光ファイバガス密度センサを用いたGILのガス圧監視システム

正員 宮崎 明延 正員 八木 学 正員 小林 真一 (中部電力株式会社)
 正員 二島 英明 正員 那倉 裕二 正員 東 秀訓 (住友電気工業株式会社)

Gas pressure monitoring system for GIL using fiber-optic gas density sensors

Akinobu Miyazaki, Member, Manabu Yagi, Member, Shin-ichi Kobayashi, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 Hideaki Nishima, Member, Yuji Nakura, Member, Hidenori Higashi, Member (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

We have developed a fiber-optic gas pressure monitoring system with new gas density sensors for detecting the leakage of insulation gas of the Gas Insulated Transmission Line (GIL). In this system gas pressure of over one hundred gas compartments can be monitored with several optical fibers and without electric power supply to the sensors. This simple and highly reliable system enables speedy gas leakage detection, allowing us to take appropriate measures before reaching its critical pressure. Developed sensor makes mechanical bend of an optical fiber when the gas leakage, and causes an optical transmission loss as the detected signal. Using a conventional optical time domain reflectometer with these sensors, a multi point sensing system can be constructed. In this paper we report the principle of this sensor and the design of the monitoring system for the Shinmeika-Tokai GIL.

キーワード: 管路気中送電線 (GIL), ガス密度センサ, 光ファイバセンサ, 長距離線路, 監視システム

1. まえがき

中部電力では、火力発電所からの引き出し送電線として亘長3.25kmにもおよぶ世界最大の長距離大容量管路気中送電線 (新名火東海線GIL) を建設した⁽¹⁾。GILの絶縁体は他のガス絶縁機器と同じく高圧のSF₆ガスであり、ガス漏れの検出は絶縁性能の維持のために極めて重要である。一般的にGILやGISはガス漏洩による絶縁性能劣化の危険性を分散するため、数mから数十m単位のカ区画に仕切られており、圧力ゲージと電気接点式ガス密度スイッチが各ガス区画に取り付けられ、一定量以上のガス漏れに伴う圧力低下に対して警報を発するシステムが用いられている。

長距離GILである新名火東海線の場合、広範囲に分散した120カ所ものガス区間の圧力を監視する必要がある。従来型のセンサでは、センサ数の増加に伴う制御線、電源配線等が増加し、監視システム構成が複雑化するため、より簡便なセンサシステム構成が求められた。一方、ガス漏れの監視は設備上重要な管理項目であるが故に、センサの信頼性が重視され、実績のあるセンサが広く用いられていることも事実である。そこで、簡易なシステム構成で多数のセンサ監視が可能であり、かつ従来センサの信頼性を保持した光ファイバガス密度センサ、及びそのシステムの開発を行ってきた⁽²⁾⁽³⁾。さらにこの新しいセンサにおいては、従来の接点式センサでは不可能であった圧力低下傾向のモニタをも可能とし、ソフトウェア技術との組み合わせにより初期的な設備異常の検出を実現した。

本論文では、この新しいセンサの構造と特性、及び運用を開始した新名火東海線のガス圧モニタシステムについて報告する。

2. 基本原理

<2・1> ガス漏れ検出の原理 GILやGIS等のガス絶縁機器のタンク内のガス圧力は、体積が一定であるため温度によって変化する。また、これら絶縁機器の絶縁性能は温度変化による圧力変化には無関係であり、封入されたガスの密度によって決まる。封入されるガス圧力等の仕様値は一般に20℃における圧力で表される。そこで、微少なガス漏れを早期に発見するには、圧力値そのものを測定するのではなく、温度変化を補正して実際にガスが減少しているか否か検出する方式が必要であり、その意味で「ガス密度スイッチ」と呼ばれるセンサが使用されている。

