

直流用光ファイバ電流センサの開発



林屋 均*



中島 等**

直流変電所のき電回路保護に用いられている故障選択装置（50FW）には、電流検出デバイスとして、ホール効果に基づいて磁界から電流値を推定するホールCT（DCCT）が広く用いられている。本開発では、より高精度に回線電流の測定が可能で、かつ小型・軽量の直流用電流センサの開発を目標に、光ファイバ電流センサの開発に取り組んできた。回線電流をより正確に測定することで、さらに信頼性の高い電力供給システムの構築に貢献するものである。直流用光ファイバ電流センサは、大学での研究レベルでも平成12年ごろまで研究が行われていた基礎技術であったが、短期間で高性能な試作器を完成させるに至った。さらに、光ファイバ電流センサを活用した故障選択装置についても、実用上問題ないフィールド試験結果を得ることが出来た。同技術は今後、広く製品展開される可能性がある。

●キーワード：光ファイバ電流センサ、ファラデー効果、故障選択装置、ホールCT

1. はじめに

直流電気鉄道の子電システム保護には、ホール効果に基づいて磁束密度から直流電流を計測するホールCT（Current Transformer）が広く用いられている。ホールCTはその信頼性の高さや応答の良さなどから広く用いられているが、近接回線電流が作る磁界の影響を受けてわずかながら誤差を生じるという欠点を持ち、改善が期待されている。また、ホールCTの持つもう一つの問題点として、複数のCTを使用する場合に、相互に磁気的な擾乱を与えないよう十分な離隔を確保する必要がある点が挙げられ、コンパクト化のネックとなっている。

これらの問題点を解決する、すなわち、外部磁界の影響を受けにくく、よりコンパクトな次世代型のCTとして、ファラデー効果に基づいた光ファイバCTの開発に取り組んできた。光ファイバCTは、交流用としてはこれまでも多くの取り組みがみられ^{例(1),(2)}、既に商品化ベースまで開発が進んでいるが、そのまま直流電気鉄道の子電保護用として転用することが難しい。そこで筆者らは、既に光ファイバジャイロの分野で実績のあるサニャック干渉計を応用した光ファイバ電流センサの開発を進めてきた^{(10),(11)}。

一連の試作・試験を通じ、今回試作した直流用光ファイバCTが、良好な負荷電流測定特性を有し、外部磁界の影響を受けずに計測が可能であることが、フィールド試

験および実験室における検証試験を通じて確認された。また、直流遮断器が動作するような電氣的にも機械的にも苛酷な状況における性能評価についても、光ファイバCTの有効性が大電流試験（短絡試験）を通じて確認された。

2. 直流き電システムと各種CT

2.1 直流き電システム

直流電気鉄道では、数キロ間隔で設備された直流変電所において特別高圧66kVなどから降圧、整流された1,500Vの直流電圧がき電線、トロリ線に給電されている。図1に直流変電所構成の概要を示すが、このように直流き電システムでは隣接する変電所から並列に列車に給電されており、変電所や沿線での短絡・地絡事故発生時には速やかに事故回線を除去し、事故の波及の防止や変電所・事故点周辺の保護を行うことが重要である。直流変電所では現在、ホールCTを用いて各回線の電流値を常時計測して事故電流を早期検出するシステムが構成されており、CTは保護システム上非常に重要な役割を担っている。このため、CTには正確さ、応答性のほか、高い信頼性が求められる。



図1 直流き電システム

2.2 従来型のCT (ホールCT)

直流電気鉄道のき電システムで現在広く用いられているホールCTの構造の一例を図2に示す。このように、測定対象である電流を取り囲む鉄心と、その一部の空隙に配置されたホール素子から構成され、ホール素子により電流の作る磁界を測定し、電流値を把握している。例えば図2の構成のホールCTでは、左右同一の構成により二重系となり、各系が上下二つ、合計四つのホール素子により磁束密度を測定する仕組みになっている。しかし、分散配置された少数のホール素子により磁束密度を測定することから、測定対象ではない近接回線電流（例えば電鉄用直流変電所における直流母線電流や隣接する回線の電流）の作る外部磁界が誤差要因となる。このような近接回線電流による外乱磁界の影響により、例えば直流遮断器を開放してあるのに、微小な電流が導通しているように見えてしまう事象などが報告されており、改善が求められている。

