

変電所機器劣化監視診断技術の開発

赤木 雅陽* 田中 弘毅** 吉井 剣* 潮木 知良***

Evaluation of the Deterioration of Sub-Station Equipment by Condition Monitoring Devices

Masataka AKAGI Hiroki TANAKA Tsurugi YOSHII Tomoyoshi USHIOGI

In order to prevent equipment damage and to extend equipment lifetime, the early detection of the deterioration is necessary in Sub-Stations. So, we developed three kinds of condition monitoring systems. First, the volatiles released from the insulator of power feeding cables during overheating can be detected by a gas condition sensor. Second, the mechanical damage of manipulation devices in circuit breakers can be detected by a piezo-electric vibration sensor. Third, the partial electric discharge of insulators can be detected by a wall surface voltage sensor. In addition, we developed a diagnostic algorithm of the deterioration of Sub-Station equipment.

キーワード：変電所機器，過熱，劣化検出，絶縁劣化，部分放電

1. はじめに

電鉄用変電所における機器の劣化状況は、定期検査や一部の監視データで把握している。現在の検査の方法と周期については、文献1によれば、通常各鉄道事業者が社内規程により表1のように定めている。

表1 現在の検査の方法と周期¹⁾

検査の種類	検査内容	検査周期
目視検査（巡回検査）	主に目視等の五感による異常確認	通常月単位
定期検査（個別検査）	絶縁抵抗測定・動作時間測定・絶縁油の成分分析等	通常年単位
精密検査（オーバーオール）	定期検査に加え消耗部品の交換等	上記より周期が長い場合が多い

例えば直流高速度遮断器の保全にあたっては、通常時間基準保全（TBM：Time Based Maintenance）に基づき数週間毎の目視点検や簡易点検，年～数年毎ないしは故障電流遮断時に個別検査を行うのが一般的であり，個別検査時の代表的な検査項目としては開閉時間特性，ギャップ長，絶縁抵抗等の測定が挙げられる。このように，電鉄用変電所のメンテナンスは保全巡回等に人手を多く必要としており，特に今後，保全技術者の確保が困難になっていく中で，メンテナンスの品質を維持し，電力設備の信頼性を向上していくことは重要な課題である。

* 電力技術研究部 き電研究室
 ** 電力技術研究部 き電研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）
 *** 人間科学研究部 生物工學研究室

一方，徐々に劣化していく機器について取り替え時期を検討する，あるいはTBMでは把握しづらい故障予兆を早期に検出するために，近年では一部設備において温度や絶縁ガス圧力などの情報による状態監視保全（CBM：Condition Based Maintenance）の取り組みが進められている。CBMによる保全を行うためには，営業中の設備に架設可能なセンサである必要がある他，故障モードに応じたセンサを選定した上で，診断技術を検討する必要がある。表2に各変電所機器の故障モードとセンサ技術の例を示す。

このような状況を踏まえ筆者らは，変電所機器の代表

表2 各変電所機器の故障モード例

	故障モードの例	把握すべき内容	現状のTBM	CBMに適する可能性のあるセンサ例
電力ケーブル	過熱	健全性	目視（示温ラベル）	温度センサ，ガスセンサ等
	地絡	健全性	絶縁抵抗	地絡センサ
遮断器	機械的損傷（操作機構）	健全性・故障予兆	個別検査（動作時間）	振動センサ
変圧器	絶縁劣化（部分放電）	健全性・故障予兆	個別検査（油中ガス分析）	放電センサ・電流センサ
	絶縁紙劣化	故障予兆・取替え時期	個別検査（油中ガス分析）	放電センサ

特集：電力技術

例である電力ケーブル、遮断器、変圧器を対象とし、それら機器の過熱、機械的損傷、絶縁劣化を、ガス、振動、部分放電などで計測する要素技術を検証するとともに、各要素をトレンド分析するための監視診断装置を開発した。本稿ではその概要を紹介する。