ガス密度スイッチの原理を図1に示す。感温筒と呼ばれる参照用ガス管には被測定SF₆ガスと同じ圧力のSF₆ガスが封入されており、これらのガスがベローズを介して互いに押し合い、正常時には平衡を保つ構造となっている。ここで、被測定ガスと感温筒内のガスが同一の温度変化であれば、双方のガス圧は等しく変化するので、ベローズは作動しない。しかし、被測定ガスが漏れると、すなわちガス密度が減少すると、ベローズは図の左方向に動き、作動板 (てこ板) を介して電気接点を閉じる。このように接点が閉じて初めて警報を発することから「スイッチ」の名称で呼ばれている。今回開発したセンサはガス漏れ検出を上記の従来スイッチと同じ機構で

図1 ガス密度スイッチの動作原理

Fig.1 Principle of Conventional Gas Density Switch.

実現しつつ、電気接点を新しく開発した光ファイバ検出部に置き換え、圧力の変化をアナログ的に検出する新しい機能を有することから従来型のスイッチと区別する意味で「センサ」と呼ぶことにする。

〈2・2〉 光ファイバ検出の原理 今回開発したセンサでは、圧力の変化をペローズの伸縮変位に置き換え、その変位によって光ファイバに曲げによる伝送損失変化を発生させる方法を採用した。伝送損失を測定量としたのは市販の光測定器によって評価でき、また後述のようにOTDR (Optical Time Domain Reflectometer: 光ファイバ後方散乱光測定装置) によって1本の光ファイバ上に多数存在するセンサを1台の装置によって分離検出することが可能だからである。

光ファイバ中では、コア (高屈折率部分) とその周囲のクラッド (低屈折率部分) 間の全反射条件を満足する光のみがコア内に閉じこめられて光ファイバ中を進む。このため、光は光ファイバの径方向と軸方向の位相関係から特定の反射角を持った光線の組 (伝搬モード) だけが伝搬可能となる。しかし、光ファイバを曲げると、それまで伝搬モードであった光が曲げの部分で全反射条件を満足しなくなり、クラッドに屈折し、コアから外部へ放射してしまう (放射モード) ⁽⁴⁾。このようにして曲げ部分では損失増加が発生する。この曲げによる伝送損失に関しては、理論的に種々取り扱われており、D.Marcuse⁽⁵⁾の式によれば、シングルモードファイバを半径Rに曲げたときの単位長さ当りの損失 α は次式で表される。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi} \kappa^2 \exp[-\frac{2}{3}(\gamma^3/\beta^3)R]}{4 \gamma^{3/2} V^2 \sqrt{R} (\ln \gamma/a)^2}$$

κ, γ, β : 伝搬定数

V: ファイバパラメータで決まる正規化周波数

a: コア半径

この式から、伝搬定数、正規化周波数、コア半径は、使用する光ファイバの種類、光源波長から決まる定数であり、曲げによる光ファイバの伝送損失は理論上曲げ径、

図2 SMファイバの曲げ損失特性例

Fig.2 Relation between bending and optical transmission loss for a single mode fiber.

及び曲げ長さによって決まる。

図2はシングルモードファイバ (以下、SMファイバ) の曲げ損失の特性の測定例を示したものである。この結果は、一定の曲げ径に対して、損失増加量は巻き回数すなわち曲げ長さに比例して増加することを示している。これは1本の光ファイバに複数のセンサを取り付けたマルチポイントセンサシステムを考えた場合、SMファイバを使用すると近端から遠端まで複数のセンサが同時動作しても図3のように各センサがほぼ同じ損失変化を発生することを意味する。

そこで開発したセンサでは多点同時検出を考慮してSMファイバを採用し、試作検討を行い光ファイバの曲げ径と曲げ構造を決定した。

図3 OTDRを使った分布型多点計測の概念

Fig.3 Configuration of a multi-point sensing system using an OTDR and measured optical loss distribution caused by distributed sensors working simultaneously.

