

光ファイバ電流センサ適用装置の実用化と光 CT 開発の取組

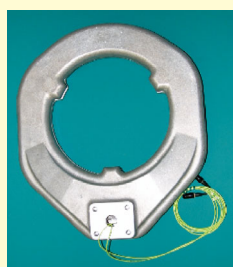
山口 達史
Tatsushi Yamaguchi

板倉 英治
Eiji Itakura

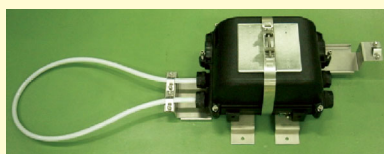
光ファイバ電流センサ 適用装置の実用化



検出盤

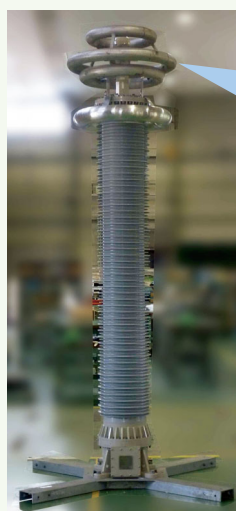


変電所故障区間検出装置用
光ファイバ電流センサ



ケーブル故障検出装置用
光ファイバ電流センサ

光 CT 開発の取組 (高精度化技術)



光 CT 部



電流検出部



MU(マーキングユニット)

220 kV 自立型光 CT

左側：東光高岳がこれまでに実用化した光ファイバ電流センサ適用製品の一例
(検出盤は変電所故障区間検出装置用)

右側：開発中の 220 kV 自立型光 CT

計測用 0.2S 級、保護用 5TPE 級の確度を有する。光 CT の出力は IEC 61850-9-2 に準拠したデジタル出力であり、オールデジタル変電所への適用が可能である。

ファラデー効果を利用した光ファイバ電流センサは、①電磁誘導ノイズの影響がない、②小型・軽量である、③磁気飽和がないためダイナミックレンジが広い、④広帯域である、⑤長距離信号伝送が可能であるなど、優れた特長を有している。

東光高岳は 1995 年から鉛ガラスファイバ型の光ファイバ電流センサの要素技術開発および用途探索に着手し、1999 年に日本で初めて光ファイバ電流センサ適用製品となる変電所故障区間検出装置を実用化した。その後、ケーブル故障検出装置（短絡検出用）、ケーブル故障検出装置（短絡・地絡事故検出用）、サージ受信形ケーブル故障点標定装置を実用化している。

一方、2008 年から電力分野で使用される計器用変成器への実用化を目指した光 CT の研究開発に取り組んでいる。最初に開発した 500 kV 自立型光 CT は確度階級が計測用：0.5 級、保護用：5TPE 級であり、IEC 61850-9-2 準拠の出力によってオールデジタル変電所への適用が可能である。また開発に際し光 CT の性能評価を行うため、デジタル計測誤差試験装置も合わせて開発した。その後、海外市場の要求仕様を満足する、高精度化を図った 220 kV 自立型光 CT を開発した。本装置の確度階級は計測用の 0.2S 級を実現しており、中国電力科学研究所武漢分院（武漢試験場）による誤差検証において良好な結果を得ている。

1. はじめに

ファラデー効果^{注1)}を利用した光ファイバ電流センサは、①電磁誘導ノイズの影響がない、②小型・軽量である、③磁気飽和がないためダイナミックレンジが広い、④広帯域である、⑤長距離信号伝送が可能であるなど、優れた特長を有している。東京電力株式会社と HOYA 株式会社が開発した光弾性係数^{注2)}が小さい鉛ガラス製光ファイバをファラデー素子として使用した光ファイバ電流センサ⁽¹⁾は、高精度な電流計測を実現している。

東光高岳は、鉛ガラスファイバ型の光ファイバ電流センサの要素技術開発や用途探索を 1995 年から開始し、1999 年に変電所故障区間検出装置を実用化した。また、2008 年から計器用変成器の実用化を目指した光 CT の研究開発に取り組んでいる。