2. ガスセンサによる配電盤過熱検知手法

2.1 過熱事象を検知するガスセンサ

変電所は変圧器や配電盤などの各種機器から構成されている。配電盤故障の原因の1つに電力ケーブル等の過熱があげられる。電力ケーブルや電気機器の絶縁材料が過熱状態になると、可塑剤等の揮発性有機化合物（VOC: Volatile organic compounds）が放出される。そこで、火災に至る前の前兆段階でVOCを検知できれば被害を軽減できる可能性がある。

筆者らはこれまでに、ガスクロマトグラフィーを用いた電力ケーブル等の構成材料に含まれるVOCの成分分析と、検出手法の検討を行ってきた²⁾。電力ケーブルの過熱劣化モデルを図1に示す。ケーブル被覆材の構成要素の一つであるビニルシースには、ケーブルに可撓性を持たせる目的で、基材であるビニルに通常約20%の割合で可塑剤が混合されている。導体の過熱によってビニルが軟化すると可塑剤は気化しやすくなる。例えば変電所に敷設されている電力ケーブルを供試物としてVOCの成分分析を行ったところ、可塑剤として利用されている1～2種類の特徴的な成分（例えば1-ドデカノールや2-エチル-1-ヘキサノール）が検出されている。

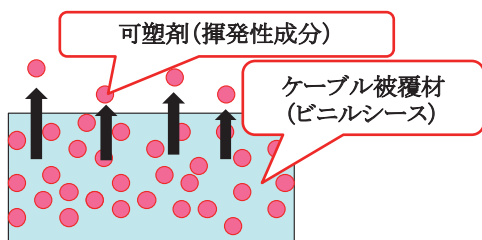


図1 電力ケーブルの過熱劣化モデル

また温度ごとの可塑剤放出特性（検出量の相対値）を比較すると、温度が100℃を超えると検出量が急激に大きくなることが判明している。これらの成分は常规使用温度（通常90℃）では放出が少なく、過熱時に放出が多くなるという特徴がある。この特徴から、VOCは異常の検知対象に適していると考えられる。

先に挙げた特徴的な成分等はVOCの一種であり、VOCに対応するセンサであれば簡易に検知可能である。そこで、ケーブル被覆材の過熱劣化に伴うVOCを半導体式ガスセンサで検出する配電盤内ケーブル過熱検出装置を試作した。

今回試作した装置は、図2に示すように半導体式ガスセンサヘッドとデータ処理部から構成されている。空气中に含まれるVOCを自然対流により半導体式ガスセンサヘッドに付着させ、その際の抵抗値変化をガス濃度として検出する方式であり、シックハウス対策として普及している低濃度用センサヘッド（検出対象濃度は1～10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度）を活用している。本装置はリアルタイムでの時系列トレンド計測を可能とした他、ある整定値以上の濃度になった場合に警報を出力する機能を有しており、常時監視に適している。変電所では図3に示す様に配電盤内にセンサを配置することを想定している。



図2 配電盤内ケーブル過熱検出装置

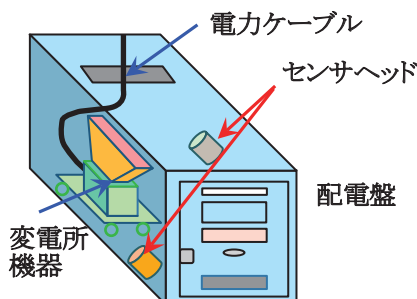


図3 ガスセンサの配置例

2.2 ガスセンサを用いた異常判定手法

ガスセンサの応答を検証するため、所内において供試体であるビニルシース（交流6600V用CV電力ケーブル用）を鉄製の導体に巻き付けた上で試験用ケース（1m×0.4m×0.4m）に収納し、200Aの電流通電によってシースを意図的に加熱してセンサ出力を測定した。熱電対で測定したビニルシースの表面温度とガスセンサの応答との関係を図4に示す。