3. センサの構造と仕様

〈3・1〉 光ファイバガス密度センサの基本構成

図4に開発したセンサの基本構成を示す。圧力変化を変位に変換するために信頼性と有用性の認められている従来のガス密度スイッチの機構 (圧力-変位変換機構) を採用し、従来の電気接点に代えて光ファイバを曲げて伝送損失を生じさせる変位-曲げ損失変換を組み合わせた構造とした。ここで、センサ設計の重要なポイントは光損失の繰り返し安定性と機械的な信頼性である。

まず、安全に光ファイバを曲げて安定した損失を発生

するために、図5に示すようなファイバを曲率一定の丸い部品で挟み込む構造とした。3点の円周で挟むようにしたことで安定した曲率で安全にファイバを曲げることができ、かつ、この構造は一定曲率移動円板の移動量に応じた光損失を発生させるため、機械的な変位を生じる上記の圧力変位変換機構との組み合わせにも適している。次に、光損失の繰り返し安定性を実現可能とするために最も特筆すべき構造として、光ファイバに僅かな力のバネ張力を加えることとした。この定張力と一定の曲げ径によって、曲げによる損失変化を繰り返し安定に保つことを可能とした。

この構造においては、作動板により生じる力と変位、およびファイバを曲げるのに必要な力と変位の関係が重要な要素となる。基礎実験と試作の繰り返しにより、曲げ半径10mm、作動板の移動量2mm、光ファイバの曲げ力50gから100gが最適であり、この条件に於いて1 dBの光損失増加が検出できることを確認した。この1 dBという変化量は市販のOTDRによって信頼性ある分解能で十分検出可能な値として選択したものである。

図4 光ファイバガス密度センサの構造図

Fig.4 Configuration of the fiber-optic gas density sensor.

図5 変位-曲げ損失変換部

Fig.5 Basic structure of the displacement to bending transformer.

更に、センサの機械的信頼性として光ファイバの破断が心配される。光ファイバには常時は曲げが加わらず、定張力を付与するためのバネ力を除いては歪み加わらない。また曲げによりファイバを押しつぶさないように機械的なストッパーを設けた。光ファイバケーブルにお

いて広く用いられるスクリーニング試験を行った光ファイバの静的疲労による強度劣化とその破断確率の式によれば⁽⁶⁾、本センサを構成する上で光ファイバの破断する確率は非常に小さく、0.1%以下であると推定される。

〈3・2〉 光ファイバガス密度センサの仕様 試作したセンサ仕様を表1、外観を図6に示す。監視対象となるGILの定格圧力は3.5kgf/cm²・G(0.34MPa)、絶縁性能の点から許容される最低圧力（最低保証圧力）は3.0kgf/cm²・G(0.29MPa)である。従来の密度スイッチは、3.0kgf/cm²・Gで必ず警報を発するためにスイッチの誤差（±0.15kgf/cm²）を考慮して、3.15kgf/cm²・G(0.30MPa)に警報を設定して使用していた。

表1 光ファイバガス密度センサ仕様

Table 1. Specifications of the sensor

項目	圧力(20°C)	光損失
定格圧力	3.5 kgf/cm ² ・G (0.34MPa)	≤0.2dB
第一警報レベル	3.28kgf/cm ² ・G (0.31MPa)	>0.2dB
第二警報レベル	3.15kgf/cm ² ・G (0.30MPa)	≥1.0dB
センサ誤差	±0.15kgf/cm ² ・G (±0.015MPa)	—
環境条件	温度 -5°C~50°C 湿度 ≤90%

図6 光ファイバガス密度センサの外観図

Fig.6 View of the fiber-optic gas density sensor

①変位-曲げ損失変換部②光ファイバ収納部③光ファイバ
④感温筒⑤ベローズ⑥作動板⑦ガスコネクタ

図7に開発したセンサの代表動作特性を示す。図7以降、動作特性は、定格圧力で封入された感温筒と被測定ガス絶縁機器の圧力差（差圧）によって表現していく（このため、定格圧力3.50kgf/cm²・Gは差圧0.00kgf/cm²、最低圧力3.00kgf/cm²・Gは差圧-0.50kgf/cm²）。図7の動作特性では、今回開発したセンサが従来の密度スイッチの圧力-変位変換機構部を持っていることから、この部分の機械的な動作誤差を考え、精度目標を従来の密度スイッチと同等の-0.35±0.15kgf/cm²で確実に警報を発することとし、これを第二警報レベルとしてこのとき光損失1 dBとなるよう設計を行った。また図7の曲線から分かるように本センサは警報レベルに達するまでのガス圧

