

直流送電システム用光CT

Optical Current Transformer for High-Voltage DC Transmission Systems

村尾 武 平田 幸久 佐々木 欣一

■ MURAO Takeru

■ HIRATA Yukihisa

■ SASAKI Kinichi

光ファイバをセンサとして用いる光CT (Current Transformer) は、小型軽量で絶縁特性に優れ、交流電流はもとより直流電流も高精度に計測できる。直流送電 (HVDC: High Voltage DC transmission) システムは、DC250 kVという高電圧主回路の直流電流を検出するため直流CT (DCCT) を多数用いており、光CTの特長を生かすことのできる適用分野である。

東芝は、HVDCシステムのケーブル保護用として光計測の特長を生かした光CTを開発し、電源開発(株)北海道・本州間電力連系(以下、北本連系と略記)設備の古川ケーブルヘッドにおける実フィールド試験検証を経て、2009年度中に商用器の製造に着手する予定である。

An optical current transformer (CT) is a small, lightweight, and high-dielectric-strength optical current sensor applying an optical fiber for sensing that can measure not only alternating current (AC) but also direct current (DC). In the field of high-voltage DC (HVDC) systems, many DC current transformers (DCCTs) are utilized for measuring DC current in high-voltage circuits up to DC 250 kV.

Toshiba has developed an optical DCCT for submarine cable protection in HVDC systems and evaluated this sensor through field verification tests at the Furukawa Cable Head Station in the Hokkaido-Honshu HVDC Link. As a result, we have confirmed the effectiveness of the optical DCCT and are aiming to commercialize the product in FY2009.

1 まえがき

光ファイバをセンサに用いた光CT (Current Transformer) は、小型かつ軽量で、電磁ノイズに強く、応答特性や周波数特性に優れるなど、従来方式のCTに比べて優れた特長があり、未来のCTとして実用化が期待されている。東芝は長年にわたる研究開発により、温度変化や外部機械振動の影響を低減し、光CTの特性を長期安定化するなど、実用化への課題を克服してきた。

電流センサが軽量で大口径化が可能という光CTの特長を最大限生かすことが確認できる場として、直流送電 (HVDC: High Voltage DC transmission) システムの直流送電線ケーブルヘッドブッシングの直流CT (DCCT) 設置位置がある。当社は、プロトタイプ器 (試験器) による約1年にわたる実フィールドでの実用性能検証を、電源開発(株)との共同研究として実施した。2009年度中に商用器の製造に着手する予定である。

ここでは、光CTの測定原理及び、光DCCTプロトタイプ器による実用性能検証結果について述べる。

2 HVDCシステムとDCCT

HVDCシステムは、送電端及び受電端の交直変換所と直流送電線路から成る大容量送電システムである。送電端の変換

器で交流を高電圧の直流に変換し、直流線路で受電端まで送電したのち受電端の変換器で直流を交流へ変換する(図1)。

交流送電ではケーブルの静電容量や架空線路のインダクタンスの影響を強く受けるため、ケーブルで50 km程度以上又は架空線で数100 km以上の大容量送電には、交流送電よりも直流送電が適する。わが国では、津軽海峡を横断する北本連系設備、紀伊水道を横断する紀伊水道直流連系設備がある。

HVDCシステムでは、回路各部の直流電流をDCCTで検出して保護、制御及び監視に用いている。図1は、HVDCシステムのDCCT適用位置及び用途の例を示したものである。HVDCシステムを安全かつ安定に運転するためDCCTは重要な役割を担っており、必要十分な電気的特性を備えるとともに高い信頼性が要求される。

3 光CTの原理と特徴

3.1 光CTの原理と構成

光CTのセンサ部を図2に示す。センサとなるセンサファイバは導体の周りに巻かれて設置される。また、センサファイバの端部には鏡が設けられ、光ファイバ内を伝播(でんぱ)してきた光を折り返す構成としている。