供試ケーブルに含まれる可塑剤は1-ドデカノール（分子量186.34・沸点259℃）であり、ケーブル表面の温度上昇に伴ってセンサの指示値が徐々に上昇していくこと、またケーブル表面の温度が150℃を超えると温度変化に対する指示値の上昇度合いが急激に大きくなることを確認できた。これは、ガスクロマトグラフィーによる事前検証結果と同じ傾向であり、ケーブル表面から放出される揮発性成分をガスセンサにて検知していることを示

している。よって、センサ指示値が急上昇することをもって過熱と判定することができる。

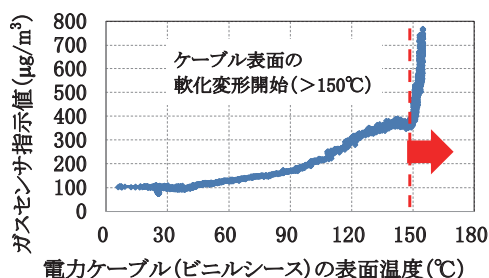


図4 所内試験によるガスセンサの応答特性

3. 振動センサによる遮断器動作監視手法

3.1 遮断器の開閉動作を監視する振動センサ

遮断器は機械的接点の開閉により電車線での短絡故障や過負荷に対する保護を行う重要機器であり、万一の際は迅速に開放動作する必要がある。遮断器の駆動機構は、動作に時間が掛かりすぎるとアーク放電等で接点が消耗してしまう一方、動作速度が早すぎると機構部材の金属疲労を招く恐れがあることから、所定の動作時間（通常数十～数百ms）で開閉動作を行う必要がある。

遮断器の開閉動作の良否を検討する手法としては、開閉時間特性や振動加速度特性を用いる手法などがある。遮断器の開閉動作に伴い、遮断器筐体には種々の周波数帯の振動成分が発生するが³⁾、一般には数百～10kHz程度の周波数帯域である。開閉動作の良否を振動波形から分析する場合、それらの数百～10kHz帯域を主な測定範囲とする圧電式振動センサを利用するのが適している。遮断器の操作機構近傍に振動センサを設置した例を図5に示す。

