# 高性能センサによるCBMと SF<sub>6</sub>ガス排出抑制技術

亀井光仁\* 西田智恵子\*

CBM Management and Reduction of SF<sub>6</sub> Gas Emission Using High Accuracy Sensor

Mitsuhito Kamei, Chieko Nishida

## 要 旨

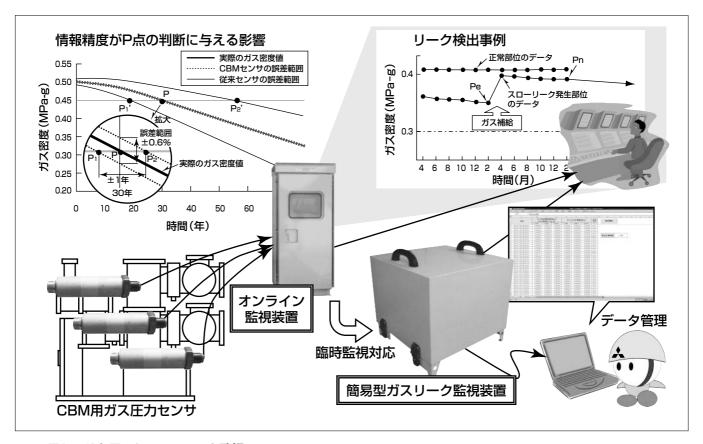
設計期待寿命30年を超えた高経年ガス絶縁開閉装置で、現在も運転が継続されているものが増加しつつあり、保守の合理化・省力化を図りながらも電力供給の信頼度維持のために、機器の健全性をいかに正確に把握するかが課題となっている。一方、この課題を解決する保守方式の一つとして注目されてきたCBM(Condition Based Maintenance)は、その実践で状態情報の定義、特に誤差が管理に与える影響は十分に検討されてきていない。

本稿ではCBMに使用する情報の誤差影響をP-Fカーブ (Potential-Failure Curve)を利用して考察した結果,長寿命設備のCBM管理で設備情報が精度関連で備えるべき性能として,"状態軸でP点(注1)を早期に検出できる高い精度"と,"時間軸でP点の推定誤差を広げない長期安定度"が(注1) P-Fカーブ上で劣化に最初に気付く点。

重要であることを明らかにした。

また、地球温暖化ガスの一つとして年々管理要請が強まっているSF<sub>6</sub> (六フッ化硫黄) ガスのリークを題材として、精度に関するセンサの仕様差がCBM運用に与える影響を、CBM用に開発されたセンサと従来型のセンサで比較試算した。また実フィールドでの長期収集データによる検証も実施した。

これらの検討によってセンサ精度が機器のCBM運用に与える影響が明らかになるとともに、検証テーマとして選択したSF<sub>6</sub>ガスのリーク管理について、JEC-2350-2005の規定を十分に満足するCBM管理が可能となることが確認され、ガスリーク時の現場管理を支援する装置として製品化を行った。



## CBM用センサを用いたスローリーク監視

長寿命機器の劣化診断を行う場合、CBM用に開発したセンサでは正確に劣化時期の推定が可能なのに対し、従来型の長期安定性が不足したセンサでは大きな累積誤差が発生し、CBM運用による劣化時期の推定が困難であった。これらの傾向をSF₅のリークを題材として長期間収集したデータで検証し、現場でのガスリーク管理用に新たに開発した簡易型ガスリーク監視装置に反映した。

\*系統変電システム製作所 33(677)

## 1. まえがき

1960年代末から変電分野で導入が進んできたガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear: GIS)は、初期の機器では設計期待寿命を超えて現在も運転が続いているものが多く、保守の合理化・省力化を図りながらも、電力供給の信頼度維持のために機器の健全性をいかに正確に把握するかが課題となっている。