センサ部に入射した光(入射光)は、センサファイバ内を通過するとき、一次導体を流れる電流の作る磁界によって光に

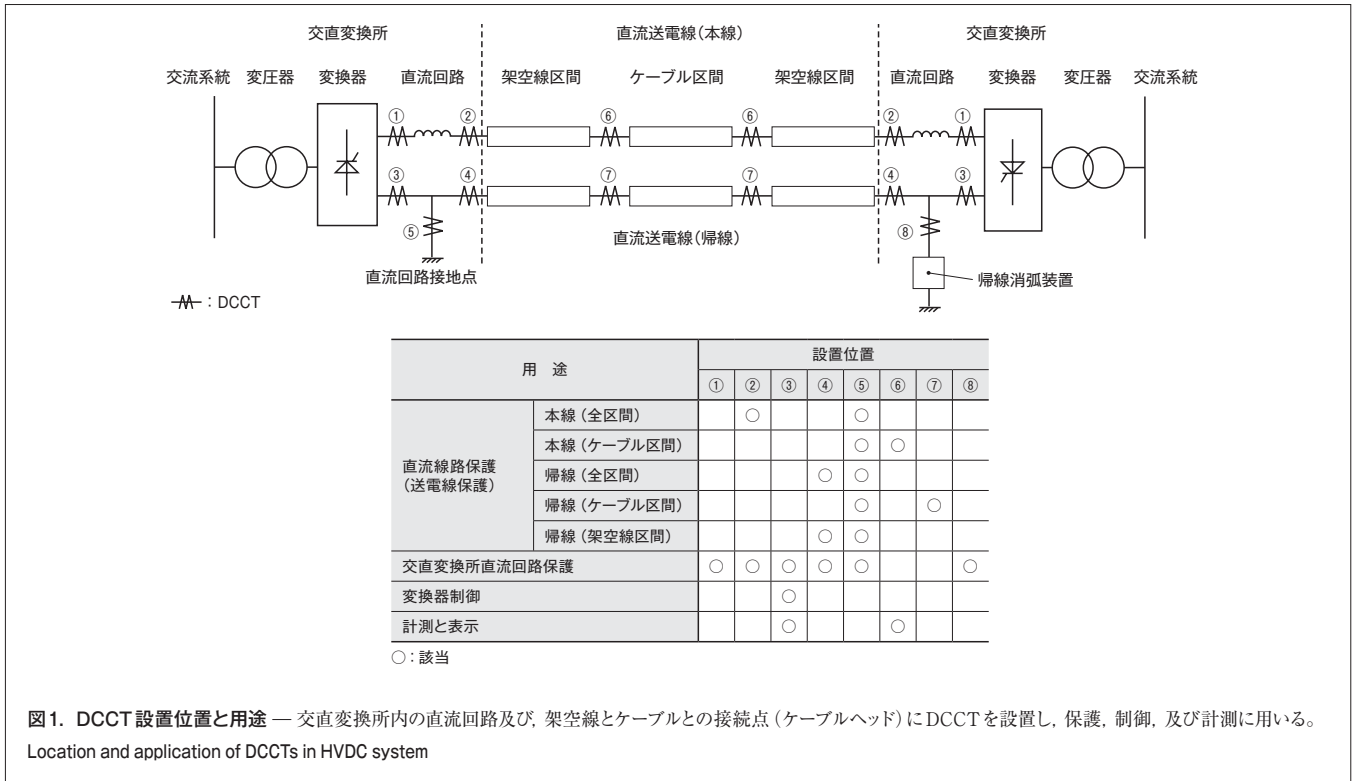


図1. DCCT 設置位置と用途 — 交直変換所内の直流回路及び、架空線とケーブルとの接続点 (ケーブルヘッド) に DCCT を設置し、保護、制御、及び計測に用いる。
Location and application of DCCTs in HVDC system

