

電力設備監視制御のための光ファイバ電流センサ

東京電力株式会社 電力技術研究所
黒澤 潔

Fiber-Optic Current Sensors for Supervisory Control in Electric Power Facilities

Kiyoshi Kurosawa

Power Engineering R&D Center,
Tokyo Electric Power Company Inc.

1. はじめに

電力設備の保護・制御・運用を行う上で、設備に流れる電流を計測する必要がある。電力設備の特質から、そのための電流検出装置には次の特性をもつことが望まれる。

- ・装置の取付けにより、設備の電気絶縁が影響されない。
- ・装置が電磁誘導雑音の影響を受けない。
- ・設備故障時の大電流まで検出できる広いダイナミックレンジをもつ。
- ・以上の要求を満たし、さらに装置が小型である。

ファラデー効果を利用することにより、検出部と信号伝送路に金属部品がないなどの原理的特長をもち、上記の要求に応える電流検出装置が実現可能と考えられる⁽¹⁾。そのため、光を用いた電流計測装置の研究開発が、多くの機関で長期に渡り行われてきた。ここでは筆者らが研究を進めている、光ファイバのファラデー効果を利用した電流検出装置、および偏波を変調した光を用いて直流電流を検出する手法を紹介する。

2. 光ファイバを素子に用いた電流計測

2. 1 背景

図1に、電力機器に取付けた場合の光ファイバを素子に用いた電流検出装置の構成の概念を示す。光源から送光ファイバにより検出部に光を送る。その光から偏光子を用いて直線偏波光を取出し、導体の周囲に巻かれた素子ファイバ

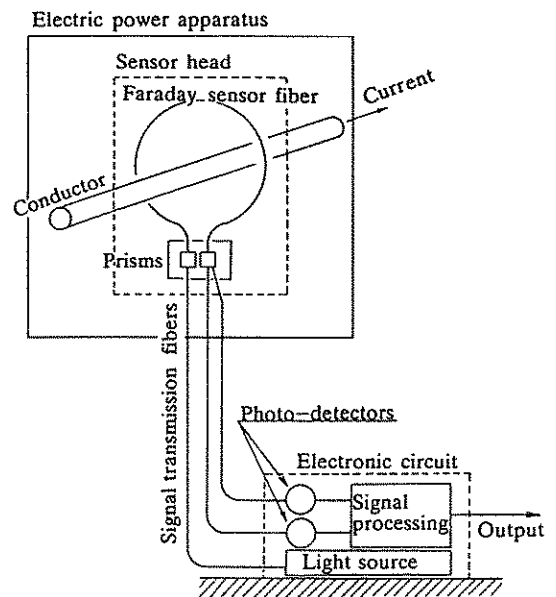


図1. 光ファイバ型電流検出装置の構成概念

Fig.1. Conceptual structure of the optical fiber current transducer for power apparatus.

に入射する。導体に流れる電流が誘起する磁界が印加されるため、光はファラデー効果による偏波面の回転を受け、ファイバから出射する。その際ファイバが導体を周回しているため、アンペアの周回積分の法則から、偏波面の回転角 θ_F は電流に比例する。次に光は、方位 45deg の検光子に入射し、2つの直線偏波成分に分離される。その結果検光子通過光量は、 θ_F が小さい範囲で、 θ_F に比例して変化する。さらに光は受光素子に導かれて電気信号に変換され、信号処理回路で出力に変換される。

しかしながら、このような装置を実現するためには、素子ファイバ内部の光弾性効果に起因する複屈折により、被測定電流と出力の関係が影響を受けるという問題を解決する必要がある⁽²⁾。実用装置として用いるためには、ファイバをコイル状に巻く必要があり、また温度変化や周囲から伝わる振動を想定する必要がある。それらはみな応力の原因となるため、光弾性の影響防止は重要である。石英を素材とする光ファイバを素子に用いる場合のこの問題を解決するため、ファイバにツイストを施す方法⁽³⁾、ファイバをアニールする方法⁽⁴⁾など、いくつかの方法が提案され、多くの機関で研究が進められている。一方筆者らは、この問題を解決するため、光弾性定数の非常に小さい鉛ガラスを素材とする光ファイバ(鉛ガラスファイバ)を素子に用いる装置の開発を行っている。