低下に応じて光損失が連続的に増加する。この変化を利用し、第一警報レベルを設けることにより従来のスイッチにはない圧力低下の早期発見と傾向監視が可能となる。また実用面での配慮として、図6に示すように光ファイバの接続余長を収納する処理板をセンサ本体と一体化し、光ファイバの保護と共に取り扱いを容易にした。

図7 光ファイバガス密度センサの動作特性
Fig.7 Operating characteristic of the sensor

4. 評価試験

評価試験では、1 dB の損失増加を発生させる差圧変化（誤差）について評価を行った。試験項目と結果一覧を表2に示す。

表2 試験条件と結果一覧

Table 2. Test conditions and results

項目	試験条件	試験結果
1 動作特性試験	温度20℃、湿度60%の環境条件にて動作特性を測定。	最大ばらつき ±0.01kgf/cm ² 以下 (図8参照)
2 温湿度特性試験	20℃・60%→50℃・90%→20℃・60%→5℃を1サイクルとして5サイクル実施し、各環境条件にて動作特性を測定。	最大ばらつき ±0.06kgf/cm ² 以下 (図9参照)
3 繰り返し耐久試験	20℃・60%(10000回)→50℃・90%(10000回)→5℃(10000回)→50℃・90%(10000回)→5℃(10000回)の繰り返し動作を行い、10000回毎に動作特性を測定。	合計50000回動作において異常なし。
4 振動試験	無負荷状態で全振幅2mm、振動数2000cpmを前後、左右、上下3方向に各2時間加える。	外観破損等の異常なし。 試験前後にて動作特性に変化なし。
5 落下衝撃試験	落下衝撃試験機により、衝撃値50Gとなる高さから自然落下させ、前後、左右、上下3方向に各1回加える。	外観破損等の異常なし。
6 耐圧力試験	10kgf/cm ² ・G、10分間に耐えることを確認する。	破損・圧力低下等の異常なし。

(1)動作特性試験（図8） 定格温度（20℃）におけるセンサ動作の繰り返し再現性は初期設定値±0.01kgf/cm²内に収まっており、光ファイバへの定張力付与構造によって安定した繰り返し動作を実現できていることが確認できた。

(2)温湿度特性試験（図9） 耐熱、耐寒、耐湿度の

それぞれの性能を確認するため、使用環境条件内で温度、湿度を変化させ、センサの動作特性を調査した。本センサは感温筒内圧力からの差圧で動作するため、本試験のように感温筒周囲温度が変化すると感温筒内部圧力も変化するため同一の光損失を発生させる被測定ガス圧が異なる。このためGILの圧力を規定している定格温度20℃時の圧力に換算して評価を行った。今回の試験では-5～50℃、相対湿度90%の条件で、警報誤差±0.06kgf/cm²と目標値±0.15kgf/cm²以下を十分満足する結果であった。

図8 動作特性試験

Fig.8 Operating characteristics of the sensor in repetitive operating test

図9 温湿度特性試験

Fig.9 Operating characteristics of the sensor in heat cycle test

(3)繰り返し耐久試験 繰り返し動作10,000回毎に環境条件を変化させ、合計50,000回の耐久試験を実施した。繰り返しによる動作特性、外観異常の有無等、問題なく良好な結果をえることができた。

(4)振動試験・落下試験 既存のガス密度スイッチと同じJIS（電気電子部品の振動試験等）に準拠した条件にて振動試験・落下衝撃試験を実施し、外観破損異常は見られず、また試験前後での動作特性にも変化は見られず、良好な結果であった。