本稿では、以下の 4 つの光ファイバ電流センサ適用装置の概要および光 CT 開発の取組を紹介する。

- ・変電所故障区間検出装置
- ・ケーブル故障検出装置（地絡事故検出用）
- ・ケーブル故障検出装置（短絡・地絡事故検出用）
- ・サージ受信形ケーブル故障点標定装置

2. 光ファイバ電流センサ適用装置

2.1 変電所故障区間検出装置⁽²⁾

本装置は、変電所の母線で発生した事故区間を特定する装置であり、事故点の早期発見ならびに健全設備の復旧時間の短縮に有効である（図 1）。母線保護継電装置動作時に、断路器に取り付けられた光ファイバ電流センサで事故電流を検出し、その出力を断路器の支持がいしに内蔵した光ファイバを介して検出盤に光伝送し、検出盤にて事故区間を特定する（図 2）。

電氣的絶縁が容易、小型・軽量（断路器の支持がいし本来の機能に影響を及ぼさない）という光ファイバ電流センサの特長を活かしている。

2.2 ケーブル故障検出装置（地絡事故検出用）⁽³⁾

地中送電線（以下、地中ケーブルと記載）の事故はケーブルの絶縁破壊に至っている場合がほとんどで、送電停止による絶縁特性の回復を期待することはできない。本装置は、架空送電線と地中ケーブルが混在する系統において地中ケーブルに発生した事故を検出し、再閉路機能をロックする信号を出力する装置である。地中ケーブル両端の架空送電線との接続点（以下、架地接続点と記載）に、地絡事故時に発生する零相電流を検出する光ファイバ電流センサを設置し、その出力を検出盤に光伝送し、電流差動リレーで地絡事故判定を行う（図 3、図 4）。光ファイバ電流センサはマンホールに設置可能な IPX7（JIS C 0920）の防水性能を有している。長距離伝送が可能であるという光ファイバ電流センサの特長を活かし、最大 20 km の光ファイバ伝送路に適用可能である。また、分岐線を含んだ地中ケーブルの分岐点およびケーブル

