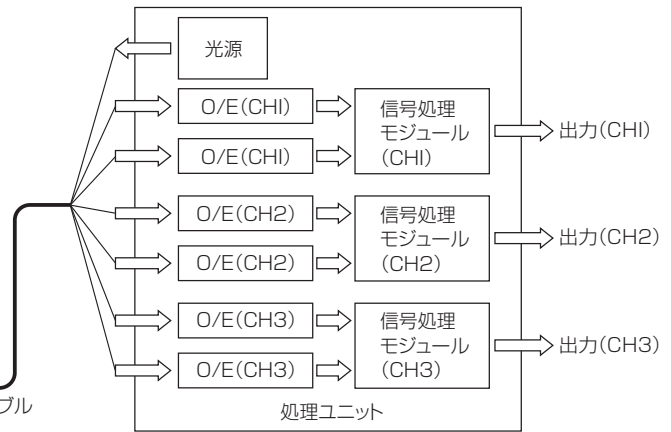
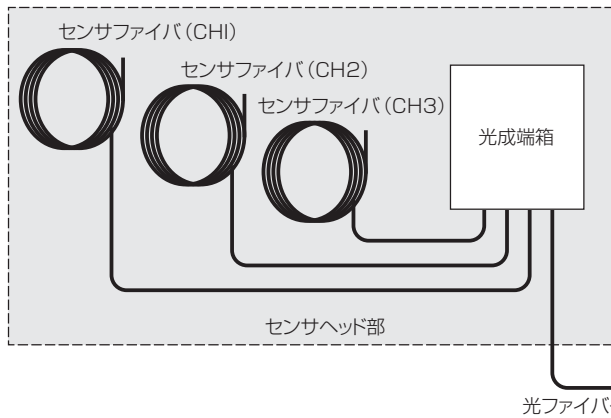


図4 サージ電流検出用センサの構成
Fig.4. Configuration of surge current sensor.

軽量化がはかれる。

- b. 取付容易：柔軟性があるため取付対象の形状に合わせることができ、線路停止も不要である。
- c. 耐電磁雑音：センサ部が光学部品で構成されているため、電磁誘導雑音の影響を受けない。
- d. 測定範囲大：低周波から高周波まで、また大電流まで高精度に計測することが可能である。さらに、鉄心の磁気飽和による特性の劣化がない。
- e. 長距離信号伝送：信号伝送を光ファイバで行うため、波形歪と伝送損失が小さく、長距離伝送が可能である。

4. サージ電流検出用センサ

4.1 仕様

表2にサージ電流検出用光ファイバ電流センサ⁵⁾の仕様を示す。三相のサージ電流を検出する用途から、測定数を3チャンネルとし、周波数特性を250 kHzまで対応可能な仕様とした。

4.2 構成

図4にサージ電流検出用光ファイバ電流センサの装置構成を示す。装置は、センサファイバ、光成端箱、光ファイバ信号伝送路および信号処理装置で構成され

表2 サージ電流検出用光ファイバ電流センサ標準仕様
Table 2. Standard specifications of optical fiber surge current sensor.

項目	仕様
チャンネル数	3チャンネル
使用環境	センサ：屋外 電子機器：屋内
電流測定範囲	100 A - 2 kA (ピーク値) 精度：> ± 5%
周波数特性	50 Hz - 250 kHz (flat)
応答時間	立上がり時間：< 1 μs
電源	AC 100 V : 50/60 Hz

る。センサファイバは、難燃性のライナーチューブに収納されている。信号処理装置からの出力信号（電流波形）が標定装置に入力される。

5. 検証試験

5.1 サージ電流検証試験

インパルス電流発生装置により三相分のセンサファイバに電流値100～2000 A、立上がり時間1 μsec、正極性および負極性のサージ電流を通電し、基準CT出力および各相の信号処理装置出力をデジタルオシロスコープで計測した。図5に正極性2000 A通電時の

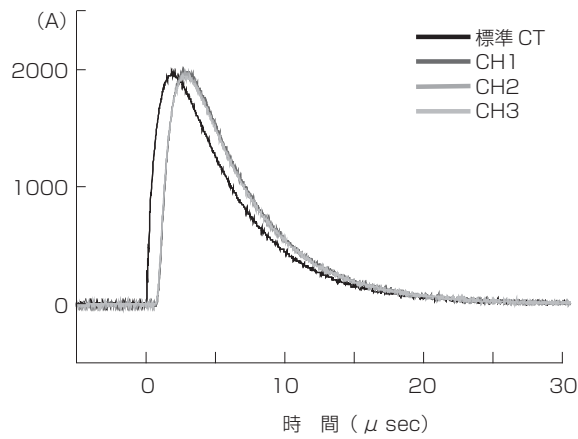


図5 センサ出力波形

Fig.5. Output waveform of surge current sensor.