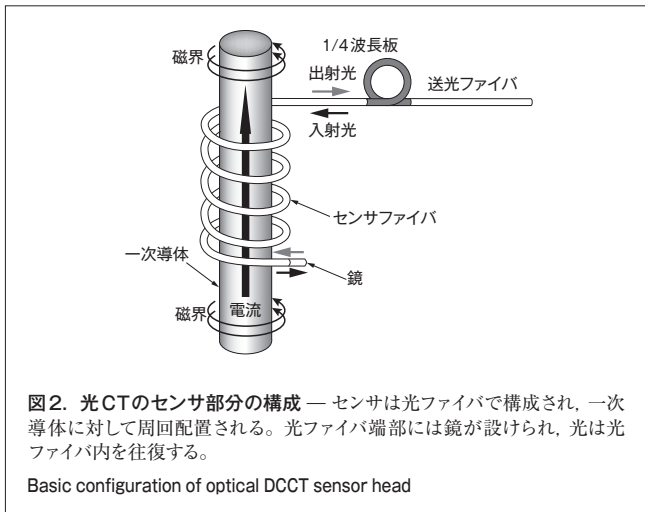


図2. 光 CT のセンサ部分の構成 — センサは光ファイバで構成され、一次導体に対して周回配置される。光ファイバ端部には鏡が設けられ、光は光ファイバ内を往復する。
Basic configuration of optical DCCT sensor head

位相シフトが生じる。この現象をファラデー効果と呼び、図3に示すようにセンサへの入射光とセンサからの出射光の間に位相差が生じる。この位相差は電流の大きさに比例するため、位相差を光量変化として検出することで電流の大きさを知ることができる。位相シフトは電流の極性によって正負が変わるため、直流と交流の区別なく電流を測定できる。

図2の光CTの場合、電流の大きさを I 、センサファイバの巻数を n とすると、検出される光の位相差 ϕ は、(1)式で表される。

$$\phi = 4 n V I \quad (1)$$

ここで、 V は光ファイバのベルデ定数といわれる物性値であ

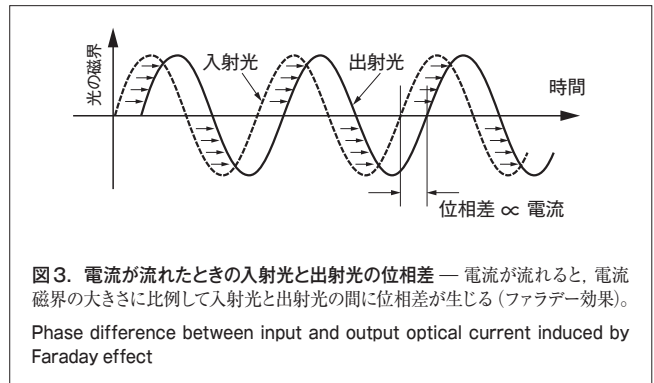


図3. 電流が流れたときの入射光と出射光の位相差 — 電流が流れると、電流磁界の大きさに比例して入射光と出射光の間に位相差が生じる (ファラデー効果)。
Phase difference between input and output optical current induced by Faraday effect

り、石英の光ファイバを用い、光源の波長が λ の場合(2)式で定まる。

$$V = 2.8 \times 10^{-6} \times (\lambda / 850)^2 \text{ (rad/A)} \quad (2)$$

3.2 光CTの特徴と利点

DCCTとしては、ホール素子形CT、クレーマ形CT、零磁束形CTなどがよく知られている。いずれのCTも、測定する電流が作る磁束を鉄心コアで捕捉 (ほそく) する構成であり、電気的に検出を行っている。

ホール素子形CTは、捕捉磁束をホール素子で検出して電流を計測する。鉄心二次巻線に電流を流して捕捉磁束を相殺するようにホール素子と二次巻線の間でフィードバック回路を組んだ、高精度ホール素子形CT (零磁束形CTの一例) もある。