端に光ファイバ電流センサを取り付けることにより、地絡事故の発生区間（本線／分岐線）を特定することができる⁽⁴⁾。

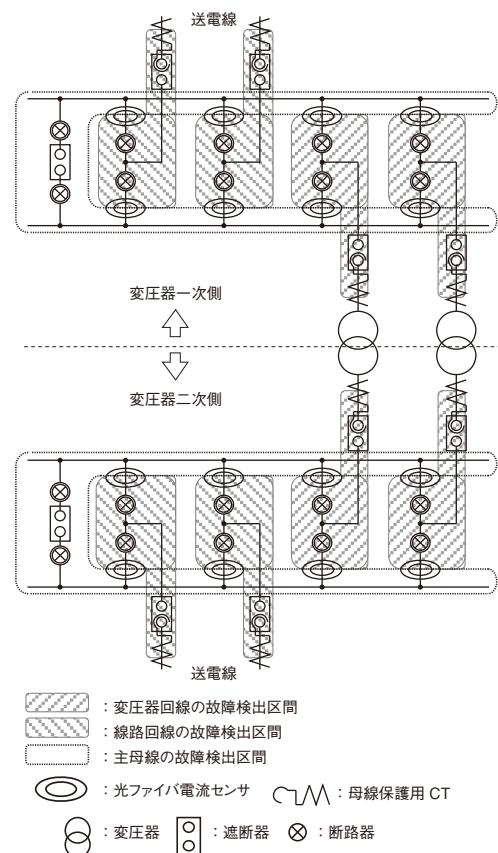


図 1 超高压変電所における故障区間検出装置の検出区間の一例



図 2 変電所故障区間検出装置の外観

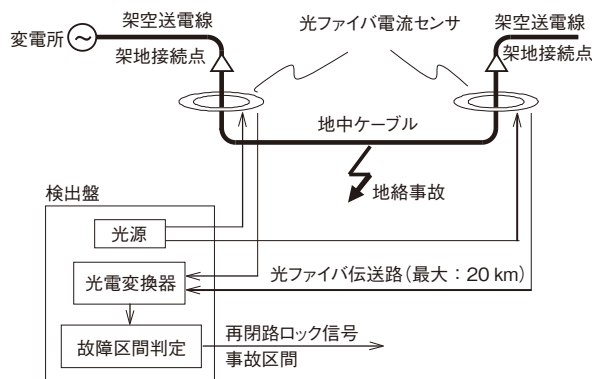


図3 ケーブル故障検出装置（地絡事故検出用）の構成

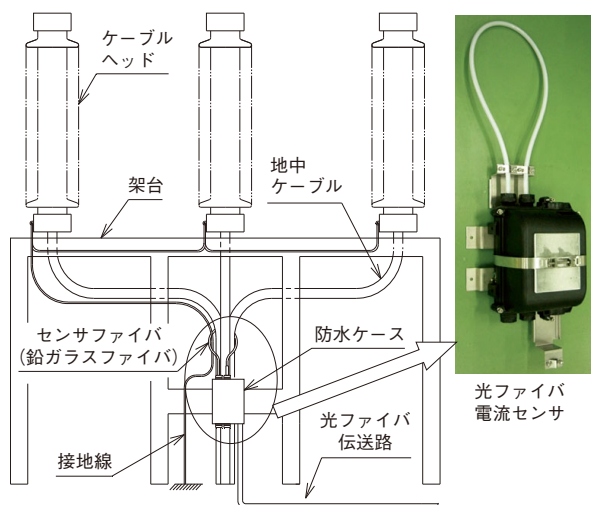


図4 光ファイバ電流センサの取付構造

2.3 ケーブル故障検出装置（短絡・地絡事故検出用）⁽⁵⁾

本装置はケーブルの短絡および地絡事故を検出する装置である（図5）。地中ケーブル両端の架地接続点の各相に設置した光ファイバ電流センサにより、異なる光波長（ λ_1 , λ_2 , λ_3 ）で電流計測し、その出力を検出盤に波長分割多重（WDM）伝送し、電流差動リレーで短絡事故判定を行う。また、光電変換器内で各相電流を合成することで零相電流を求め、地絡事故の判定を行う。WDM 伝送技術を利用することにより、伝送路に使用する光ファイバ数量を削減した。

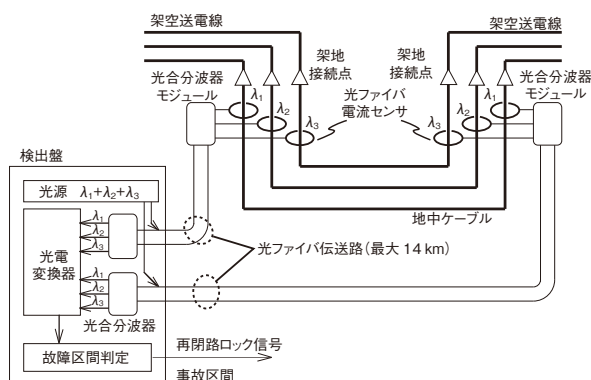


図5 ケーブル故障検出装置（短絡・地絡事故検出用）の構成

2.4 サージ受信形ケーブル故障点標定装置⁽⁶⁾

本装置は、ケーブル故障区間検出装置（地絡事故検出用）に故障点標定機能を追加した装置である。地中ケーブルで地路事故が発生すると地絡点でサージが発生し、そのサージはケーブルの両端に向かって伝搬する。地中ケーブル両端に設置した光ファイバ電流センサによりサージを検出し、各センサへのサージ到達時間差より事故点の位置を特定する（図6）。66 kV ~ 275 kV の恒長 20 km までの地中ケーブルの事故点を標定誤差 50m 以内で検出可能である。