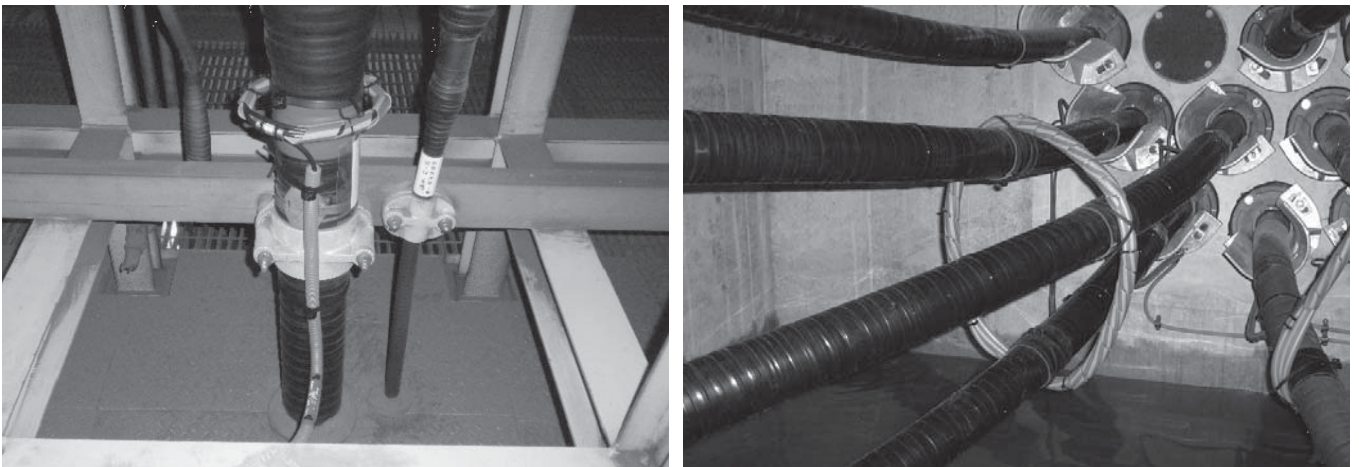


図6 実線路に設置されたセンサファイバ

Fig.6. Installed sensor fiber for actual cable lines.

標準 CT および信号処理装置各相出力波形を示す。標準 CT 出力波形に対する信号処理装置各相出力波形の比誤差は $\pm 2\%$ 以内、遅れ時間は約 800 nsec であり、標定精度に影響を与える各相間の時間差はほとんど認められなかった。

5. 2 実線路での検証

実線路での実証試験を実施した。対象線路は亘長約 16 km の 275 kV OF ケーブル線路である。試験構成は、図 1 に示した故障点標定装置と同等であり、故障点の模擬は A 変電所内の遮断器投入による開閉サージを利用した。

計測された波形は、電磁環境の厳しい変電所内においても、ノイズ電圧が 20 mV 以下（電流換算で 5 A 以下）であり、光ファイバ電流センサの特長である耐ノイズ性が実証された。5 回の試験結果から最大誤差は 48 m であり、実用上十分な精度を有することが確認された。

6. 実線路への適用

センサファイバの電力ケーブルへの取り付け方法の検討を行い、154 kV、275 kV および 500 kV 地中送電

線へ標定装置が導入されている。図 6 に実線路へのセンサファイバ取付け状況を示す。いずれもケーブルにセンサファイバを巻き付ける固定方法を採用した。センサ設置現場の状況によりケーブル三相一括での設置も可能となった。実用化に際しては、実線路を使用した実証試験と同様に、変電所遮断器の投入による開閉サージを使用してサージ伝搬速度の測定およびサージ電流波形を測定した。これらのデータをもとに標定装置の最適設定を行い、実線路での運用を開始した。

7. むすび

光ファイバ電流センサを用いた故障点標定装置の地中送電線実線路への適用について述べた。これまでのログウスキーコイル等の電磁誘導型センサを使用した標定装置と比較して、耐ノイズ性の面で大変優れており、高精度かつ安定した標定動作が確認でき、高い信頼性を実現できた。光ファイバ電流センサと GPS を利用した標定装置は順次実線路へ導入されて、現在まで国内外の 20 数線路への適用がはかられている。

今後、単一ケーブル線路のみならず、架空線路・ケーブル線路との混在線路への適用が期待される。

謝辞

光ファイバ電流センサ利用故障点標定装置の開発にあたり、実線路での試験にご協力頂きました東京電力株式会社江東支社地中送電保守グループの方々、センサ装置開発を担当して頂きました東光電気株式会社工務部および山口達史氏、白石康寛氏および塩澤大五郎氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 天野一夫：「電力ケーブル線路の新しい故障点標定システム」平成12年電気学会全国大会 7-S35-3, 2000
- 2) 黒澤潔：「電力設備用光ファイバ電流センサ」, レーザ研究 Vol.33 No9, pp.592-597, 2005
- 3) 黒澤潔, 廣木良治, 白川和臣：「小型・フレキシブルな光ファイバ電流センサ」, 第30回光波センシング技術研究会講演論文集, No.LST30-19, pp.133-140, 2002
- 4) 黒澤潔, 吉田知, 坂本和夫, 増田勲, 山下俊晴：「鉛ガラスから製造した光ファイバのファラデー効果を利用した電流センサ」電学論B, Vol.116-B, No.1, pp.93-103, 1996
- 5) S.Nasukawa, R.Kondo, K.Kurosawa, T.Yamaguchi, K.Amano, T.Yamada: "Application of Optical Fiber Current Sensors to Underground Cables" Proc.7th JICABLE Conference, Session A.5, Diagnostics(2), No.A5.5, June 2007, Paris, 2007
- 6) 黒澤潔, 近藤礼志, 那須川慎介, 山口達史, 天野一夫：「光ファイバ電流センサを用いた地中送電線事故点標定装置の開発」電力技術・電力系統技術合同研究会資料, pp.37-41, 2007