

# 強電機器への光技術の応用

## Measuring Apparatus and Techniques Based on Electro-optics in Electric Power Systems

森田 和實 \* Kazumi Morita

### I. まえがき

電力需要の増大に伴い、電力機器は高電圧化、大容量化の傾向にある。これに対処し、より高性能な製品を開発するには、機器に発生する現象をより正確に把握する必要がある。電力機器においては、被測定点は一般に高電圧であるため、絶縁を保ちながら従来の測定器を使用することは極めて難しく、またリード線等からノイズも混入しやすい。したがって、発生する現象を実測することが困難な場合が多く、計算機によるシミュレーションを中心で解析し、設計をしてきた。しかし被測定機器の構成が複雑であれば、計算時間も長くなるため費用も多くかかるばかりでなく、計算精度も上がらない。

機器の状態のより正確な把握や、シミュレーション結果の評価には、実測値を得ることが最も重要である。<sup>(1),(2)</sup>そのためには、絶縁された測定器を開発する必要がある。以前から光を応用した絶縁形測定器が考えられてきたが、近年、光ファイバ、発光ダイオード(以後、LEDと略す)などの光学部品の目覚ましい発展とともに現実化されつつある。富士電機においても、光を用いた各種電力用絶縁形測定器を開発してきたので紹介する。

### II. 絶縁形測定器の概要及び特性

#### 1. 光ファイバリンク形電圧・電流計

高電圧部の微少電位差や微少電流を測定する場合、従来は絶縁台により測定器を絶縁し、バッテリー又はエンジン発電機を電源とすることにより、測定器と被測定点とを同電位とする方法がとられてきた。この方法は測定装置が大掛かりになるのみならず、電圧が高いほど絶縁

台の高さも高くなり、高所における測定となるため、安全性にも問題がある。

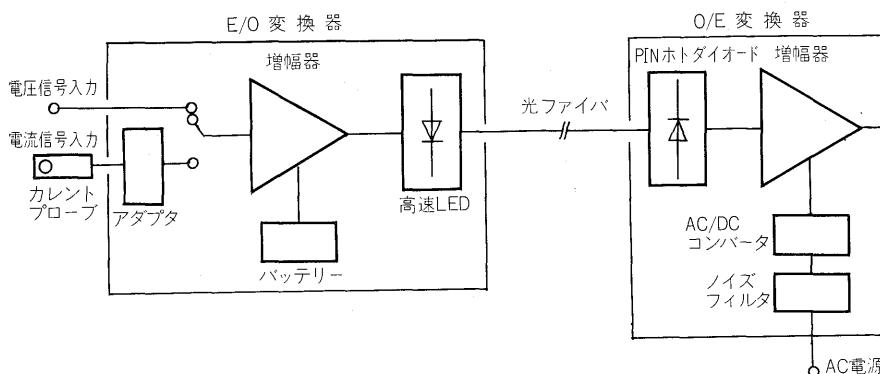
#### 1) 原理及び装置の構成

高電圧部で電気信号を光信号に変換(E/O変換)し、その光信号を光ファイバにより大地側まで導き、再度電気信号に変換(O/E変換)して観測すれば、高電圧部には電気的に全く触れることなく測定を行うことができる(第1図)。この方式を光ファイバリンク形と名付ける。

この装置構成では、高電圧側回路(E/O変換器)は内蔵バッテリーにより駆動される。電圧を測定する場合は、その電圧信号波形に応じた電流を直線性の良い高速応答LEDに流すことにより、電圧信号を光信号に変換する。電流を測定する場合は、カレントプローブにより電流信号を電圧信号に変換し、アダプタにより信号レベル、周波数特性などを調整し、上記回路に入力して光信号に変換する。LEDには直流電流を流しておき、これに測定信号を重畠させる直流バイアス方式を用いることによって、正、負両極性の信号を測定することができる。

装置を安価に製作するために、通信用光ファイバに比べると、光の減衰量が1~2けた多い安価な石英ファイバを使用した。測定器においては光伝送距離が光通信の場合よりはるかに短いため、減衰量が多くても総合特性にはあまり影響はない。LED光を有効に伝送し、光伝送路の十分な機械的強度を確保するためにバンドルファイバを使用した。これは、プラグ部でも引張り強さが5kg以上あり、シリコーン処理により耐湿性と絶縁特性が良いため、電力部門における使用に適している。