クレーマ形CT⁽¹⁾は、鉄心の磁化特性を利用したCTであ

表1. DCCTと光DCCTの比較

Comparison of conventional DCCT and optical DCCT

項目	従来のDCCT	光DCCT
基本構成	<p>鉄心コア、二次巻線、出力、抵抗、磁束検出 (CT, ホール素子など)、補助電源</p>	<p>磁界、鏡、光ファイバ、磁界、1/4波長板、信号処理ユニット</p>
基本測定原理	ホール効果、零磁束制御など	ファラデー効果
センサ重量	鉄心を用いるため重い	光ファイバをセンサとするため軽い
耐ノイズ性	電気式のため弱い	光学式のため強い
電氣的安全性	電気式のため感電の危険性あり	光学式のため安全 (散乱光も安全)
大口徑化	鉄心の磁歪振動などの対策必要	光ファイバ巻径を大きくすることで容易

る。鉄心二次巻線に補助電源から電圧を印加し、鉄心の励磁特性と測定する電流の磁束に応じて二次巻線の励磁電流が変化するため、その励磁電流から電流を計測する。二つの鉄心コアを用いたタイプが一般に用いられている。

零磁束形CTは、複数の鉄心コアを用い、測定電流の磁束を相殺するように二次巻線に外部電源から電流を流し、電流値を算出する。フィードバック制御を行い高精度で広帯域なDCCTを実現している。

これら従来のDCCTは、いずれも電気式センサであるため、サージなどの電磁ノイズの影響を受けやすく、絶縁にも注意が必要である。また、鉄心を用いるためセンサ自体が重量物であり、CTを大口徑化する際には鉄心の磁歪 (じわい) 振動などが課題となる。

一方、光CTはセンサに良好な絶縁体である光ファイバを用いるため、センサ自体は軽く、絶縁性にも優れている。光による計測のため、センサ自体は電磁ノイズの影響を受けにくい²⁾。また、光ファイバの巻径を大きくすることで、センサの大口徑化が容易である。そのため、既存ケーブルヘッドブッシングに設置するDCCTとして光CTを適用することとした。

従来のDCCTと光CTの比較を表1に示す。

4 光DCCTの実用性能検証

4.1 開発仕様

今回開発した光DCCTは、高経年機器である北本連系設備第1極ケーブルヘッドのケーブル保護用クレーマ形DCCTを代替できるものとした。

ケーブルヘッド碍管 (がいかん) とケーブルを分解しケーブル側に直径約50 cmのCTを取り付ける工法では、長期間の工事が必要でHVDC設備の運転を大きく制約する。このた

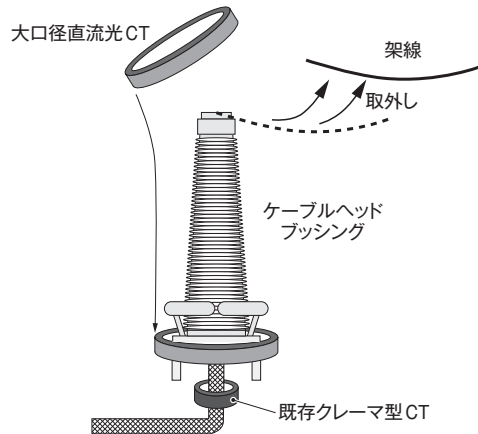


図4. 大口徑直光CTの取付け工事 — 既存クレーマ型CTの交換には、ケーブルヘッドの分解が必要となる。大口徑直光CTを用いることで、架線を外すだけで設置が可能である。

Installation of optical DCCT

め、光ファイバをセンサとして使用する光CTは、センサヘッドのサイズを据付け条件に合わせて任意の大きさにできるという特長を生かし、光DCCTを外径1.5 mのケーブルヘッドブッシングの根元に設置できる内径1.6 m、外径2 mのサイズとし、ケーブルヘッドブッシング頭部の架線の取外しだけで据付け工事をできるようにした (図4)。このため設備の運転制約は最小限となる。