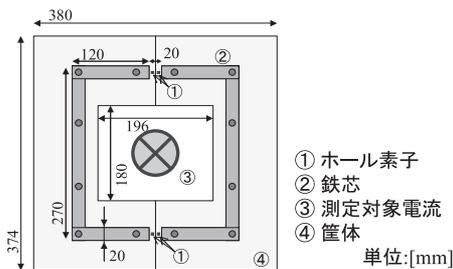


図2 ホールCTの構造の一例

2.3 開発したCT (光ファイバCT)

光ファイバCTは、分散配置された少数のホール素子により磁界を計測して電流値を求めているホールCTの弱点を、連続的な線積分値としての磁界計測により改善し、外部磁界の影響を受けにくいCTを実現しようとするものである。光ファイバCTがホールCTに比べて小型・軽量化が可能であり、それに伴い操作性や施工性が高まることなどの魅力も大きい。今後、変電設備のより一層のコンパクト

化や過渡的なピーク電流値の増大を見据えると、近接回線電流の影響を受けにくいという特徴は最も魅力的である。

光ファイバCTでは、ファラデー効果により磁界を計測している。これは、円偏光で言えば右回り円偏光と左回り円偏光の伝搬速度が磁界の強さに比例して異なってくることに基づいており、直線偏光で言えば、偏波面の傾き（偏光回転角） θ_F が磁界の強さに比例して大きくなっていく事に基づく。式(1)はファラデー効果のこの性質を示す一般的な式であり、Vはベルデ定数、Hは印加磁界、Lは結晶中の光路長、nはファイバのターン数、Iは被測定電流値である。

$$\theta_F = VHL = nVI \dots\dots\dots(1)$$

試作した光ファイバCTの光学系の構成を図3に示す。測定対象電流が作る磁界の影響でもたらされる二つの円偏光の伝搬速度の差により生じる到達時間差を検出するためにサニャック干渉計を構成しており、その光学系の構成の違いから、(a)のループ型と(b)の反射型について試作した。試作した反射型光ファイバCTの写真を図4に示す。①がセンサ制御箱で、光源、偏光子、遅延ファイバ、ピエゾ変調器などが収められている。②は磁界への感度を持たない伝送ファイバ、③の部分に $\lambda/4$ 素子と反射ミラーが束ねられ、④がセンシングファイバである。また、光学系の主要な要素・パラメータについて表1にまとめた。

ループ型光ファイバCTの場合、光源から発せられた光が偏光子を経て直線偏光となり、その後、カプラを経て二手に分かれた光が、それぞれ $\lambda/4$ 波長板に達する。 $\lambda/4$ 波長板を経て円偏光となった光はファイバ中を逆向きに進行し、磁界の影響を受けた後に、再び $\lambda/4$ 波長板、カプラを経て干渉される（ループ・サニャック干渉計）。測定回線を周回する光ファイバを逆向きに伝搬する右周りと左周りの光がファラデー効果により正負の影響を受けることにより、位相差が生じる。

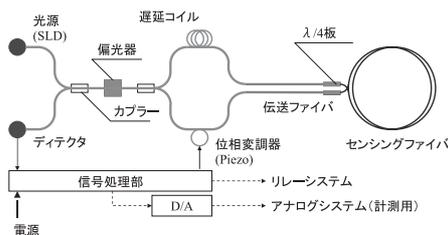
一方、反射型の光ファイバCTの場合、偏光子を経て直線偏光された光が45度の捻れを持たせて接続された偏波面保持ファイバへと進行する。これによりx軸とy軸に等しく伝えられた直線偏光が、 $\lambda/4$ 偏光板にてそれぞれ逆向きの回転方向を持つ円偏光（CW：Clockwise：時計回り、CCW：Counter Clockwise：反時計回り）へと変換される。CWとCCWは進行方向が同一でも、磁界からのファラデー効果を逆向きに受け、それによる位相差が最終的にデポライズと偏光子の間の45度捻れによる接続点におい