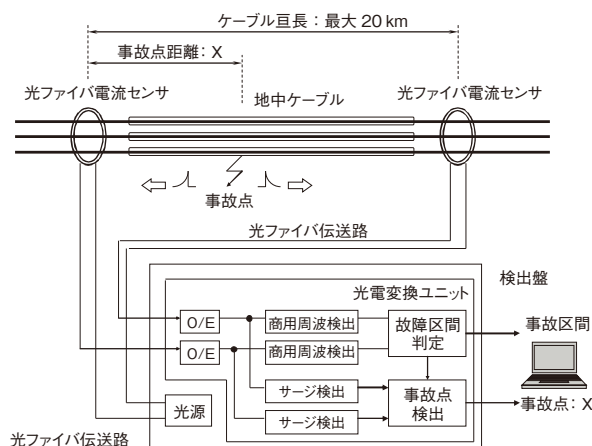


図6 サージ受信形ケーブル故障点標定装置の構成

3. 光CT開発の取組

3.1 開発概要

近年の変電所デジタル化の潮流から光 CT のニーズが高まり、海外メーカを中心に実用化に向けた開発が進められている。東光高岳においても光 CT を次世代の変成器と位置づけ 2008 年から開発に着手し、自立型光 CT の開発を通してデジタル出力に関する検討やデジタル計測誤差試験装置の構築、さらには光 CT の高精度化の検討等、実用化に向けた研究開発を実施中である。

3.2 500 kV 自立型光 CT の開発⁽⁷⁾

自立型光 CT は、センサ側のノイズ対策やサージ対策が不要であることから機器の信頼性に優れ、またデータ出力を IEC 61850-9-2⁽⁸⁾ に準拠しておりオールデジタル変電所に対応可能である。

本装置の構成は、ファラデー効果により電流を検出する光 CT 部と、変調された光信号を電気変換して信号処理演算および通信を行う MU（Merging unit）からなっている。光 CT 部は、ポリマーが管の上部に電流検出部を取付けた構造であり電界緩和シールドを設けている（図7（a），（b））。MU は、光 CT の信号処理機能とデータ通信機能を有し、大電流時に発生する非直線性誤差と温度依存性による電流検出誤差の補償を行い計測精度の最適化を図っている（図7（c））。

光 CT の性能検証は、IEC 60044-8 (2002E) に準拠した形式試験を行い、設計目標値を十分満足することを確認している。



図 7 500 kV 自立型光 CT の装置構成

3.3 デジタル計測誤差試験装置の開発⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

光 CT の性能評価について、従来はアナログ出力により行ってきたが、500 kV 自立型光 CT の開発に際してデジタル出力での性能評価に対応するべく IEC 60044-8 および IEC 61850-9-2 の規格に準拠した誤差試験装置を開発し、デジタル出力型光 CT の誤差測定環境の基盤を構築した (図 8)。

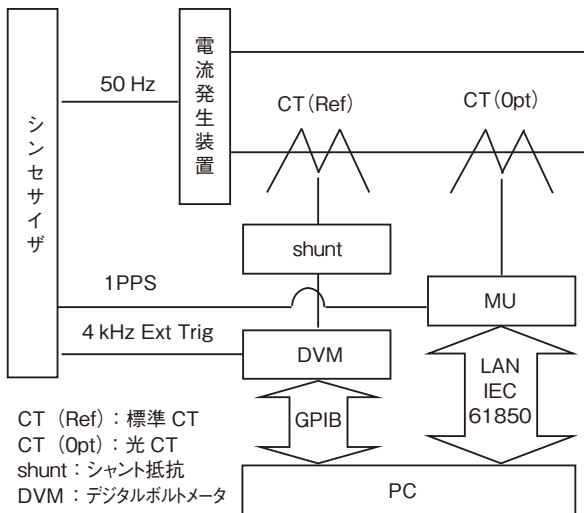


図 8 誤差試験装置ブロック図

3.4 光 CT の高精度化⁽¹¹⁾

海外市場の要求仕様ならびに競合メーカーの開発仕様等を調査した結果、光 CT の更なる高精度化の必要性が明確となった。計測・計量用途に適用するため、IEC 60044-8 Class 0.2S の精度と、寒冷地域および温暖地域

に位置する変電所への適用を考慮した周囲温度の対応を合わせて実施した。表 1 に光 CT の仕様比較 (確度階級と周囲温度) を示す。

表 1 光 CT の仕様比較 (確度階級と周囲温度)

