

1 はじめに

従来の巻線と鉄心から成る変成器はその計測レンジで鉄心の大きさが定まるので、寸法が 1m 角前後にもなる場合もあり、設置面積の縮小等に大きなネックとなっておりました。また、その大電流計測 (10 万 A レベル) に対して、絶縁性を確保するのが原理的にも困難でした。一方、光を用いた電流計測 (光 CT) のメリットには小型 (従来に比べ数十分の一)、軽量 (ファイバの為、無視出来る程)、高絶縁性 (検出部が光ファイバの為、電気絶縁性非常に高い)、広いダイナミックレンジ (80dB 以上)、デジタル化が容易 (制御システム化が容易) などが挙げられます。また実装状態は図 1 に示します様に、センシンググループを含むセンシングヘッドを碍子上に、その他の信号処理部は大地電位の部分に設置され、その間を光ファイバで接続されています。変電所への設置時にはこの光ファイバの接続を融着接続によって行われますが、従来のサニャック干渉型光 CT では、そのループが偏波面保存ファイバで構成されており、高価になるのみならず、現地での融着作業の出来具合が光 CT の計測精度に影響を与えるなどの問題があり、これらの課題解決に向けて、株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿をはじめとして近年まで開発が進められてきました。また一方、当社ではサニャック干渉型の光ファイバジャイロ (FOG) に、デポライザとシングルモードファイバの組合せによるコストダウン化に成功していました。¹⁾ そこでシングルモード化技術を含む FOG 技術、ノウハウを持つ当社が光 CT の光学部及び信号処理部の開発を担当し、また、かねてから電力設備技術、ノウハウを持つ株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿がセンシングヘッドの開発を担当して共同開発した結果、短期間にて小型化及びコストダウンを図った光 CT のプロトタイプを試作し、電力用として必要な精度が得られていることが確認できました。²⁾

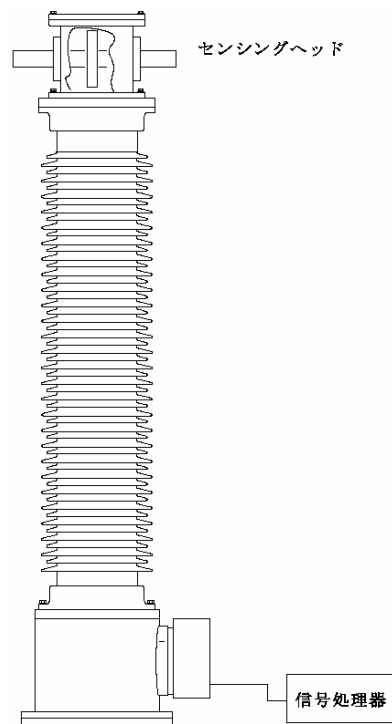


図 1 光 CT の実装イメージ

2 開発のポイント

今回の光 CT の開発はサニャック干渉ループに偏波面保存ファイバを使用した場合と同等の性能を維持しつつ、コストに優れたシングルモードファイバとデポライザを使用した小型の電流センサを設計することでした。技術的なポイントは下記に示す 2 項目です。

- ① シングルモード化 → デポライザ（無偏光の利用）
- ② サニャック効果の最小化 → 遅延コイル配置の工夫

2.1 シングルモード化

サニャック干渉型の光ファイバジャイロの構成を図 2 に示します。光源には波長 $0.85\ \mu\text{m}$ のスーパーluminescentダイオード (SLD) を使用し、またループの分岐直前には偏光子を配置してフィルタの役割をさせています。サニャック干渉ループ中を伝播する光の主軸モードと直交モードのカップリングは、大きな雑音源のひとつといえますが、ループ中にデポライザを配置することにより、不要な直交モード成分は、主軸成分とはもはや干渉できない（インコヒーレントな）領域まで引き離すことが可能であり、デポライザは低雑音化の役割をしております。この手法によりループの他の大部分は通常のシングルモードファイバを使用することが可能です。ここでのデポライザはLYOT 型と呼ばれる、1：2 の長さ比を持つ、2 本の偏波面保存ファイバ端を固有軸に対して 45° 捻って融着接続することにより構成されています。この手法はサニャック干渉型の光 CT にも適用することが可能です。