て干渉され、位相差が検出される（インライン・サニャック干渉計）。式(3)に示したように、ファイバを伝搬する経路が往路と復路の二倍となるため、ファイバを測定回線に巻きつけるターン数が同一であれば、最終的な位相差はループ型の2倍となる。

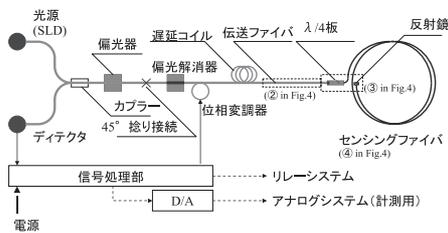
ループ型光ファイバCTでは反射ミラーが不要であるためコスト的にアドバンテージがある一方、反射型光ファイバCTでは据付時の施工性がよいこと、光が導体周囲を往復するため同一巻数では光路長がループ型の二倍となり感度が向上すること、後述の実験により確認されるように機械的な振動の影響を受けにくいこと、などの利点がある。

表1 光学系の主要構成要素の諸元

光源	SLD (wave length : 840nm)
センシングファイバ	シリコン石英ファイバ
- ループ径	- 235mm
- 巻数	- 2 turns
- ベルデ定数	- 2 μ rad/A
伝送ファイバ	偏波面保持ファイバ
遅延ファイバ長	ループ型: 100m 反射型: 1,000m
位相変調周波数	22kHz
演算周期	0.5ms (2kHz)



(a) ループ型



(b) 反射型

図3 サニャック干渉型光ファイバ電流センサ

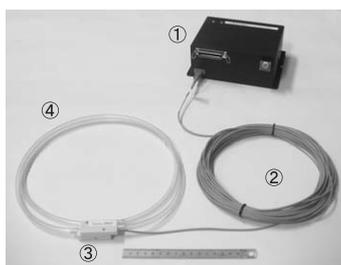


図4 光ファイバCTの写真（反射型）

2.4 光CTの性能上のニーズ

光ファイバCTの測定対象は主に、直流き電システムにおける変電所から測定対象回線に供給される回線電流である。将来的にき電システムの保護を担うためには、所望の測定精度を実現し、十分な信頼性を持つことが必要である。

通常の負荷電流の測定においては、平成14年度に試作した光ファイバCTの初期の試作器においてもホールCTと大差のない計測を実現することができたが、実用化を目指すとして、以下の諸点の改善が問題となり、3年間の開発の過程で適宜改良を行った。

一点目は温度特性の改善である。例えばJR東日本の営業線区を想定すると、光CTが設置される直流変電所内の気温は、 -10°C ~ 40°C 程度が想定される。したがって、これらの温度変化においても零点がドリフトせずに安定した測定を実現することが必要である。初期の試作器では、構成光学部品の一つである $\lambda/4$ 板の温度特性のためと思われる温度ドリフトの影響を大きく受けた。このことについては、温度変化の影響を受けにくい $\lambda/4$ 板の構成であることが既に報告されている(5),(6)融着捻り接続により光ファイバと $\lambda/4$ 板を一体型の構成を適用することにより改善された。

二点目は応答性の改善である。短絡事故などの故障を検知し安全を確保するため、電流値の過渡的な変化に対して十分な応答性が求められる。具体的には、短絡事故検出を担うウィンド型故障選択装置⁽¹⁴⁾への適用を想定すると、数10msの時間で数千A（例えば40msで3,000A）の電流変化を検知する必要がある。現状のホールCTがほとんど遅滞なく電流変化を検知できることから、極力それに近い性能を実現することが望ましい。一方で、光CTではその電流値算出に煩雑な演算を要するため、コストとCPU性能のトレードオフを克服して所望の性能を達することが実用上の問題となった。現状では、0.3ms程度の遅れでの計測が達成されており、短絡保護上、問題のないレベルを実現した。