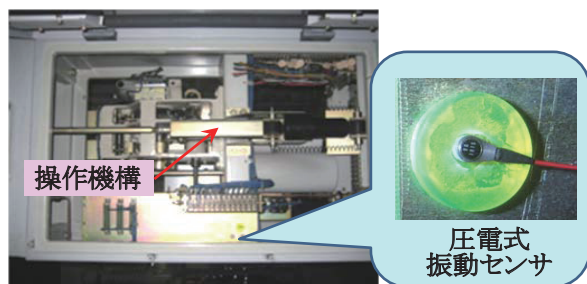


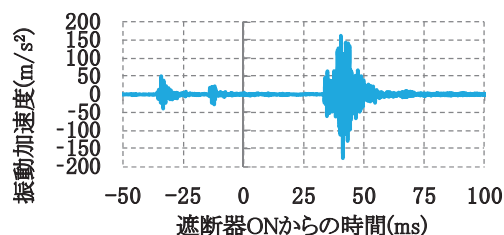
図5 遮断器への振動センサ設置例

振動センサが検知する波形には、遮断器筐体や操作機構に固有の周波数が含まれるが、生波形では分析が困難なため何らかの処理を施す必要がある。

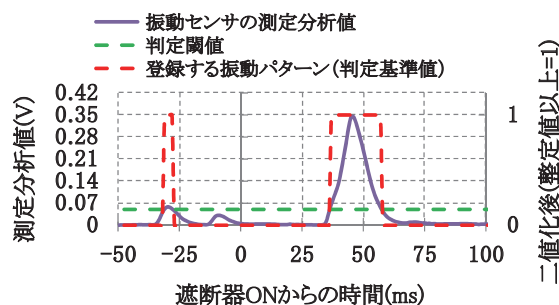
3.2 遮断器の動作良否判定プロセス

本研究で開発した波形処理と遮断器の動作良否判定プロセスを述べる。圧電式振動センサの出力を処理する方

法は様々有り、例えば最小二乗法の適用、あるいはハイパスフィルタの使用⁴⁾などがある。本検討では、他のフィルタに比べ安定して大きな出力が得られるバンドパスフィルタ（例えば中心周波数3200Hz）と実効値変換回路を具備したフィルタ処理分析装置により振動データを処理し、検討しやすい形態に変換した。図6(a)に投入動作時（閉路）におけるある形式の遮断器の振動波形例を、図6(a)で取得したデータをフィルタ処理した値（実線）と登録する振動パターン（破線）を図6(b)に示す。なお、「遮断器ON」とは投入動作中に補助接点が構成された時刻を指す。



(a) 遮断器の投入動作時における振動加速度例



(b) 振動パターンの登録

図6 振動データの分析例

次に、フィルタ処理後の判定プロセスを述べる。一般に、正常・異常の判定には統計による検定や最小二乗法による検定を行うことが多い⁵⁾。しかし遮断器の場合は、制御電圧や操作用空気圧などの変動により、正常動作であっても投入開放動作時の測定値がばらつく可能性がある。

そこで、一般に遮断器の動作は時間で管理されていることに着目し、簡易に安定した判定を行う手法を検討した。まずフィルタ処理を施した測定分析値がある整定値を超過しているかどうかをもって二値化パルス情報に変換する手法により、遮断器正常動作時のパターンを判定基準値として予め登録する。その上で、異常動作時の振動パターンと判定基準値とを、ある基準時間毎に比較し、その差分累計値がある一定値以上になったことをもって遮断器の動作状況の良否を判定する。図7に処理プロセスを示す。

二値化パルス情報に変換する手法の検証例として、0.2ms毎にサンプリングを行い遮断器動作の前100ms後200msの計1500データを処理した場合の結果を表3に

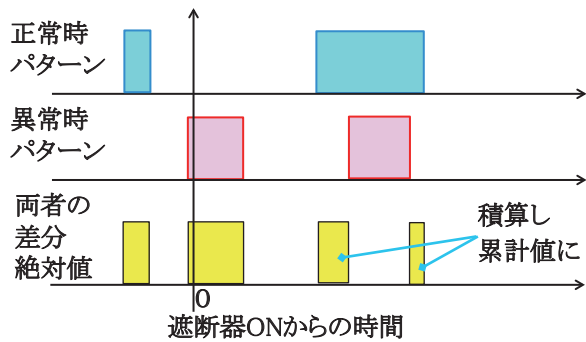


図7 良否判定の処理プロセス

示す。遮断器が正常な状態で三回投入動作データを取得し、二値化パルス情報合計値、及びフィルタ処理分析値を二値化せずに2乗して累計処理した値を比較した。

表3 二値化パルス情報に変換する手法の検証結果

	正常時 1回目	正常時 2回目	正常時 3回目	異常動作 模擬時
二値化パルス 情報合計値	140	146	139	107
2乗して累計処 理した値	4.94	3.01	2.75	1.73

表3に示すように、2乗して累計処理した値は、正常時においても大きなばらつきが生じるため、この値を判定に用いると誤判定の可能性が高いと考えられる。一方、二値化パルス情報合計値はどの正常時データでも安定した値が得られることが分かる。これによるトレンド分析を行うことで、良否判別を容易に行うことができる。

4. 部分放電センサによる絶縁物劣化監視手法

4.1 絶縁物の劣化を検出する部分放電センサ

変電所機器に利用されている絶縁物（例えば油入変圧器における絶縁紙、モールド型機器におけるエポキシ樹脂）は、ボイド（空隙欠陥）や不純物の有る部位、尖った形状の部位等の近傍において電界が集中し、微少な放電（部分放電）が生じることが知られている⁶⁾。この部分放電は長期間継続すると本格的な絶縁破壊に至る可能性があるため、早期に検知する必要がある。