大地側に伝送された光信号は、PINホトダイオードによ



第1図 光ファイバリンク形測定器構成図

Fig. 1. Block diagram of the fiber-optic link type voltage and current measuring apparatus

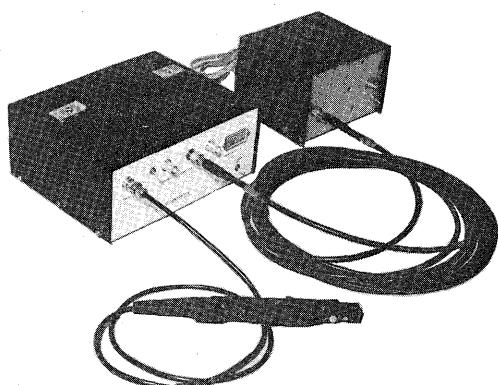
\* (株)富士電機総合研究所 超高圧電力研究所

り電気信号に変換されて増幅され、出力される。電力機器の設置場所では、しばしばAC電源にノイズが重畳するので、この部分の電源にはノイズフィルタを施してある。

## 2) 外観及び特性

装置の外観を第2図に示す。E/O変換器は小形・軽量であるため、絶縁台を用いずに容易に高電圧部に設置することができる。

本装置の特性を第1表に、ステップ応答波形を第3図に示す。



第2図 光ファイバリンク形電圧・電流計

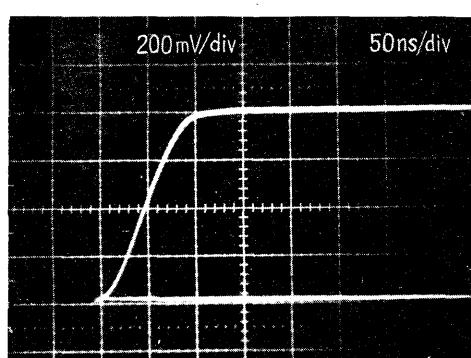
Fig. 2. Fiber-optic link type voltage and current measuring apparatus

第1表 光ファイバリンク形電圧/電流計測器特性表

Table 1. Characteristics of the fiber-optic link type voltage and current measuring apparatus

電 源	E/O 変換器：内蔵 12V バッテリー O/E 変換器：AC 100V
ファイバ長	(10 m)*
測定範囲	電圧測定： $\pm 0.1 \sim \pm 10$ V 電流測定： $\pm 1 \sim \pm 100$ mA
周波数特性	電圧測定：30 Hz ~ 4 MHz (-0.5 dB) 電流測定：40 Hz ~ 2 MHz (-0.5 dB)

\* 約 50 m まで可能



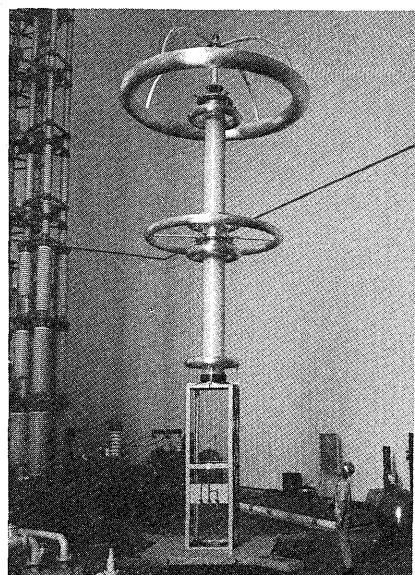
第3図 ステップ応答波形

Fig. 3. Step response

## 3) 応用例

### (1) 2.5 MV 光分圧器

抵抗分圧器の立上り時間は、抵抗値とその対地漂遊容量との積にはほぼ比例する。定格電圧の高い分圧器はその高さも高くなるため漂遊容量も大きくなり、高速応答させることは難しい。<sup>(3)</sup>しかし、高電圧側で測定をすれば、漂遊容量の影響を受けにくく、<sup>(4)</sup>高速応答させることができる。そこで、光ファイバリンク形電圧計を高電圧側に設置する方式の 2.5 MV 光分圧器を開発した。外観を第4図に示す。立上り時間は 40 ns 以下である。