三点目は振動特性の改善である。初期の試作器は、ファイバ部を揺らすと出力が変動するなど、振動の影響を受けやすいものであった。このことは即ち、地震などの不測の機械的振動により保護を誤動作させてしまう可能性があるため、改善が求められた。例えば初期試作機の実フィールド試験においても、夜間の停電（き電停止）に伴う遮断器動作に伴う振動で、本来流れていない1,000Aクラスの電流パルスが検知される結果を得た。以下で示す反射型の光フ

ファイバCTでは、このような振動特性の悪さが見られないため、実用化に向けてはループ型ではなく反射型の光ファイバCTのほうが望ましい性能を実現することができる。

3. 性能評価試験

光ファイバCTの実用化に向け、直流き電システムにおいて想定される事故時の大電流計測性能試験および近接回線電流の影響評価試験を、JR東日本研究開発センターの大電流試験装置にて行った。

3.1 大電流試験

20,000Aの大電流通電時の電流計測性能比較試験結果を図5に示す。上段から、従来型のホールCT、過飽和リアクトル型CT、ループ型光ファイバCT、反射型光ファイバCTである。ここで、過飽和リアクトル型CTは、外部磁界の影響を受けにくかつ軽量のCTとしてすでに開発された新しいタイプのCTである。

大電流試験結果より、光ファイバCTは若干の応答の遅れは見られるものの、現状のホールCTと同等な大電流計測性能を実現していることが確認できる。しかし、ループ型光ファイバCTの場合、大電流通電直後の衝撃波によりもたらされたと思われる機械的振動により、測定結果が影響されていることが確認された。このような瞬時的な機械的な衝撃は実フィールドにおいてももたらされる可能性があり、反射型光ファイバCTを製品化においては採用することとした。

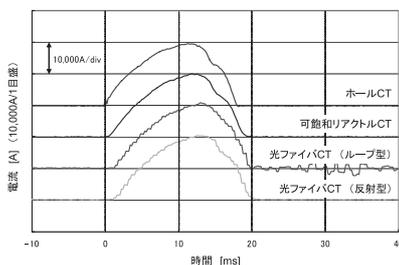


図5 大電流計測試験結果

3.2 近接回線電流の影響評価

各CTの近くに別の回線の電流が流れ、そこからの外部磁界が計測性能に与える影響を確認するため、図6に示すように負荷電流程度の通電がある回線に近接して各種CTを配置し、その影響を確認する試験を行った。3,500A程度

の通電を行った際の各CT出力の様子を図7に示す。この場合、本来それぞれのCTは電流を計測していないので出力は0Aであるべきであるが、従来型のホールCTで400A程度の、過飽和リアクトル型CTでも100A程度の電流が誤差として計測されている。これに対して、今回開発した光ファイバ電流センサでは影響をほとんど受けていないことが確認できる。

現状のホールCTでは、100A程度以上の測定分解能は期待できないが、光ファイバCTの場合は10Aクラスまでの分解能が期待できる。これにより、保護システムの信頼性を一層向上することが可能である。

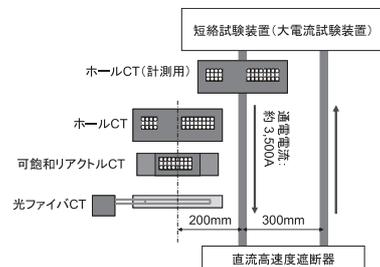


図6 近接回線影響評価試験における各CTの配置

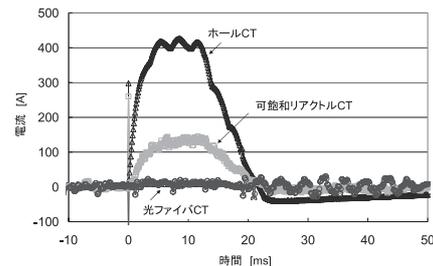


図7 近接回線電流の影響

4. 故障選択装置の試作・試験

今回開発した直流用光ファイバCTを用いた、直流変電所用故障選択装置を試作し、JR東日本研究開発センターの大電流試験装置における性能確認試験、および、常磐線日暮里変電所、両毛線伊勢崎変電所、上越線浦佐変電所において長期フィールド試験を行った。常磐線日暮里変電所における試験では重負荷線区において近接回線電流の影響を受けず正常に動作するかどうか、両毛線と上越線での試験では雷撃時に不要動作しないかどうか、などについて確認することが目的であったが、いずれも不要動作は見られず、安定した稼動を確認することができた。また、上越線浦佐変電所におけるフィールド試験では、偶然、当該回線にて既設の故障選択装置が動作する