この課題を解決する概念として注目されたのがRCM (Reliability Centered Maintenance)で、その中でも機器の状態情報に即した保守を施すCBMは重要な選択肢の一つとなっている。しかしながら、このCBMの実践で状態情報の定義、特に誤差が管理に与える影響は十分に検討されてきていない。

本稿ではRCMの中で扱われているP-Fカーブを利用し、CBMに使用する情報の誤差影響を考察した。また、地球温暖化ガスの一つとして年々管理要請が強まっているSF。ガスのリークを題材として、センサの仕様差がCBM運用に与える影響の試算、及び実フィールドでの長期収集データによる検証を実施した。また、これらの成果を基に"簡易型ガスリーク監視装置"を製品化した。

### 2. P-Fカーブにおける情報誤差の扱い

情報誤差の影響に関する試算は、定格0.5MPaでSF<sub>6</sub>ガスが封入されたGCB(Gas Circuit Breaker)でガスリークが発生したことを想定した。ガス開閉機器のSF<sub>6</sub>ガスリーク管理基準は、JEC-2350-2005でIEC62271-203と整合性を図って0.5%/年になっている。この結果、リーク率が0.5%/年を超えていないことの管理が必要となるが、CBMの観点からはガスリークに気付くタイミングが、センサ情報の誤差によって、どの程度ずれるかも問題となる。

試算では**表1**に示すCBM用に開発したガス圧力センサ<sup>(1)</sup> と、従来型の市販ガス圧力センサの誤差性能を利用して比較した。なお表中の測定精度は非線形誤差とヒステリシスによる誤差を考慮した値で固定誤差の一つに相当する。

表1に示したCBM用センサ、従来センサの誤差要因を、 経年によってリーク率が変化するP-Fカーブに重ね書き したものを図1に示す。なおリーク率変化は、初期0.1%/年、 中期0.3%/年、後期を限界リーク量0.5%/年と仮定したも

表1. ガス圧力センサの仕様

	CBM用センサ	従来センサ
測定範囲	0∼1MPa-Gauge	0∼1MPa-Gauge
分解能	10Pa (100dB)	1kPa (60dB)
精度*	± 0.1%	± 0.5%
温度特性	± 0.01%/°C	± 0.05%/°C
長期安定性	$\pm 0.015\%/y(0\sim 3^{rd}y)$	± 0.1%/y
	$\pm 0.004\%/y(4^{th}y\sim)$	

※ 3σ値

ので、ガスリークに最初に気付くタイミング(想定P-FカーブのP点)をガス密度が0.05MPa低下しガス補給指令が出る時点とすると、P点はほぼ30年となり、Oリングの劣化が顕在化する可能性が指摘されている時期にほぼ一致する。なお、試算ではセンサ部の温度変化を最大10℃/日とし、固定誤差は測定精度と温度特性の2乗平均で与えている。

図1で誤差を加味した場合のCBM用センサの P 点判定タイミング $P_1$ ,  $P_2$ は $\pm 1$ 年程度のずれに収まっているのに対し、従来センサの $P_1$ ',  $P_2$ ' は-10年、+25年と大きなずれを示している。CBM運用では P 点をいかに早く安定して推定できるかが生命線とされており、従来センサでは事実上CBM管理効果は得られないと考えられる。

## 3. CBM用ガス圧力センサを使用したガス漏れ監視

試算した誤差特性を実際の屋外変電所環境で確認するために、所内変電所の84kVGISに両タイプのガス圧力センサとガス密度演算用の温度センサを設置し、図2の監視システムを構築して2005年5月10日から2006年5月23日までの年間データ収集を行った<sup>(2)</sup>。なお、試験期間中のGISタン