2. 2 鉛ガラスファイバ

鉛ガラスファイバを伝搬する光の偏波に関する特性は、センサの設計に深く関係する。そこで、鉛ガラスファイバに直線偏波光を入射し、通過光の偏波と、ファイバのつくる曲線の関係を調べる実験を行った。その結果次が明らかになった⁽⁵⁾。

- ①出射光の消光比は、曲線の形に無関係に常に直線偏波状態である。
- ②曲線の形が一定の場合、出射光の偏波方位の変化は、入射光のそれに等しい。

③入射光の方位が一定でも、曲線の形の変化に応じて、出射光の方位が回転する。

①と②から、鉛ガラスファイバの偏波特性への光弾性効果の影響は非常に小さいことが分る。③の曲線の変形による偏波の回転の原因は光弾性効果ではなく、曲線の振れの関数として記述できることが知られている⁽⁶⁾。即ち、複屈折の無い単一モードファイバに直線偏波光が入射すると、出射光の偏波方位はファイバのなす曲線に沿った振れ率の積分に等しい角度回転する。この原理から、ファイバの一端に鏡を取付け、光を内部で往復させると、入射端から再び出射する光の偏波は回転しなくなる。なおファラデー効果による偏波面の回転は、光の往復により2倍になる。

2. 3 電流検出装置

鉛ガラスファイバを用いて電流検出装置を設計・試作した。設計に当たり、ガス絶縁開閉装置への検出部の取付けを想定し、また定格電流は4,000Arms(50Hz)とした。測定精度は変流器規格JEC1201-1PS級を満すことを目標とした。ファイバの巻数は1、光源波長840nm。定格電流の最大値5,660Aに対するファラデー回転角は、4.91degである。

2.2節で述べた偏波特性から、センサを構築する上で鉛ガラスファイバの光弾性の影響は無視できる。一方、周囲から伝わる振動や温度変動によってファイバの曲線の形が変わり、その結果偏波が回転し、出力への影響が生じることが懸念される。この対策として次の2つが考えられる。①ファイバを丈夫な枠に固定する。②ファイバの内部で光を往復させる。後者をういた場合、機器への取付けが容易になる可能性があるが、光学系の信頼性確保等が課題である。そこで本開発では前者を選択した⁽⁷⁾。図2に試作した検出部の外観を示す⁽⁸⁾。また特性の一例を以下に示す。

- (1) 測定精度：検出部に定格以内の電流を流し、信号処理回路の出力と電流値を記録し、比誤



図2. 鉛ガラスファイバ電流検出装置検出部⁽⁸⁾
Fig. 2. Sensing unit of the flint glass fiber current transducer⁽⁸⁾.

差（流した電流に対する誤差率）と電流値の関係性を調べた。その結果、測定精度は規格JE C1201-1PS 級を満足することが分った。

- (2) 温度特性：検出部の周囲温度を -20°C ~ $+80^{\circ}\text{C}$ の間で40サイクルに渡って繰り返し上下に変化させ、その期間中、1800Armsの電流に対する比誤差を調べた。図3に結果を示す⁽⁹⁾。図から、比誤差の変化率は $+0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 程度という小さい値であること、および試験期間中特性の再現性が確保されていることが分る。なおこの温度特性は、鉛ガラスファイバのベルデ定数の温度依存性に起因する⁽⁷⁾。

さらに試作装置の信頼性を検証するため、屋外で長期に渡る連続通電試験を行った⁽⁸⁾。

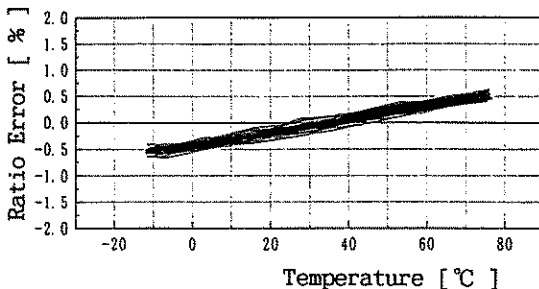


図3. 検出部の比誤差の温度特性⁽⁹⁾

Fig. 3. Temperature dependence of the ratio error of the sensing unit⁽⁹⁾.