部分放電を検出する手法としては様々なものがあるが、代表的な手法としては接地線に高周波パルス CT や ロゴスキーコイルなどを設置して数 MHz 帯域のパルス電流を計測する接地線電流測定法（高周波 CT 法）、数百 MHz 帯域の電波を UHF アンテナなどで受信する電磁波測定法、数十 kHz 帯域の超音波センサ（AE センサ）を用いて音響的に信号を受信する音響測定法が挙げられる。図8に概要を示す。また、設備運転中には測定ができないが、専用の課電トランスと結合コンデンサ、オシロスコープを用いて放電に伴うパルス電流を描画記録する ERA 法（広帯域法）が知られている⁶⁾。しかし、上記手法のいずれも、工場内試験では高精度な測定ができて、実際の営業運転中の環境では外来ノイズに対抗しうる S/N 比が得られないという課題がある。

一方、部分放電に伴い機器の各所から放電箇所へ流れる数 MHz 帯域（概ね 4 ~ 20MHz）のパルス電流は、筐体内部の浮遊静電容量、筐体表面のインダクタンス成分等を経路とする⁷⁾。筐体内部の加圧された空間における電流を測定することは容易でないが、筐体表面に電流が流れることに伴う電位差は測定可能である。そこで、本研究では変電機器の筐体表面に生じる電位差を測定する手法（以後、表面電位差式と称する）について検証した。

4.2 部分放電センサの比較検証試験

表面電位差式部分放電センサの出力信号に関する比較検証を所内試験、及び営業線変電所での試験により実施した。まず所内において劣化したモールド型変成器を供試物として部分放電を発生させ、既存の手法（高周波 CT 法）と表面電位差式部分放電センサとの感度を比較

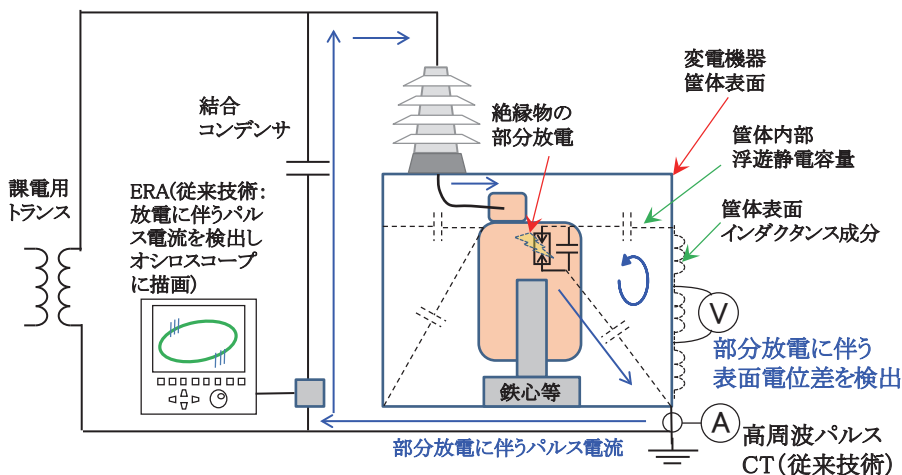


図8 表面電位差式部分放電検出手法と従来技術

表4 表面電位差式部分放電センサーの測定例

測定対象	周波数の例	測定電圧の例	想定ノイズ源	判別方法
交流き電用変圧器	約 900kHz	11.6mV p-p	AM ラジオ局	・支持架台と比較 ・隣接機器と比較
電力会社架空地線の 接地線	約 14.7MHz	25.6mV p-p	業務用無線	・隣接機器と比較
直流電源装置 (器具盤)	約 7MHz	92.8mV p-p	器具盤自身の スイッチング電源部	・支持架台と比較 ・商用周波数との同期確認