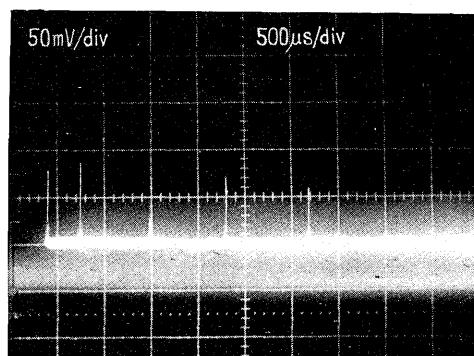


第4図 2.5 MV 光分圧器

Fig. 4. 2.5 MV optoelectronic voltage divider

### (2) コロナ電流の測定

高電圧の電極やリード線などから発生するコロナ電流は、大地側に設置された電極により電子等を集めることによって測定するのが一般的である。しかし、この方法は電極を通らずに他へ流れてしまう電流は検出できない。光ファイバリンク形電流計はコロナ発生源の近傍に設置できるため、より高精度の測定ができる。20 kV の針電



第5図 コロナ電流の測定

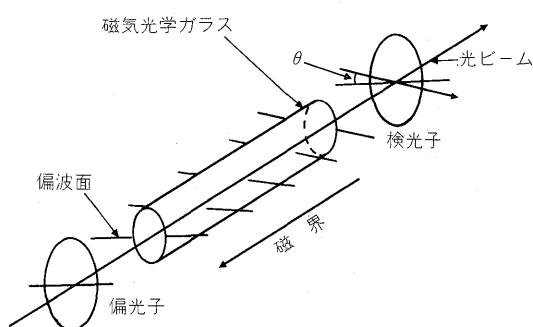
Fig. 5. Corona current observed using the fiber-optic link type apparatus

極から発生するコロナ電流を測定したオシログラムを第 5 図に示す。

## 2. ファラデー効果形計測器

### 1) 原理

磁界中に置かれた特殊な光学材料（以後、磁気光学ガラスという）を通過する光の偏波面が回転する現象を、ファラデー効果又は磁気光学効果という。第 6 図に従い、この現象を説明する。図中、左側から進んできた光ビームを偏光子により直線偏光波とし、磁気光学ガラスに入射させると、これはガラス中を進行するにつれて、その偏波面は次式に示されるように、磁界の光軸方向の成分  $H_L$  とガラス内光路長  $L$  との積に比例した回転を受ける。



第 6 図 ファラデー効果  
Fig. 6. Faraday effect

$$\theta = V \int_0^L H_L dl \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $V$  はヴェルデ定数といい、磁気光学ガラスと材質により定まる定数である。したがって  $\theta$  を求めれば磁界を知ることができる。この角度変化は光ビームが検光子を通過することにより光の強度変化に変換され、受光素子により電気信号として観測される。

磁気光学ガラスには常磁性ガラス（主にレーザ光学系の光アイソレータ素子用）と反磁性ガラスがある。 $E_u^{2+}$ ,  $P_i^{3+}$ ,  $T_b^{3+}$  などの常磁性イオンを多量に含んだガラスはヴェルデ定数が大きいため多く使われているが、その温度係数が大きく、計測器には適さない。反磁性イオンである鉛イオンを多量に含有する鉛ガラスは、ヴェルデ定数は小さいがその温度係数が非常に小さくて無視できるため、これを使用した。代表的常磁性ガラスである FR-5 と、反磁性ガラスである鉛ガラスの特性を比較し、第 2 表に示す。

磁気光学ガラスは内部で光を反射させることにより光路長を長くすれば、それに応じて偏波面の回転角が増すという特徴をもつ。この効果を利用すれば、より高感度の磁界測定を行うことができるが、反射により光の位相が乱れないようにガラス表面に偏波面保持多層膜を蒸着する必要がある。