(5)センサ全数の動作特性ばらつき調査 最終的に

は、新名火東海線に適用するために製造した全120台の光ファイバガス密度センサについて、20℃での個別の動作特性を測定し、その製造におけるばらつきを調査した。調査結果を図10に示す。調査方法は、光損失1dB増加時の差圧に対するセンサの個数とした。センサの目標特性は光損失増加量1dBを発生する差圧が -0.35kgf/cm^2 であり、全センサに対して $-0.35 \pm 0.04\text{kgf/cm}^2$ という結果であった。これは製造時において十分許容できる値であり、実際に適用する上で何ら問題ないことが確認できた。

図10 全センサの度数分布

Fig.10 Distribution of alarm pressure which causes 1dB of optical transmission loss.

5. GILの圧力監視システムの開発

〈5・1〉 システム構成 新名火東海線用として開発したガス圧監視システムを図11に示す。この線路は直長3.25km、2回線6相で構成されたGILである。各相は1相当たり20のガス区画で構成されており、合計120台のセンサを必要とする。

OTDRの計測可能距離や精度の制約からGILの各相に1本の光ファイバを使用し、光スイッチで測定相を切り替える構成としたため、正常時は1本の光ファイバで20個のセンサを同時にモニタしている。また、本方式では、センサ1個の損失増加量を最大1.5dBに制限し、取り付けによる接続損失を0.2dB、システムのダイナミックレンジ（許容損失）を15dBとみた場合、光ファイバ自体の損失を考慮しても、5個のセンサの同時動作時に、計測器から最遠方にあるセンサの第二警報レベルである1dBを検出可能である。また、光ファイバをループ状にして両端から独立に測定できるようにすることで、光ファイバの断線や測定器の故障に対応できるようにした。断線検出や光ファイバの切り替えは制御コンピュータにより自動的に行える。

OTDRの測定データは図12のようになる。センサ位置前後の後方散乱光強度の差よりセンサ損失増加量を算出する。

OTDRによってセンサ損失を精度よく検出するための設定パラメータとして、平均化処理回数と光源のパルス幅がある。平均化処理回数（時間）を多くするほど、ま

たパルス幅を広くとるほどセンサ損失値は高精度に検出できる。しかし、一方で距離分解能が悪くなり隣接センサが識別できなくなる等の欠点が生ずる。新名火東海線ではセンサが100～170m間隔で設置されており、最適なパルス幅は100ns、平均化処理回数は 2^{17} 回(131,072回)を選択した。この状態での損失測定精度は $\pm 0.01\text{dB}$ 以内であることを確認した。

図11 ガス圧力監視システム

Fig.11 System configuration of the gas pressure monitoring system for the Shinmeika-Tokai GIL.

図12 OTDR波形

Fig.12 Measured data by OTDR

〈5・2〉 検出方式と現地試験結果 前述の通り光ファイバガス密度センサは、ガス圧変化の傾向を監視することができる。この特徴を利用して、本システムでは表3に示す2種類の警報レベルを設けた。これにより微少なガス漏れを限界の圧力に到達する前に、より早く見つけることができる。またガス圧低下の時間的記録が可能であることから、ガス漏れの程度と進行時間を知ることができ、保守対応に役立てることができる利点がある。

本システムの処理フローを図13に示す。第一警報レベル（圧力 $3.28\text{kgf/cm}^2\cdot\text{G}$ 、光損失0.2dB）に達した時に、自動的に第一警報発生相のみを集中的に測定する「警報モード」に切り替わる。さらに、光損失の増加割合から圧力の変化速度を推定し、第二警報レベル（圧力 $3.15\text{kgf/cm}^2\cdot\text{G}$ 、光損失1.0dB）到達予想日時を出力表示する機能を設けた。これは、保守担当において対応策を考える上での貴重なデータとなり、本センサシステムの

特徴的な機能である。操作性の良さもまたこのシステムの特徴であり、保守担当は自動アラームを画面上で、知ると共に簡単な操作で圧力変化の履歴等を確認することが可能である。表示画面例を図14に示す。