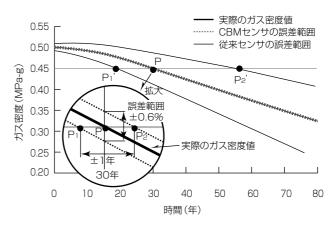


図1. 長期安定度の影響

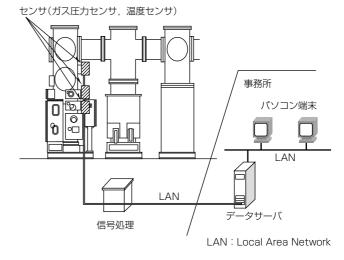


図2. 所内変電所監視システムの構成

クのガスリーク状況は定期的にビニル巻きによる蓄積法で確認したが、リークは観測されなかった(検証精度0.1ppm)。このことから得られたデータ誤差はすべてセンサによる検出情報の誤差となる。

CBM用センサ及び従来センサについて測定データを春から冬までの 4 シーズン別,及び 1 年通期で処理した場合のそれぞれの誤差の標準偏差を, 1 日の時刻別に図 3 にまとめた。図からガス密度演算誤差は,日の出とともに増加し15:00ごろピークを迎え,朝 3 時から 6 時の間に最小値となる。この傾向は 1 年を通じて同様であった。また,標準偏差の最小値は朝 6 時に,CBM用センサでは0.1%,市販ガス圧力センサでは0.65% (3  $\sigma$  で評価するとそれぞれ0.3%, 1.95%)となった。

ここで、ばらつきの主原因を気象変化に伴うガス温度分布不安定と推定し、年間データの中から異常気象によると考えられる特異点28点(月当たり2点ほど)を、気象台のウェザーレポートで照合し、スムージングフィルタ処理を施したあとのデータ群に対して統計的な手法によってリーク率の試算を行った。

日々のガス密度を縦軸(y軸), 測定日を横軸(x軸)にとると, ガスリークによるガス密度変化の一次回帰式は

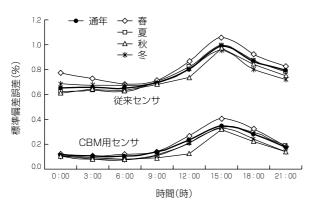


図3. ガス密度監視システムの年間誤差

CBM用センサを使ったリーク率測定は、 $3\sigma$ 値0.072%/年の性能が期待できるという結果になった。また、t 検定を利用した試算では、CBM用センサのフィルタ処理後のデータについて、片側有意水準2.5%の判定としてリーク率0.1%/年以下であることが確認されており、CBM用センサとこれら統計処理手法を併用することでJEC規定を十分に満足するCBM管理が可能となることが確認できた。

# 4. 変電所におけるリーク検出事例

屋外の実変電所にCBM用センサを設置し、ガスリークについてP-Fカーブ上のP点検出性能が向上した事例を図5に示す。

図5のデータは84kVの高経年GISで観測されたもので、横軸はフルスケール3年である。この事例は巡視点検でガス密度不足に気付き(CBM用センサは設置していたがデータの運用に入っていない段階。したがって、従来点検でのP点に相当。図ではPeと記載)ガス補給後にガス密度情報の変化をCBMセンサで追跡の結果、継続的な微量リーク傾向が継続していることを確認した(CBMセンサによるP点に相当。図ではPnと記載)。このあとに臨時点検で巡視の死角部にあった小さな錆(さび)を発見、補修している。この事例ではガスリーク率は1%/年程度の大きな値ではあったが、CBM用センサによってP-Fカーブ上のP点の検出能力が大幅に向上かつ安定化したことが証明されたものである。