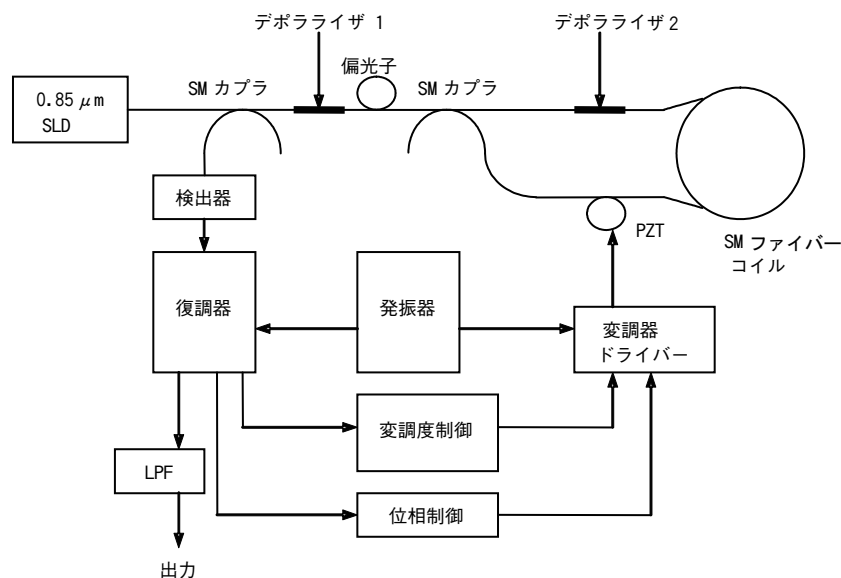


図2 サニャック干渉型光ファイバジャイロの構成

サニャック干渉型の光CTの構成を図3に示します。光源、SMカブラ、偏光子は図2で示した光ファイバジャイロでの役割と全く同じです。一方、光CTとして本質的な機能である、ファラデー効果による位相差を検出するため、センシングファイバコイルを通過する光の状態は円偏光である必要があります。これはファイバ型の偏光子と1/4波長板をセンシングファイバコイルの両端に配置することにより、円偏光を得ています。デポラライザ2とデポラライザ3をシングルモードファイバリードと偏光子の間に配置し、ループの右回り光、左回り光の両方の光量を安定化させると同時に無偏光化させています。この2本のデポラライザの配置により、先に説明した雑音を解消していることになります。また、それぞれのデポラライザの単位長さは以下の条件を満足する様に考慮されています。