システム構築後、120の全ガス区画のセンサに対して実際に圧力を低下させた試験を実施し、このシステムの健全性と有用性を確認した。

表3 警報レベルの設定状態
Table 3. Setting of alarm level

	光損失	ガス圧力(20℃)
第一警報レベル	0.2dB	3.28kgf/cm ² ・G
第二警報レベル	1.0dB	3.15kgf/cm ² ・G

図13 監視システム処理フロー
Fig.13 Processing flow for alarm detection

図14 表示画面例
Fig.14 Graphical user information(GUI)
of gas pressure monitoring system

6. 結言

ガス絶縁機器のガス漏れを検出する光ファイバガス密度センサを開発し、耐久性等の評価試験を実施した。さらに、GILのガス漏れを検出する新しい光ファイバガス圧力監視システムを開発し、世界最長の洞道布設GILである新名火東海線に適用した。このセンサシステムの特徴は次の通りである。

- 1) 電気素子、センサ電源が不要で伝送装置を必要としないため、簡易な監視システムが設計可能
- 2) 微少なガス漏れが検出可能で、ガス漏れの早期検出およびガス圧低下の傾向監視が可能
- 3) 電磁誘導対策が不要
- 4) 圧力検出部と感温筒に実績が多く信頼度の高いガス密度スイッチの機構を採用

以上によりこの方式は高信頼性と共にコストメリットを有しており、保守の効率化等の面でも効果を期待できる。

このシステムは1998年2月より新名火東海線運用と共に運用を開始している。今後のGIL線路の監視システムおよび、高機能化、光システム化が進められているガス絶縁機器の保守診断システムに本センサが役立つことが望まれる。

なお、本センサの試作評価には(株) 鷺宮製作所のご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

(平成10年8月3日受付、同10年11月9日再受付)

文 献

(1) 五味 他:「世界最長の大容量管路気中送電線(GIL)の開発と実用化」、電気評論 1998年3月号 pp11-15
(2) 宮崎 他:「GIL用光ファイバ圧力センサの開発」平成8年 電気学会 電力・エネルギー部門大会、544
(3) 宮崎 他:「GIL用光ファイバガス圧センサの開発(第2報)」平成9年 電気学会 全国大会、6-345
(4) 福富:「[改訂版] 光ファイバケーブル」、電気通信協会 昭61年発行
(5) D.Marcuse; “Curvature loss formula for optical fibers”, J.Opt.Soc.Am., Vol.66, No.3, March 1976
(6) Y.Mitsunaga et al.; “Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing”, J.Appl. Phys. Vol.53, No.7, pp482-488(1982)

宮崎 明延

(正員) 1958年1月24日生まれ。1981年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社。現在、同社工務部技術開発グループ副長。主として、地中送電線の設計および開発業務に従事。

八木 学

(正員) 1964年3月24日生まれ。
1987年3月東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社。現在、同社名古屋支店工務部計画グループ副長。主として、地中送電設備の計画業務に従事。

小林 真一

(正員) 1966年6月2日生まれ。
1989年3月横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業。同年4月中部電力(株)入社。現在、同社中央送変電建設所地中線工事課主任。主として、地中送電線の建設業務に従事。

二島 英明

(正員) 1959年1月4日生まれ。
1983年3月神戸大学大学院工学研究科計測工学専攻修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。現在、同社電力システム技術研究所エネルギー機器研究部主席。応用物理学会、計測自動制御学会会員。

那倉 裕二

(正員) 1965年10月11日生まれ。
1990年3月熊本大学工学部機械工学科卒業。同年4月住友電気工業(株)入社。現在、同社電力システム技術研究所に所属。主として電力・エネルギーのシステム機器開発に従事。

東 秀訓

(正員) 1971年2月27日生まれ。
1993年3月大阪大学工学部電子工学科卒業。同年4月住友電気工業(株)入社。現在、同社電力エンジニアリング事業部電力情報システム部に所属。主として地中線設備監視システムの設計開発業務に従事。