今回開発した光CTの基本仕様を表2に示す。定格一次電流はDC ±1,200 A、最大測定電流はDC ±3,600 A、二次定格出力電圧はDC ±15 Vであり、既存設備であるクレーマ形CTの仕様に準拠することとした。

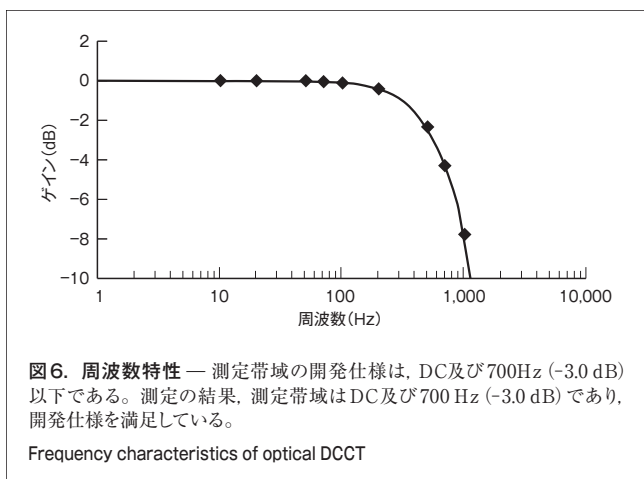
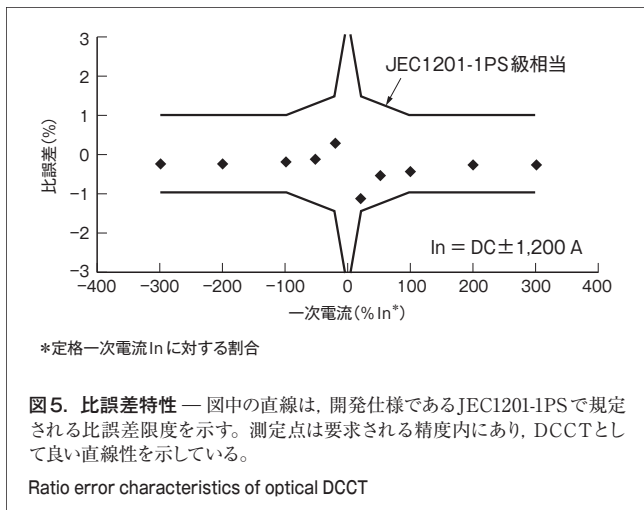
表2. 開発した光DCCTの基本仕様

Specifications of newly developed optical DCCT

項目	仕様
センサヘッド直径	約2 m
定格一次電圧	DC ±250 kV
定格一次電流	DC ±1,200 kA
最大測定電流	DC ±3,600 A
定格二次出力	DC ±15 V
精度階級	JEC1201-1PS級相当 (交流規格を直流に適用し、低電流領域での誤差基準を厳しくした)
測定帯域	DC及び700 Hz (-3.0 dB) 以下
センサヘッド部周囲温度	-25 ~ 40 °C
信号処理ユニット周囲温度	0 ~ 40 °C (-10 ~ 50 °Cを1日数時間許容)