事象が発生し、フィールド試験中の試作機も同様の事象を正常に捉え、正常動作を確認することができた。

試作したウィンド型故障選択装置の写真を図8に、日暮里変電所におけるフィールド試験時の、光ファイバCT架設の様子を図9に示す。図9においては、図中①および②に示したものが既設のホールCT（計測用と保護用）であり、③、④がフィールド試験中の光ファイバCT部である。CT単体としてもコンパクト化されているとともに、鉄心を用いない構造であるために複数台のCTを接近させて使用することができ（既設のホールCTではCT間に一定以上の離隔が必要）、架設スペースの省スペース化も可能であることが伺える。



図8 試作したウィンド型故障選択装置の写真

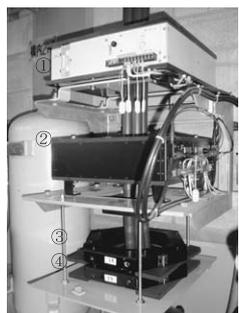


図9 日暮里変電所におけるCT架設の様子

5. まとめ

新しい直流用光ファイバ電流センサの開発を完了し、これを用いた故障選択装置について実用化可能な製品開発を達成した。光ファイバCTは近接回線電流の影響を受けにくく正確な測定が実現できるとともに、設置場所への制約も少なく小型、軽量であるため、変電設備の省スペース化や施工性の向上を実現するものである。

今後、計測用電流センサとしての適用と併せて、各種保護装置への製品化開発が進められる予定である。

参考文献

- 1) 黒澤潔 他：「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, 116巻1号, pp.93-103 (1996)
- 2) 生田栄 他：「捻り二重被覆ファイバを用いた光変流器の開発」, 電学論C, 118巻5号, pp.669-677 (1998)
- 3) M.Takahashi et. al. : "Optical current sensor for DC measurement", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, No.OR13-2, pp.440-443 (2002)
- 4) J. Blake et. al. : "In-line Sagnac interferometer current sensor", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.11, No.1 pp.116-121 (1996)
- 5) K.Bohnert et. al. : "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor", Journal of Lightwave Tec., Vol.20, No.2 pp.267-276 (2002)
- 6) 林屋均 他：「短絡試験装置を用いた直流大電流遮断試験」, 平成15年電気学会全国大会, Vol.5, No.233 (2003)
- 7) 林屋均 他：「電磁界解析によるホールCTの諸特性評価」, 平成15年電気学会産業応用部門大会, No.3-62, pp.287-290 (2003)
- 8) 林屋均、熊谷達也 他：「直流電気鉄道用光ファイバ電流センサの開発」, 第32回応用物理学会光波センシング技術研究会, No.LST-32-20 (2003)
- 9) M.Hino, S.Hase and M.Akagi, "Tests of optical fiber current transformer for direct currents", Proc. Of the 5th International Conf. on Power Electronics and Drive System, No.LS2.1-2 (2003)
- 10) T.Kumagai et. al. : "Optical fiber sensor applications at Hitachi Cable", Proc. of 15th Optical Fiber Sensors Conf., pp.35-38 (2002)
- 11) 曾根勇 他：「サニャック干渉系光ファイバを用いた電流センサの開発」, 電気学会光・量子デバイス研究会, No.OQD-01-19, pp.19-24 (2001)
- 12) H.Hayashiya et. al. : "High current test of optical fiber current sensor for D.C. railway power system", ICEE2004 (to be published)
- 13) 井上一 他：「ウィンド形故障選択装置の開発」, 電気学会交通電気鉄道研究会, No.TER-90-13, pp.23-30 (1990)
- 14) 林屋均 他：「直流電気鉄道き電設備用光ファイバ電流センサの開発」, 電気学会論文誌C, Vol.126-C, No.6, pp.736-743 (2006)