$$L1 : L2 : L3 = 1 : 2 : 4$$

L1 ; デポラライザ1の単位長

L2 ; デポラライザ2の単位長

L3 ; デポラライザ3の単位長

また、

$$L1 > (Lc \cdot 2\pi) / (\Delta\beta \cdot \lambda)$$

Lc ; コヒーレンス長

λ ; 波長

$\Delta\beta$; 偏波面保存ファイバの複屈折

を満足させる様にL1の単位長が設定されています。

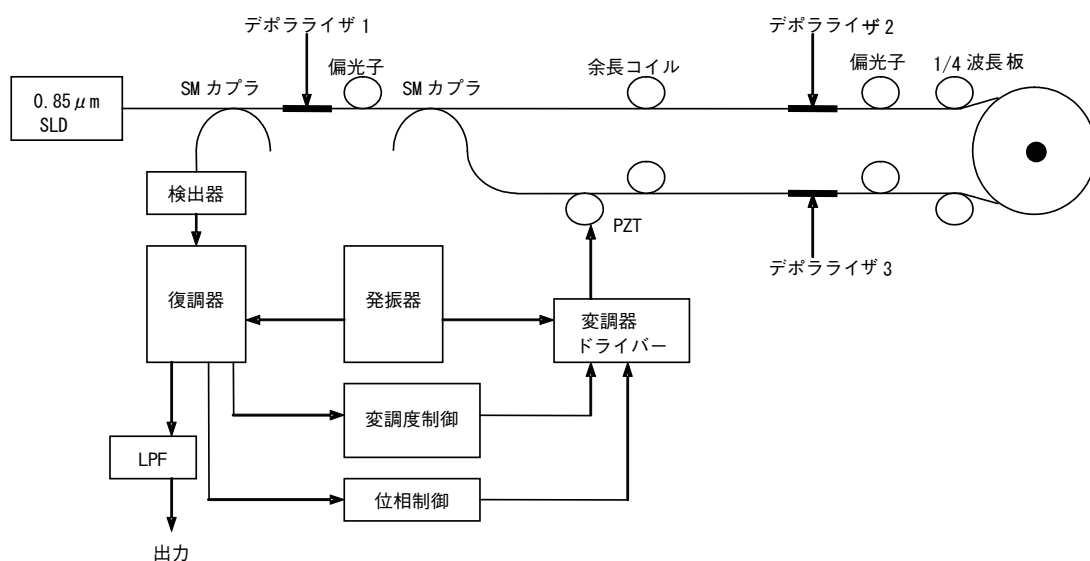


図3 サニャック干渉型光CTの構成

2.2 サニャック効果の最小化

光 CT のセンシングファイバコイル部のファイバ長は一般的に数 m です。これでは、位相変調器で十分な変調を与えることができる程、左右両回り光の間に時間差がとれないので、デポライザの手前に 1 対となる余長コイルを配置しています。尚、このコイルには最も安価で入手性の高い $1.3\ \mu\text{m}$ 帯シングルモードファイバを使用しております。この波長帯のファイバに $0.85\ \mu\text{m}$ の光を伝播させると高次のモードも伝播してしましますが、コイルは小径にて巻き回されているため、曲げによる高次モードの漏洩が発生するので、シングルモード伝播が可能となります。また、この系はこのままではサニャック干渉型の光ファイバジャイロの系と等価で、角速度が入力されると光ファイバジャイロと同様に反応してしまいます。このサニャック効果は光 CT としては誤差要因となりますので、先の一対のコイルを互いに逆周回に配置されています。これにより一対のコイル長は等しく、逆に巻き回されているので入力角速度はキャンセルされています。

3 電流センサの仕様

今回開発した電流センサの仕様を表 1 に示します。

表 1 電流センサの仕様

項目	仕様
定格 1 次電流	3000 Arms
定格過渡電流	50 kArms
定格周波数	50/60 Hz
精度階級	制御用：IEC Class 0.5 保護用：IEC Class 5P
規格	IEC 60044-8 IEC 61850-9

従来の巻線型 CT はダイナミックレンジが広く取れない為、小電流領域用の制御用、大電流領域用の保護用と 2 コアの CT を用いて測定が行われてきました。精度階級としては、制御用として 0.5 級、保護用として 5P 級が最もよく使用されています。ここで光 CT を用いることで、広いダイナミックレンジを実現することが可能である為、光 CT では 1 コアでこの制御用 0.5 級、保護用 5P 級を同時に満足させることが出来、従来の 2 コア構成から 1 コア構成へと簡素化することが可能となります。

4 評価結果

4.1 入出力特性

図4に本光CTの比誤差特性を示します。0Arms～4000Armsの電流に対して、黒丸の測定結果が全て±0.2%の範囲に収まっており、高い直線性を有しているのがわかります。IEC60044-8で定義されている0.5級の許容範囲を実線で示してありますが、十分な余裕を持って満足しています。

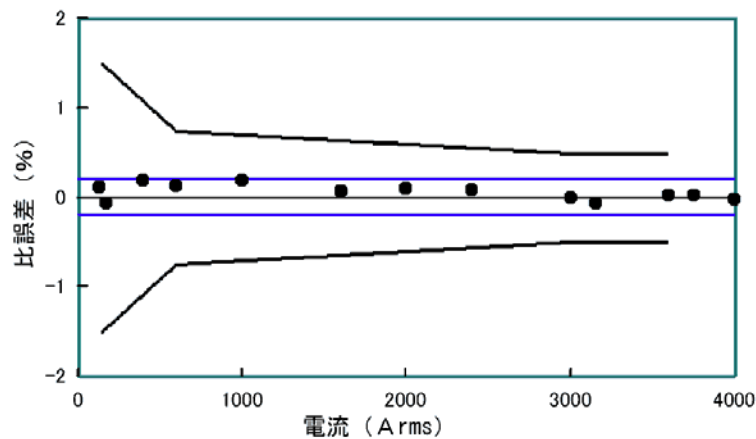


図4 光CTの比誤差特性（株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿による）

4.2 温度特性

図5に本光CTの周囲温度を変化させた時の比誤差特性を示します。使用温度範囲を-40℃～+60℃までを考慮しての電流に対して、黒丸の測定結果が全て±0.2%の範囲に収まっており、高い温度安定性を有しているのがわかります。