図4に試験装置を示す。図において、ガス遮断器の碍子の根元に検出部が取り付けられている。ガス遮断器に800Aの電流を連続通電し、検出装置の精度と動作状態を連続的に記録した。また定期的に遮断器を動作させ、振動に対する耐久性を調べた。その結果、1995年9月~1996年11月の試験期間中、装置は正常に動作を続け、高い信頼性が確認された。

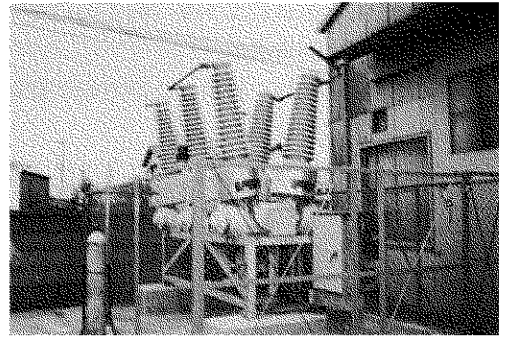


図4. 長期通電試験装置⁽⁸⁾

Fig. 4. Test apparatus for the long term current conduction test⁽⁸⁾.

3. 直流電流の計測手法

3. 1 背景

従来直流電力設備の電流検出に用いられている可飽和リアクトルを応用した装置には、消費電力が大、大型等の問題があり、光の応用による改善が期待されている。しかしながら光を用いる場合にも、様々の原因による受光量のドリフトと区別してファラデー効果を高精度に検出することが、交流測定の場合に比べて困難であるという問題がある。そのため直流電流の検出は、光を用いた電流検出の研究の重要課題となっている。そこで筆者らは直流電流検出のための手法を研究している^(10~14)。ここではその中から、比較的短期に開発可能と考えている「偏波面を変調する方式」を紹介する。

3. 2 バルク型素子を用いる構成^{(10) (11)}

図5に、バルク型ファラデー素子を用いて行った実験の構成を示す⁽¹¹⁾。光源から変調用ファラデー素子に直線偏光を導き、交流電流によ

り偏波面方位を正弦波状に変調する。変調素子を通じた光は、被測定直流電流の磁界を印加した検出用ファラデー素子に入射し、偏波面の回転を受ける。この光を偏光子に対して方位を直交させた検光子に入射し、通過光を受光素子に導いて電気信号に変換する。ファラデー回転角が小さい範囲で、電気信号Pは次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$P = P_{DC} + A \cos \omega_m t + B \cos 2 \omega_m t \quad (1)$$

ここに、 P_{DC} : 直流成分

A, B : 変調周波数およびその2倍周波数成分の振幅

ここで、最終出力として、AとBの比Sを求めると次式が得られる。

$$S = A/B = (4/a) \theta_{DC} \quad (2)$$

ここに、 θ_{DC} : 直流電流 I_{DC} によるファラデー回転角

a : 変調電流 I_{AC} によるファラデー回転角の振幅

(2)式からSは θ_{DC} に比例し、また受光量(P_{DC} に比例)に無関係であることが分る。両者の比は、図に示す通り帯域フィルタと割算器を用いて求めることができる。

この方式を実用的に用いるためには、変調に要する電力を少なくする必要がある。変調電力の低減を検討するため、変调用素子として鉛ガラス製の多重反射型素子を用い、また変調コイルに直列コンデンサを接続して無効電力を補償し、変調電力を測定する実験を行った。その結果、光源波長830nm、変調周波数10kHzの条件で、

振幅1.3degのファラデー回転が1.6Wの消費電力で得られた。

また、出力が受光量に影響されないことを確認するため、図5の変調素子と検出素子の間に陽炎を発生させて受光量変動を起こし、その時の出力を記録する実験を行った。図6に結果を示す⁽¹¹⁾。図から、フィルタの出力レベルが変動しているにもかかわらず、出力が安定していることが分る。

3. 3 鉛ガラスファイバを用いる構成⁽¹²⁾

バルク型素子に代えて鉛ガラスファイバを用いると、変調コイルと高電圧導体の電気絶縁が容易になるなど、性能を維持しながら装置をコンパクト化することが可能となる。そこで、鉛ガラスファイバを用いた構成の特性評価実験を行った。この場合も2.2節で述べた通り、光

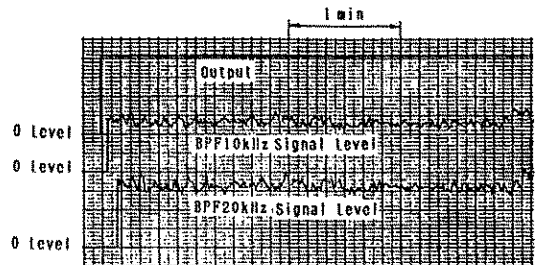


図6. 受光レベルが変動する場合の出力の安定性⁽¹¹⁾

Fig. 6. Stability of the output in case of fluctuation of the received light intensity⁽¹¹⁾.