項 目	従来仕様	中国仕様	高精度仕様
確度階級	計測用 IEC 0.5	IEC 0.2S	同 左
	保護用 IEC 5TPE	同 左	同 左
周囲温度	光 CT 部 $-20 \sim +40^{\circ}\text{C}$	$-40 \sim +55^{\circ}\text{C}$	$-40 \sim +60^{\circ}\text{C}$
	MU $-5 \sim +40^{\circ}\text{C}$	$-5 \sim +45^{\circ}\text{C}$	$-10 \sim +55^{\circ}\text{C}$

光 CT 部の周囲温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ 、MU の周囲温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ の範囲において、IEC Class 0.2S を満足する性能が得られた (図 9、図 10)。

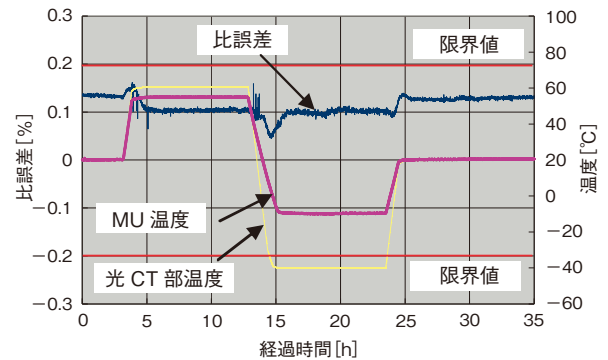


図 9 温度サイクル誤差試験結果 (比誤差)

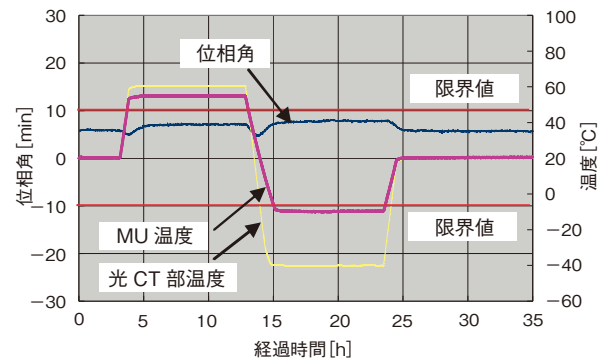


図 10 温度サイクル誤差試験結果 (位相角)

3.5 光 CT の中国武漢試験場による誤差検証⁽¹²⁾

東光高岳が中国市場に参入するためには、中国の公的な認証機関である武漢試験場にて光 CT の型式認定を取得する必要がある。その第一ステップとして、武漢試験場において IEC 60044-8 規格 (中国では、GB/T20840.8-2007 が同規格となる) と IEC 61850-9-2 規格に準拠した 220 kV 自立型のデジタル出力方式光 CT の誤差試験を行った (図 11)。なお、試験に際し、東光高岳誤差試験装置による測定も併せて行った。試験の結果、IEC 0.2S の確度階級を満足することができ、また武漢試験場の誤差試験装置の測定結果と比較して、東光高岳誤差試験装置の測定精度の妥当性を確認した。(図 12、図 13)

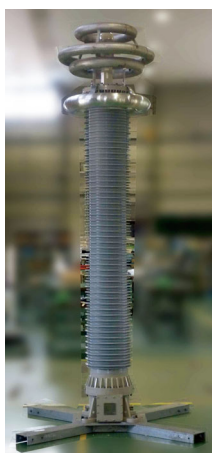


図 11 光 CT 部

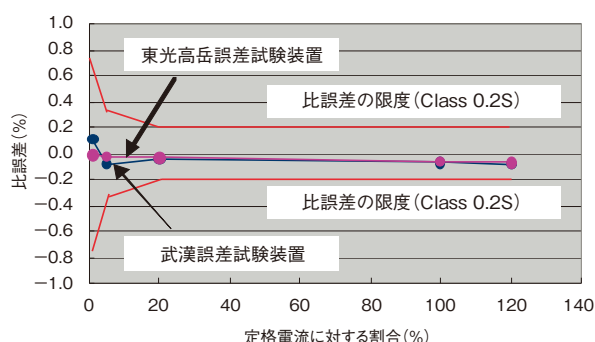


図 12 誤差試験結果の比較 (比誤差)