第 2 表 磁気光学ガラスの特性

Table 2. Characteristics of Faraday rotator glass

	測定波長/温度	FR-5	鉛ガラス
屈折率	640 nm	1.69	1.80
屈折率温度係数	20~40 °C	$7.5 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$8.0 \times 10^{-6} / ^\circ C$
内部透過率(10 mm当たり)	650 nm	0.997	0.997
ヌープ硬度		745	365
ヴエルデ定数	633 nm 1,060 nm	-0.242 min/Oe·cm -0.071 min/Oe·cm	0.093 min/Oe·cm 0.028 min/Oe·cm
ヴエルデ定数温度係数		$1/T$	$\approx 0$

$T$ ：絶対温度

### 2) 応用例

光ファイバリンク形測定器は高電圧部に電子回路を持つため、その電源を必要とするのに対し、ファラデー効果形測定器はセンサ部に電源が不要という利点を持っているが、光学ガラス等破壊しやすい部品を用いているため、取扱いに注意を要する。

#### (1) 光ガウスマーティ

従来のガウスマーティはホール素子、リード線などに金属を用いているため、高電圧部の磁界の測定は困難である。そこでファラデー効果を利用して、センサ部及び信号伝送部に全く金属を使用することのない光ガウスマーティを開発した。

センサ部の構造を第 7 図に、装置の外観を第 8 図に示す。光ファイバにより伝送された LED の光はレンズにより集光され、プリズム、偏光子を経て鉛ガラスへ入射する。鉛ガラスには偏波面保持多層膜が蒸着されており、光ビームは図に示すように反射を繰り返しながら進行し、検光子、プリズム、光ファイバを経て受光素子へ至る。光ファイバ、磁気光学ガラスは FRP 容器に収納されている。光信号伝送路には光ファイバの特性を生かし、柔軟性を持たせることもできる。

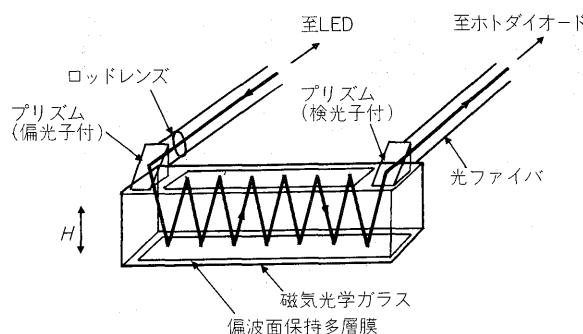
本器の特性を第 3 表に示す。ここでは約 1 m の光ファイバを使用しているが、ファイバ長は磁界の測定範囲等には無関係であるため、長いファイバを用いることによ

第 3 表 光ガウスマーティ特性表

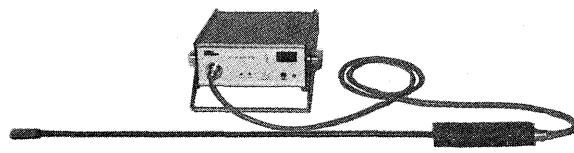
Table 3. Characteristics of the optical gauss meter

電 源	AC 100 V, 内蔵 12 V バッテリー
出 力	デジタル出力 最大 $1.999 \times 10^{-1} T$ アナログ出力 BNC コネクタ ( $1 V/10^{-1} T$ )
測 定 範 囲	$10^{-3} \sim 2 \times 10^{-1} T$
周 波 数 特 性	DC ~ 5 kHz (-3 dB)
使 用 電 壓	(30 kV)*

\* 使用電圧は高電圧部に挿入される光ファイバの清浄度や表面状態（吸収性など）により決まるので、十分な余裕をみてある。光ファイバ長により、更に高電圧化が可能。



第7図 光ガウスマータのセンサ部構造  
Fig. 7. Detector of the optical gauss meter



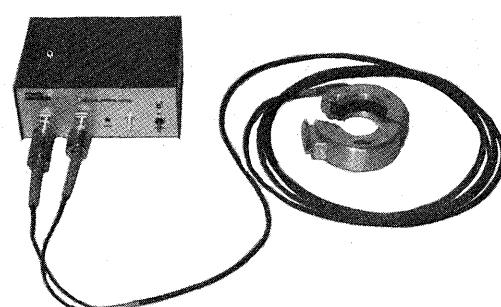
第8図 光ガウスマータ  
Fig. 8. Optical gauss meter