4.2 工場試験結果

フィールド試験前に、工場において、開発した光CTのセンサヘッドと光信号を電気信号に変換する信号処理ユニットを組み合わせて、諸特性の試験を実施した。



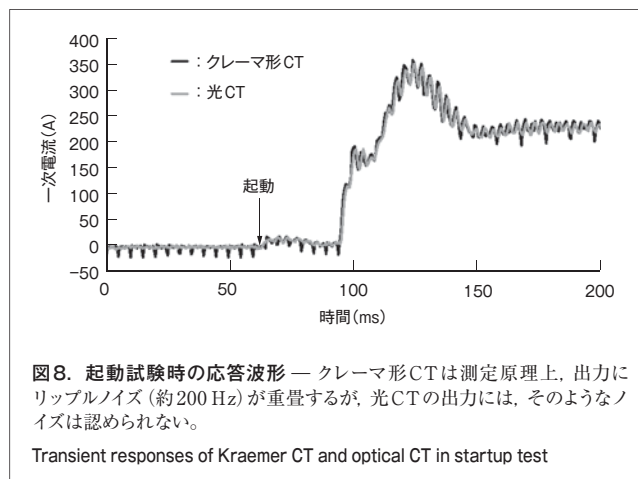
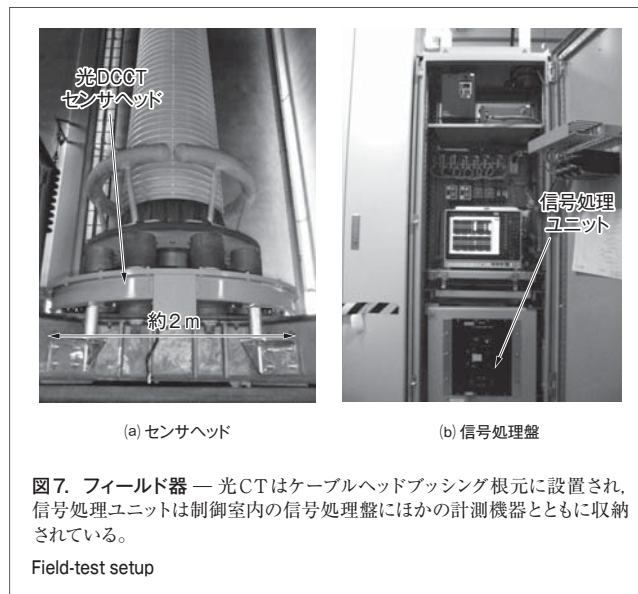
代表的な試験結果として、比誤差特性と周波数特性を図5及び図6に示す。比誤差特性は、開発仕様であるJEC1201（電気学会電気規格調査会標準規格1201）-1PS級相当を満足し、DCCTとして良い直線性を示すことを確認した。周波数特性も、DC及び700 Hz (-3.0 dB) 以下であり、開発仕様どおり十分な測定帯域が確保されている。

4.3 フィールド試験結果

フィールド試験は、2008年2月から約1年間の共同研究として、北海道と本州の間を直流連系している電源開発（株）北本連系設備の古川ケーブルヘッドステーションで実施した。ケーブルヘッドブッシングの根元に設置したセンサヘッドと、制御室内に設置した信号処理ユニットを収納した信号処理盤を図7に示す。

CTは、HVDCシステムの起動停止や故障時の速い電流変化に追従する必要がある。そのため、系統連系試験で応答特性の確認を行った。代表例として起動試験の過渡応答波形を図8に示す。