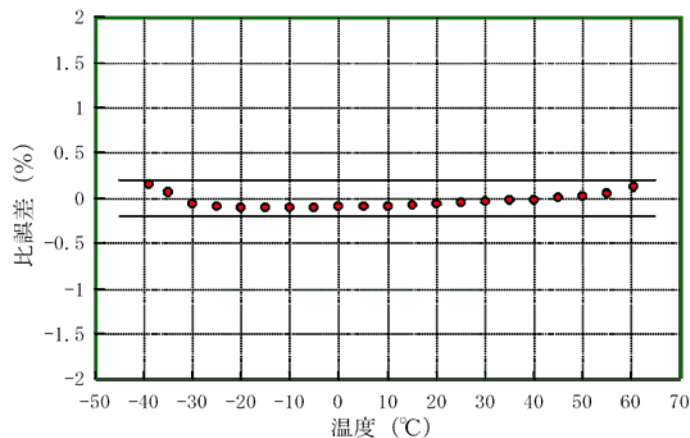


図5 光CTの温度特性（株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿による）

4.3 大電流試験

電力設備においては、通常動作以外に短絡等の事故が生じた時のために、大電流時の計測を光 CT には求められています。鉄芯の磁気飽和の様な現象を持たないので、大電流域においても高い直線性が維持できるため注目されています。図 6 に大電流試験時の写真を示します。センシングコイルは碍子の上部に収納されていて、信号処理部は接地付近の防水ケースに収納されています。図 7 がその時の入出力波形です。入力電流は最大で 110kArms であり、50Hz の交流に 0.03 秒の時定数を持った波形を重畳させています。この結果、出力飽和もなく、誤差も測定に用いた直列抵抗器の精度 1% 以下であります。この様に本 CT のダイナミックレンジは 10Arms から 100kArms まで、80dB 有しており、1 コア構成が可能であることが示されました。

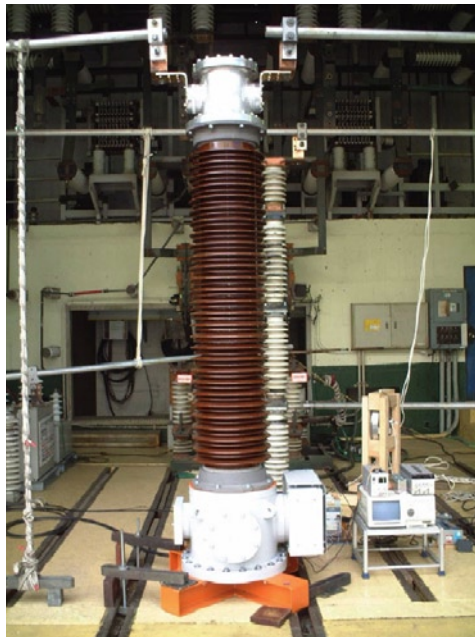


図 6 大電流試験実施状況（株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿による）

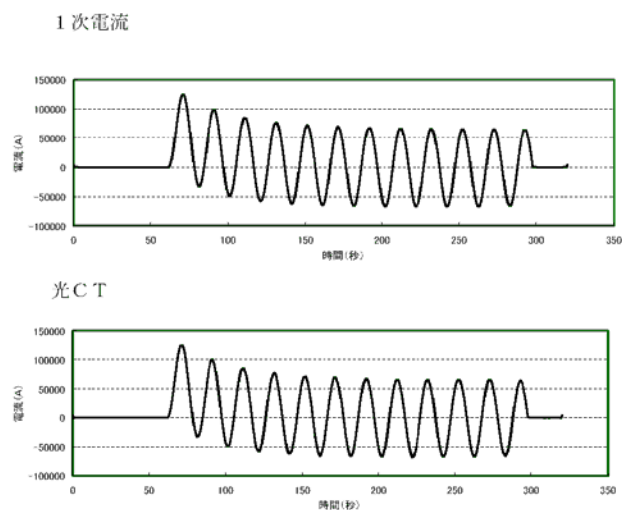


図 7 光 CT 入出力波形（株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿による）

5 むすび

今回、通常のシングルモードファイバとデポライザを組み合わせた構成のサニャック干渉型光 CT を株式会社東芝殿及びティーエム・ティーアンドディー株式会社殿と共同で提案し、性能実証を行いました。リード部にシングルモードファイバを使用しているので現地での設置も容易となり、使用部材の観点からもコストダウンが計られています。性能も 0.5 級の仕様に対して十分余裕を持って満足できる性能を持ち合わせていることが確認できました。今後は実際のフィールドでの評価を行うとともに、更に他の級の光 CT についてローコスト化を含めた開発を行ってゆく予定です。

6 謝辞

本開発にあたり、ご協力を頂きました株式会社東芝 電力・産業システム技術開発センタの佐々木様、高橋様、寺井様、及びティーエム・ティーアンドディー株式会社 平田様、中嶋様に御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) Aritaka Ohno et al, "Intermediate and moderate grade Fiber Optic Gyroscope for industrial applications" , SPIE vol.2292 Fiber Optic and Laser Sensors X II (1994)
- 2) Masao Takahashi et al, "Sagnac Interferometer-type fiber-optic current sensor using single-mode fiber down leads" , OFS-16, 2003