り、使用電圧を高くすることは容易である。

## (2) リングコア形光電流計

導線に電流が流れれば、アンペールの法則に従いその周辺に磁界が生じる。この磁界を測定すれば電流を求めることが可能である。磁気光学ガラスの高速応答性を利用し、高電圧部の過渡現象を測定することができる電流波形測定装置を作成した。その外観を第9図に示す。電流の作る磁界を有効に、かつ安定に検出するため、フェライトコアを用いその一部を切除し、磁気光学ガラスを挿入する構成とした。磁気光学ガラスは光ガウスマータの場合と同様、光ビームを多数回反射させる構造とし、高感度化を図った。

フェライトコアは二分割式になっており、電線と鎖交させて使用する。大地側に設置する電子回路とは一対の光ファイバによってのみ接続されるため、高電圧部とは電気的に非接触である。また、コロナを発生しにくくす

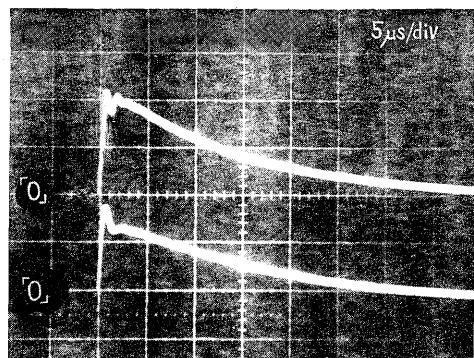


第9図 リングコア形光電流計  
Fig. 9. Optical current detector with a magnetic ring core

第4表 リングコア形光電流計特性表

Table 4. Characteristics of the current detector with a magnetic ring core

電 源	AC 100 V, 内蔵 12 V バッテリー
出 力	BNC コネクタ (100 mV/100 A)
測 定 範 囲	1 ~ 400 A
周 波 数 特 性	40 Hz ~ 2 MHz (-0.5 dB)
立上り時間	100 ns



上：シャントによる測定 電流300A  
下：リングコア形電流計による測定

## 第10図 パルス電流の測定

Fig. 10. Pulse current measured by using the optical current detector with a magnetic ring core

るため、フェライト等はシールド電極により覆われている。

本器の特性を第4表に示す。使用電圧は光ファイバを設置する場所の電界によって異なるが、長期に使用する場合 5 kV/cm 以下の電界で使用することが好ましい。パルス電流の実測例を第10図に示す。

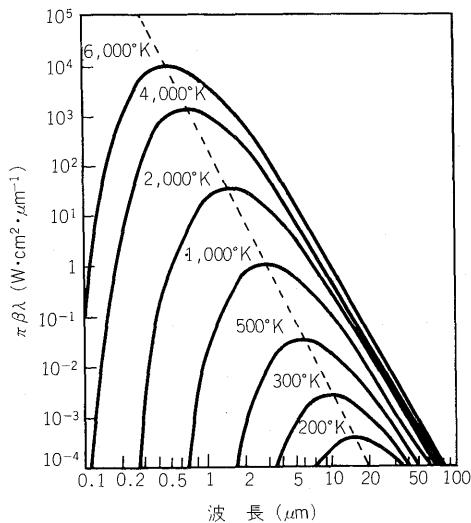
## 3. 光ファイバ温度計

車両搭載用変圧器において軽量化が要求され、運転中の変圧器の巻線温度を実測する必要が生じた。変圧器内部は狭く高温である上、高電圧が印加されているため、高温に耐え、電気的に全く非接触に測定できる温度計が必要となり、光ファイバ温度計を製作した。