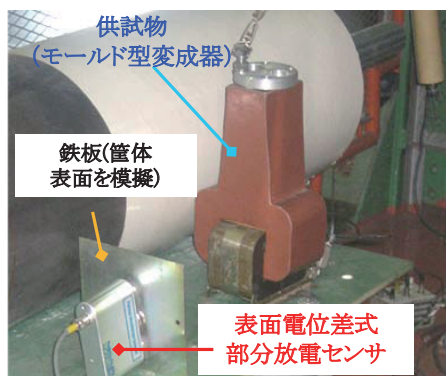


図9 部分放電センサの所内検証試験



図11 運転中の変電機器における部分放電測定状況

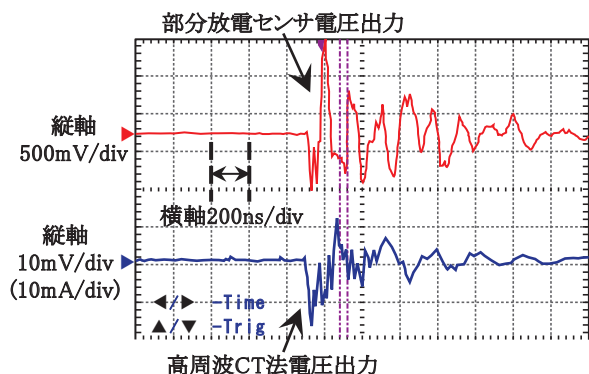


図10 既存手法との測定感度比較結果

した。センサと供試物を図9に示す。

測定結果を図10に示す。本試験では供試物に9.3kVを課電しており、図8に示すERA法による部分放電パルスの放電電荷量測定値は1780pCであった(健全な機器は通常数十pC以下の値となる)。図のように、両手法とも部分放電に伴う数MHz帯域の過渡的な波形を記録していることが分かる。また、高周波CT法に比べ、今回検討した表面電位差式部分放電センサは十分な出力(数十倍の電圧信号)が得られたことから、ノイズの多い現場においても高いS/N比での測定が可能と推測される。

4.3 フィールドでのノイズ環境の検討

実際の現場においては様々な外来ノイズが測定感度に影響を与えることが考えられる。そこで、営業線変電所において運転中の変電機器に表面電位差式部分放電センサを仮設し、各変電機器の部分放電の有無、外来ノイズの影響等

を検討した。測定状況を図11に示す。表面電位差式センサは変電機器筐体表面、及び比較のために変電機器の支持架台にも設置した他、高周波CTを接地線に接続した。

本試験では、き電用変圧器、コンデンサ、高圧配電盤、遮断器、機器架台、計器用変圧器、直流電源装置(蓄電器制御盤・器具盤)等を測定対象とし、表面電位差式部分放電センサと高周波CT法によりデータを取得したが、部分放電と思われる特徴的な波形(4~20MHzの周波数帯域で数百mVクラスの電圧出力)は両者とも記録されなかった。一方、外来ノイズと思われる様々な特徴的な波形が記録された。表面電位差式部分放電センサによる測定データの一例を表4に示す。

例えば、き電用変圧器及びその周囲の機器、支持架台には、AMラジオ局(873kHz)と思われる周波数の成分が連続的に流れ込んでいた。また、当該変電所は電力会社から変電所への送電線を雷害から守るために架空地線を送電鉄塔に敷設しており、その接地線は変電所接地網に接続されている。電力会社架空地線の接地線接続箇所及びその周囲の変電機器には、業務用無線帯域である14.7MHzの周波数の電流が連続的に流れ込んでいた。さらに、器具盤や直流電源装置においては、内蔵するスイッチング電源装置がノイズ源になっていた。

これらの事象では、①支持架台と比較、②隣接機器と比較、③商用周波数との同期確認(部分放電の場合は1周期における正負半サイクル毎に特徴的なパルスが発生する)といった手法を用いることで、検出された波形の原因が部分放電発生源かノイズ発生源か、あるいは外来