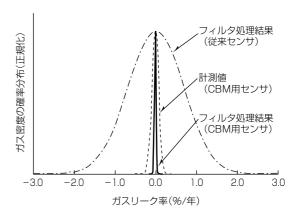


図4. フィルタ処理の効果

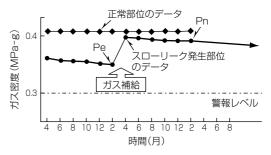


図5. 実変電所でのリーク検出事例

# 5. 可搬型リーク検出装置

所内変電所での検証データや $\mathbf{25}$ のような実変電所での検出事例を見ると、 $\mathbf{SF}_6$ ガスリークの管理はオンラインによる連続監視が有効と考えられる。しかしながらこれまでのオンライン型リーク監視装置は装置規模が大きく、個別の設計製造や現地据付けに時間を要するため、散発的な不具合など、緊急に管理が必要な状況には適しておらず、保守員による現場での継続監視業務で対応せざるを得ない状況であり、ガスリーク発生時は依然、現場保守の負担が増加する可能性がある。この状況を解決するために、ここまでの開発成果を採用することでオンライン型システム同等のセンシング性能を持ち、緊急応動が可能な機動性と保守の省力化を支援する遠隔通信機能を備えた"簡易型ガスリーク監視装置"を開発した(3)。

リーク監視にはCBM用ガス圧力センサを採用し、センサは各種配管アダプタを用いて、既設・新設を問わずガス補給口に設置可能である。



図6. 簡易型ガスリーク監視装置の外観

## 表 2. 簡易型ガスリーク監視装置の仕様

	ガス圧力センサ最大 3 点	
入力	温度センサ1点	
最高検出感度	0.0001MPa	
圧力計測範囲	0.0~1.0MPa·g	
温度計測範囲	-20~120℃	
保存データ	1日1点として2年相当分(730点)	
通信	直接接続通信(USBシリアルケーブル)又は電話回線に対応	
電源	AC100V(85~110V), 100VA以下	
装置サイズ	W500 × D500 × H500 (mm)	
質量	25kg	
使用環境	周囲温度:-20~+40℃	
<b>灰</b>	屋外設置(直射日光が当たらない場所に設置するものとする)	

装置の外観を図6に、主要な仕様を表2にまとめて示す。可搬型ではあるが、現場に一定期間仮設されて利用することが想定されるため、屋外設置型でかつ一定の質量を持たせている。監視機能としては最長2年間分(1日1点保存の場合)のデータを保存し、長期間のスローリーク監視が可能である。また、記録周期は最短1分ごとまで変更が可能であり、スローリークの進展様相に合わせた運用にも配慮している。

データ通信については電話回線による遠隔監視を可能とするとともに、USB(Universal Serial Bus)シリアルケーブルによるパソコン通信もサポートしており、巡視員による現場でのデータ回収による運用にも対応可能である。

### 6. む す び

CBM方式による設備管理への移行がうまく機能しない要因の一つに、設備の状態情報の精度が状態判断に与える影響を十分議論していないことがある。

本稿では、保守のCBM化を成功させるために必要な情報精度の考え方を述べるとともに、SF<sub>6</sub>ガスリーク管理を題材として情報の精度がCBM運用に与える影響を議論した。その結果、長寿命設備のCBM管理を行う場合に設備情報が備えるべき性能として、従来議論されている"状態軸でP点を早期に検出できる高い精度"以外に、"時間軸でP点の推定誤差を広げない長期安定度"が重要であることを明らかにした。

また、CBM用として開発したガス圧力センサと従来型のガス圧力センサを使用した長期収集データによって、設備情報の精度差が与える影響を検証した。

検証に適用したガスリーク監視では、統計処理を併用することでJEC規定を十分に満足するCBM管理が可能となることを確認し、これらの成果を現場のガスリーク緊急管理用の可搬型リーク検出装置として製品化した。

#### 参考文献

- (1) 西田智恵子, ほか:GIS/GCBのCBM化を推進する高機能化センサの開発, 電気学会論文誌B, **121**, No.9, 1193~1198 (2001)
- (2) 亀井光仁,ほか:センサ情報の精度がGIS/GCB保守のCBM化に与える影響,電気学会論文誌B,129, No.1,215~221 (2009)
- (3) 伊藤隆史, ほか:可搬型SF<sub>6</sub>スローリークモニタ装置 の開発,電気学会B部門大会予稿,349 (2008)