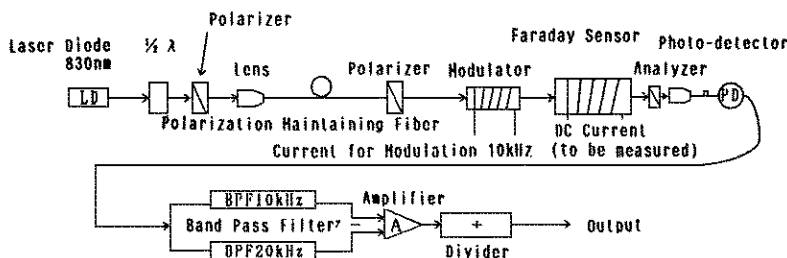


図5. バルク型素子を用いた偏波面変調法による直流電流検出実験⁽¹¹⁾

Fig. 5. Experimental setup for DC current detection with a bulk Faraday sensor and modulated linearly polarized light⁽¹¹⁾.

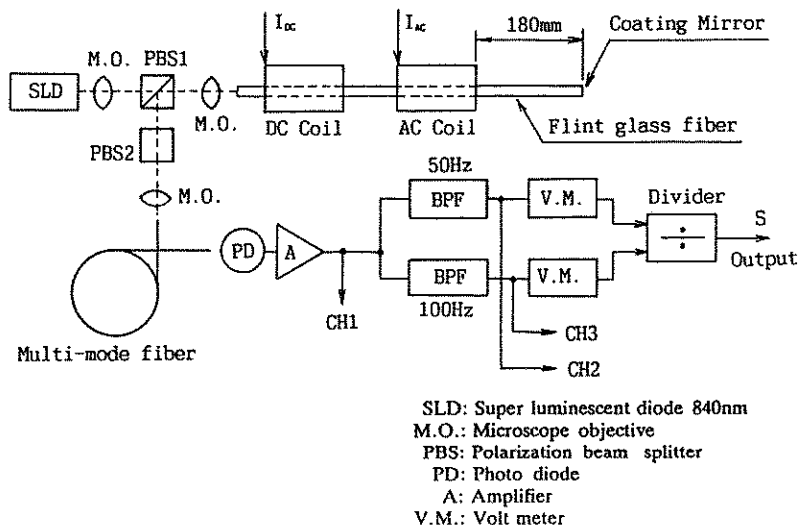


図7. 鉛ガラスファイバを用いた直流電流検出実験⁽¹⁾⁽²⁾

Fig. 7. Experimental setup for DC current detection with a flint glass fiber sensor and modulated linearly polarized light⁽¹⁾⁽²⁾.

弾性効果によるファイバの複屈折を無視できる。しかし、ファイバの曲線の変化に応じて偏波の方位が変わる現象が、直流計測の場合には特に問題である。そこで本実験では、ファイバ内部で光を往復させ、偏波の安定化を図った。

図7に実験の構成を示す⁽¹⁾⁽²⁾。図において、SLD光源(840nm)から、光を偏光ビームスプリッタPBS1(方位0deg)に導き、p偏波成分を長さ700mmのFC型コネクタ付の鉛ガラスファイバに入射する。ファイバの入射端面は直角に研磨され、反射防止膜が付けられている。またファイバは、内径1.0mmの保護チューブに挿入されている。ファイバの反対側の端面には金属蒸着ミラーが形成されており、光は反射してファイバを往復し、入射端から再び射出する。その光にs偏波成分が含まれていれば、その成分はPBS1で反射し、もう一つの偏光ビームスプリッタPBS2(方位90deg)を通過後、多モードファイバで受光素子に導かれる。PBS2は光の検出を高い消光比で行うために設けた。

鉛ガラスファイバを伝わる光は2つの電流コイルを貫通し、ファラデー効果を受ける。一方のコイルには被測定直流電流 I_{DC} が流れ、他方には変調用の正弦波交流電流 I_{AC} (50Hz)が流