### 1) 原理及び装置の構成

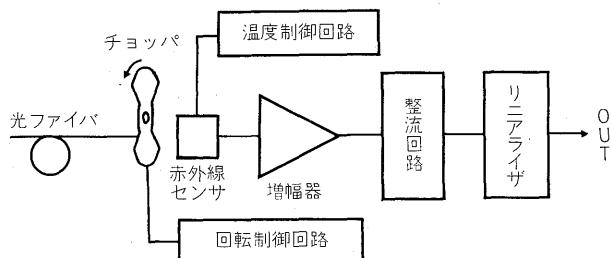
絶対温度 0 °K 以上のすべての物体は、その物体を構成している原子や分子の振動と回転により電磁波(赤外線)を放射する。この電磁波の放射波長分布及び放射量は第11図に示すようにプランクの法則、ウィーンの変位則に従い、温度により変化する。ここに示す温度計は、放射量を測定する温度計である。

第12図に装置の構成を示す。温度測定を行った変圧器は、赤外線をほとんど透過しないシリコーン油を用いているため、光ファイバの一端を巻線に密着させてテープで固定することにより、ファイバ端面のシリコーン油の放射する赤外線を検出する構成とした。光ファイバにより変圧器外部に伝送された赤外線は、PbS 赤外線センサにより電気信号に変換され表示される。



第 11 図 黒体の分光放射発散度

Fig. 11. Energy vs. wavelength of a black body radiation



第 12 図 光ファイバ温度計構成図

Fig. 12. Schematic diagram of the optical fiber thermometer

## 2) 特性

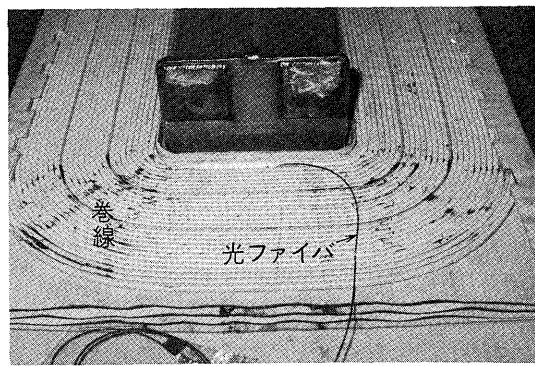
市販の光ファイバは、一般に波長が \$1 \sim 1.6 \mu m\$ で最高透過率を示し、これ以上では急激に減衰量が増加する。したがって第11図からもわかるように、低い温度ほど最大赤外放射強度の波長が長波長に移り、その強度も低下するので検出しづらく、光ファイバが長いほど検出可能最低温度が高くなる。ここでは \$1.5 m\$ の光ファイバを使用し、最低検出温度は \$100^\circ C\$、応答速度は \$100 ms\$ である。

## 3) 実測例

日本国有鉄道新幹線用 TM 202 X 形変圧器の試作実機を用い、巻線の温度測定を行った。変圧器内部の光ファイバの設置状況を第13図に示す。起動パターンを模擬し、二次側を短絡し、一次側に定格の \$150\%\$ 電流を間欠通電した場合の二次巻線の最高温度点の温度変化を光ファイバ温度計で測定した例を、油温度の変化とともに第14図に示す。この結果は、走行シミュレーションにおける温度計算精度を向上させ、より高性能な変圧器の製作を可能とする。

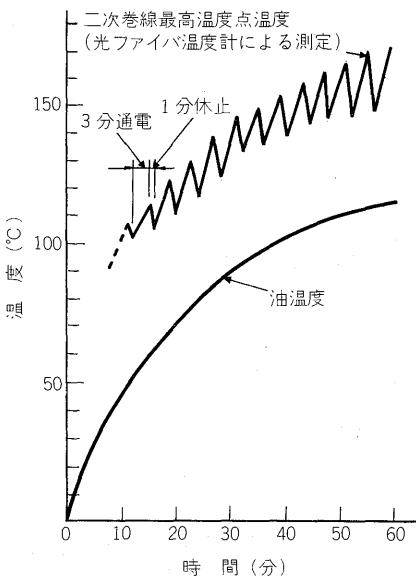
## 4. その他

レーザ光による \$275 kV\$ ガス絶縁開閉装置モデルの内部電界実測状況を第15図に示す。ここでは誘電率の小さい水晶のポッケルス効果を利用しておらず、内部電界をほと