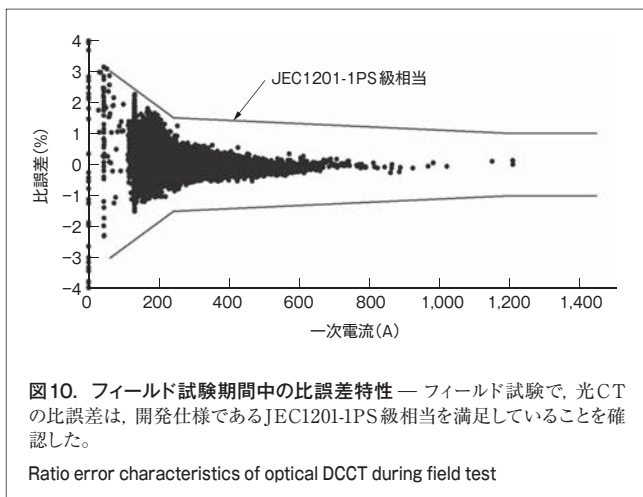
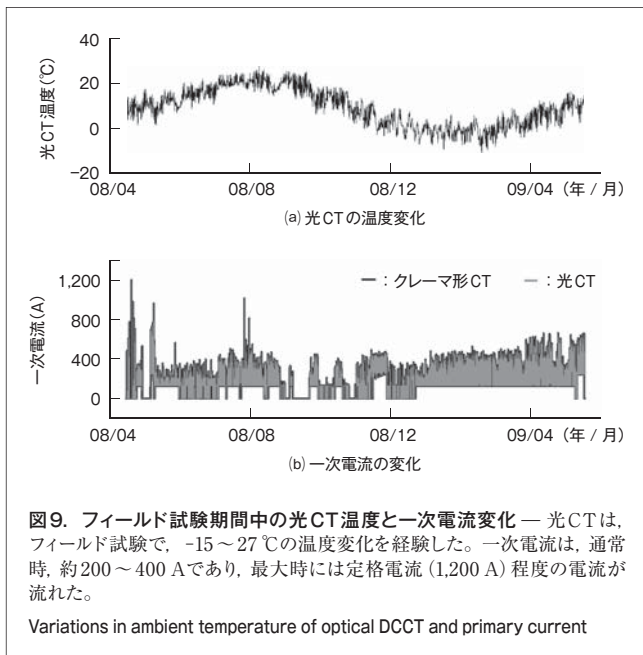
クレーマ形CTは原理上、出力にリップルノイズが重畳する⁽¹⁾。そのため、図8に示すように系統電流が零の場合でも約



200 Hzのリップルノイズが認められる。一方、光CTでは、そのようなノイズの重畳は認められない。試験実施時は直流回路に交流商用周波数50 Hzの6次高調波（300 Hz）のリップル電流が重畳する変換器運転形態であったが、両方のCTともにリップル電流を測定できており、過渡応答及び測定帯域ともに問題がないことを確認した。

北本連系設備の第1極は2008年4月中旬から通常運転が行われた。その後、約1年間のフィールド試験データを図9及び図10に示す。

図9は光CTの周囲温度と、クレーマ形CTと光CTで測定した一次電流の変化を示している。1年間を通じて、光CTは-15～27℃の温度変化を経験した。運転電流は、通常時、約200～400 Aであり、最大で定格電流（1,200 A）程度の通電を確認した。図10に示すように、この期間の光CTの比誤差特性は開発仕様であるJEC1201-1PS級相当を満足しており、フィールド試験環境下においてDCCTとして所定の性能を満足していることを検証した。



5 あとがき

当社は、HVDCシステムのケーブル保護用光DCCT商用器を2009年度中に製造着手する予定である。

この初号機は、軽量であるという光CTの特長を生かした大口径の製品で、プロトタイプ器の設計を基本的に踏襲しながら、実フィールド試験共同研究で得た知見を反映して諸特性の安定性を更に高めている。軽く、絶縁性にも優れ、電磁ノイズの影響を受けにくいという従来型CTにはない特長を生かした光CTを今後提案していく。

文献

- (1) Fry, G. J. M. An inexpensive, large bandwidth, precision d.c. current transformer for stabilized magnet power supplies. IEEE Transactions on Nuclear Science. **18**, 3, 1971, p.865 - 868.
- (2) 佐々木欣一. 全光ファイバCT. 東芝レビュー. **59**, 6, 2004, p.50 - 51.



村尾 武 MURAO Takeru

電力流通・産業システム社 電力流通システム事業部 電力変電技術部主務。電力系統用パワーエレクトロニクスシステムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。Transmission & Distribution Systems Div.



平田 幸久 HIRATA Yukihiisa

電力流通・産業システム社 浜川崎工場 開閉装置部主務。光技術を応用した計器用変成器の開発設計に従事。電気学会会員。Hamakawasaki Operations



佐々木 欣一 SASAKI Kinichi, D.Eng.

電力流通・産業システム社 浜川崎工場 開閉装置部主務、工博。光計測技術の応用研究・開発に従事。電気学会、応用物理学会、レーザー学会会員。Hamakawasaki Operations