れる。この構成において、受光素子出力P、および最終出力Sは、バルク型素子を用いる場合と同様に、(1)式と(2)式で表される。図7において、変調コイルの巻数は720、その往復のファラデー回転角と電流の比1.24deg/Aである。また直流コイルの巻数は450、その往復のファラデー回転角と電流の比0.76deg/Aである。

図8は、Sと I_{DC} の関係を求めた実験の結果を示す($I_{AC} = 3.5A_{rms}$)⁽¹⁾⁽²⁾。両者に良好な直線関係があることが分る。 $I_{DC}=0$ の時の平均受光量は-45dBmであった。

またSの値がファイバの曲線の形に依存しないことを確認するため、ファイバを先端部分180mmのところから曲率半径約30mmで色々な方向に直角に曲げた場合と、直線に伸ばした場合について、実験系の動作状態の差異を調べた。その結果、オシロスコープの波形についても、2つの電圧計の指示値についても、差異は観測されなかった。

今後、光源と鉛ガラスファイバ間を光ファイバで安定に接続する技術を開発する。また本実験では、リアクタンスが大きい大型のコイルを仮に変調用に用いたことから、商用周波数の変

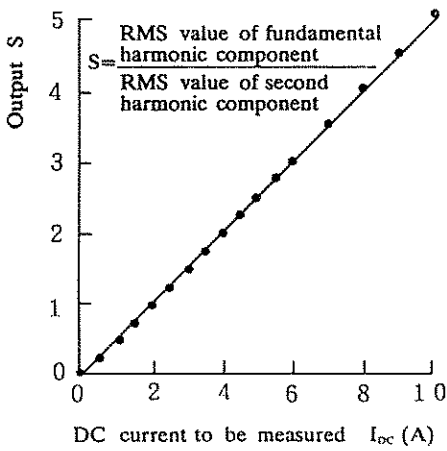


図8. 出力Sと被測定直流電流 I_{DC} の関係⁽¹⁾⁽²⁾
 Fig.8. Relationship between output S and DC current to be detected I_{DC} ⁽¹⁾⁽²⁾.

今後、光源と鉛ガラスファイバ間を光ファイバで安定に接続する技術を開発する。また本実験では、リアクタンスが大きい大型のコイルを仮に変調用に用いたことから、商用周波数の変調電源が必要であった。しかし、ファイバを素子に用いる場合、コイルの内径を細くすることが可能である。そのためコイルの小型化は容易であり、変調周波数の向上、即ち測定系の応答時間の短縮が可能である。

4. おわりに

鉛ガラスファイバをファラデー素子に用いる電流検出装置の開発、および偏波面を変調して直流電流を検出する方法の研究を紹介した。前者については、今後電力機器への適用を考えた装置の開発と試験を行い、実用化を目指す段階に達していると考えられる。また後者について

は、鉛ガラスファイバを用いた装置の開発を検討している。

参考文献

- 1) S. Saito, et al:IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-3, No.11, p.589-, 1967
- 2) 例えば、A. M. Smith:Optics and Laser Tech., p.25-, 1980
- 3) R.I. Laming, et al:IEEE J. Lightwave Tech. Vol.7 No.12, p.2084-, 1989
- 4) G.W. Day:Proc. 4th Optical Fiber Sensors Conf., p.81-, 1986
- 5) K. Kurosawa,et al:IEEE J. Lightwave Tech., Vol.13, No.7, p.1378-, 1995
- 6) J.N. Ross:Optical and Quantum Electron., Vol.16, p.455-, 1984
- 7) 黒澤他：電気学会論文誌B, 116 巻1号, p.93-, 1996
- 8) S. Yoshida, et al:Proc. 11th Optical Fiber Sensors Conf., p.172-, 1996
- 9) 黒澤他：平成8年電気学会全国大会, No. 1171
- 10) 黒澤他：平成4年電気学会全国大会, No. 866
- 11) 黒澤他：平成5年電気学会全国大会, No. 928
- 12) K. Kurosawa:Proc. 11th Optical Fiber Sensors Conf., p.134-, 1996
- 13) K. Kurosawa, et al:Proc. 9th Optical Fiber Sensors Conf., p.439-, 1993
- 14) 黒澤：電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-C- I ,No.12, p.560-, 1991