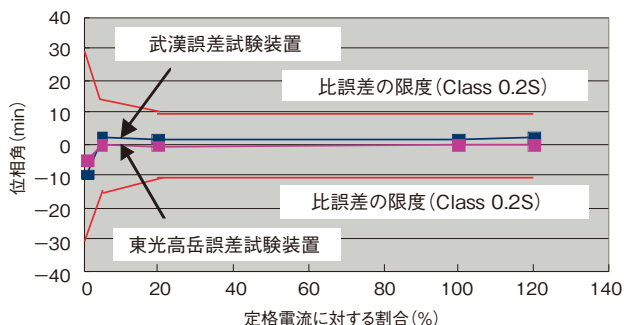


図 13 誤差試験結果の比較 (位相角)

4. おわりに

本稿では、東光高岳における光ファイバ電流センサ適用装置の実用化、および光 CT 開発に対する取組状況について述べた。今後は光ファイバ電流センサの特長を活かし、光ファイバ電流センサ適用装置の電力分野への適用拡大を推進していくとともに、オールデジタル変電所に適用可能な光 CT の実用化に向けて一層の努力をしていきたい。

参考文献

- (1) 黒澤, 吉田, 坂本, 増田, 山下:「鉛ガラスファイバ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, No. 1, pp.93-103 (1996)
- (2) 板倉, 植木, 平野:「光 CT 方式変電所故障区間

検出装置」, 高岳レビュー, Vol.50, No.1, pp.10-13 (2005)

(3) 島岡, 栢木, 黒澤, 白川, 山田, 板倉:「光 CT を応用した電流差動方式によるケーブル故障検出装置の開発」, 電気学会保護リレーシステム研究会, PPR-05-15, pp.27-30 (2005)

(4) 那須川, 近藤, 板倉, 植木:「光電流センサ式事故区間検出装置」, 高岳レビュー, Vol.53, No.1, pp.2-6 (2008)

(5) 栢木, 平田, 黒澤, 近藤, 山田, 板倉:「光 CT の波長分割多重伝送技術を用いたケーブル事故区間検出装置の開発」, 電学論 B, Vol.130, No. 1, pp.49-54 (2010)

(6) 谷川内, 嘉屋, 椎野, 板倉, 山田:「サージ受信形ケーブル故障点標定装置の開発」, 電学全大, 6-307 (2013)

(7) 山口, 塩澤, 六戸, 木田, 張:「自立型光 CT の開発」, 電学論 B, Vol.132, No.5, pp.415-421 (2012)

(8) 大谷, 今井, 天雨, 牛尾他:「変電所デジタル監視制御システムに対する IEC61850 適用の基礎検討 (その 1)」, 電気学会研究会資料, PPR-10-22, pp.113-118

(9) 山田, 昆, 橋本, 山口, 矢澤, 近藤, 黒澤:「光ファイバ電流センサの性能評価試験」, 電学全大, No. 6-220, p.400 (2011)

(10) 山口, 橋本, 小磯, 塩澤, 矢澤:「デジタル出力型光 CT の性能評価」, 東光電気技報, No. 16, pp.5-7 (2011)

(11) 山口, 橋本, 小磯, 塩澤, 矢澤:「高精度光 CT の開発に向けた特性改善」, 東光電気技報, No. 17, pp.4-7 (2012)

(12) 山口, 橋本, 小磯, 川崎, 上月:「光 CT の中国武漢試験場による誤差検証」, 東光電気技報, No. 18, pp.34-37 (2013)

語句説明

注 1) ファラデー効果: ファラデー効果とは透明物質に直線偏光を入射したとき、直線偏光の進行方向にかかる磁界の強度に比例して偏光面が回転する現象。

注 2) 光弾性係数: 光ファイバなどの光学素子に外力を加えたときに生じる複屈折の大きさを示す定数。光弾性係数が大きいと温度や振動により光学素子を通過する偏光状態が変化し易くなるため、光ファイバ電流センサの計測精度を低下させる。



山口 達史
技術開発本部
技術研究所
ICT 技術グループ 所属
光 CT・光 VT 他光変成器の開発・設計に従事



板倉 英治
電力プラント事業本部
制御装置製造部
保護制御装置設計グループ 所属
光ファイバ電流センサ適用装置の開発・設計に従事