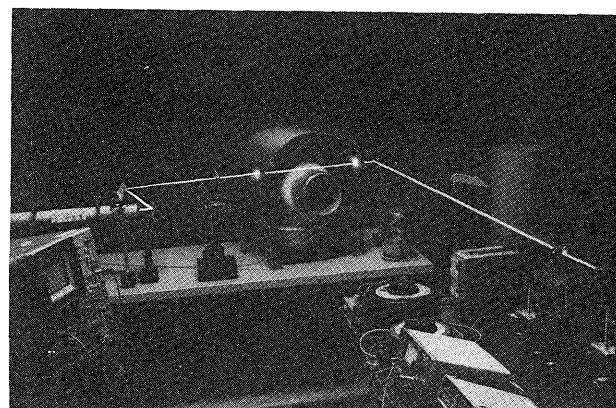
第 13 図 変圧器内部の光ファイバ設置状況

Fig. 13. Optical fiber thermometer installed the transformer



第 14 図 光ファイバ温度計で測定した車両用変圧器巻線温度の変化

Fig. 14. Temperature variation of the transformer coil measured by using the optical fiber thermometer



第 15 図 \$275 kV\$ GIS モデルにおける電界測定

Fig. 15. Electric field measurement in the model of a \$275 kV\$ gas-insulated switchgear

んど乱すことなく測定でき、計算結果と良い一致をみた。<sup>(12)</sup>

密閉容器に収納されている装置において事故や故障が発生した場合、その位置を判定することは容易ではない。

電力機器では事故の場合、発光を伴うことが多いため、この光を検出することによる事故位置判定装置の開発も行ってきた。<sup>(13)</sup>

### III. あとがき

光応用測定技術は現在急速に進歩しつつあるが、まだ問題も多い。例えば、高速現象を測定する場合、LED出力が不安定であるために、波形は忠実に観測できても、振幅を精度よく求めることが困難となる場合もある。また光学部品は破壊しやすいため、従来機器と同等に取り扱うこともできない。このように、現時点では光応用計測にすべてを期待することはできないが、今まで測定できなかつた値を求めることができるなどの利益も多い。今後、ユーザの希望と可能な技術との接点における装置を開発していく所存である。

最後に、日ごろ御指導を頂いている東京大学生産技術研究所の芳野講師と、日本大学理工学部の大野教授に深く感謝の意を表する。

### 参考文献

- (1) 大野豊・井上昌彦：電界・磁界計測へのオプトエレクトロニクスの応用、電子計測研究会資料、EM-79-70 (1979)
- (2) 斎藤成文ほか：レーザによる電力用電流電圧測定装置に関する基礎的研究、東京大学生産技術研究所報告、28, 5 (1980)
- (3) 原田達哉・伊丹敏郎：衝撃電圧測定用抵抗分圧器の高性能化に関する研究、電力中央研究所技術研究報告、62020 (1963)
- (4) Tatsuya Harada et al.: A high quality voltage divider using optoelectronics for impulse voltage measurements, IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-91, pp. 494 ~500 (1972)
- (5) 久保田広ほか：光学技術ハンドブック、p. 566 朝倉書店 (1980)
- (6) (株) 保谷硝子 カタログ特性表 No. 53-04, No. 82. 1. 1000
- (7) Toshihiko Yoshino: Highly sensitive all-optical method for measuring magnetic fields., Fiber and Integrated Optics. 3, 4 pp. 391~399 (1981)
- (8) 芳野俊彦ほか：磁気光学ガラスを用いた電流・磁界測定器の開発、昭和57年電気学会全国大会 1297
- (9) 森田和實：コア型光 CT の開発、電気学会計測研究会資料、IM-81-10 (1981)
- (10) 小野春雄ほか：光ファイバによる変圧器内部温度の実測、昭和57年電気学会全国大会 1312 (1982)
- (11) 久保田広ほか：光学技術ハンドブック、p. 961, 朝倉書店 (1980)
- (12) 浅賀廣・森田和實：SF<sub>6</sub>ガス絶縁スペーサの三次元電界の計算と測定、絶縁材料・高電圧合同研究会資料、EIM-80-41, HV-80-13 (1980)
- (13) 真壁正治：変電機器の予防保全、富士時報、55, 2, pp. 138~142 (1982)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。