特集：電力技術

ノイズが侵入しているのかどうかを切り分けすることができる。

5. 監視診断装置の開発

ガス濃度及び部分放電データは中長期的に監視する必要があるが、劣化に伴うデータの変化がそれほど早くないので、秒～分単位で時系列トレンドを取得出来れば良い。一方、遮断器の開閉動作時における各種データは数msのオーダーで急激に変化するため高速でサンプリングを行い、さらにパルス情報に変換した上で検討を行う必要がある。そこで、各種センサの状態監視データや遮断器動作時の振動データ等をそれぞれに適切な時系列トレンドで収集・保存し、判定ソフトにより分析・診断を実行する配電盤劣化監視診断装置を製作した。図12に実機を示す。

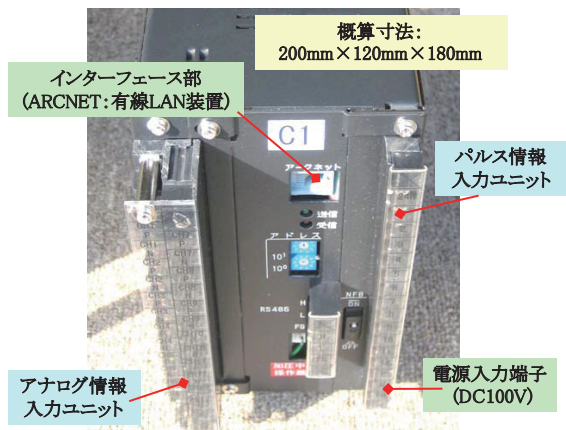


図12 配電盤劣化監視診断装置

装置はガスセンサ出力等の時系列トレンドを収集するアナログ情報入力ユニット、及び遮断器の振動測定分析値等を収集するパルス情報入力ユニット、それらを統合して集約しパソコンに送信するインターフェース部、集約したデータを判定診断するソフト(パソコン側に実装)から構成されている。本装置は、現在JRや民鉄などの鉄道事業者に納入されている負荷情報計測装置を参考に設計していることから、現状の変電所配電盤設備を大きく変更することなく容易に導入することが可能である。

今後は本装置を活用して種々の変電機器の状態データを蓄積していくことで、CBMによる保全が進展することが期待される。

6. 結論

電気鉄道用変電所の機器である遮断器や電力ケーブル等を主な対象として、これらの変電所機器の過熱、機械的損傷、絶縁劣化をガス、振動、部分放電などの計測と

トレンド分析を通じて評価し劣化診断を行うシステムについて検討した。結果を以下に要約する。

- (1) 変電機器の劣化事象に関し、劣化に伴い生じる現象の特徴把握とモデル化を通じてセンサを選定した。電力ケーブル等の過熱事象には揮発性有機化合物に対応したガスセンサを、遮断器の操作機構などの機械的損傷については高周波に対応した圧電式振動センサーを、変電機器の絶縁体が劣化することに伴い生じる部分放電については機器筐体表面に生じる電位差を検知するセンサを採用した。
- (2) センサから得られる信号を分析し、劣化診断するプロセスを検討した。電力ケーブル等の構成材料の過熱事象については、構成材料に含まれる可塑剤が揮発し始める温度(例:150℃前後)から指示値が上昇することを検知する手法とした。遮断器の機械的損傷等については、正常動作時の振動センサの測定分析値を二値化したパルス情報によりパターン化し、正常時との差分累計値を持って良否判定する手法とした。部分放電については、検出波形の周波数帯(4～20MHz)及び周期性を確認する手法とした。
- (3) 上記を踏まえ、状態監視データ等を収集し、分析・診断を実行する配電盤劣化監視診断装置を製作した。

謝辞

本研究にご協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社、日新電機株式会社の関係各位に謝意を表する。

文献

- 1) 大雲響, 金子力: 鉄道事業者における変電設備保守の取り組み状況について, 平成21年電気学会全国大会, No.5-S18-4, 2009
- 2) 潮木知良, 京谷隆, 川崎たまみ, 赤木雅陽: におい物質を利用した変電所における電気火災検知の基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol27, No.3, pp27-32, 2013
- 3) 赤木雅陽, 重枝秀紀: 制御電圧変動時における直流高速度遮断器の振動特性, 平成22年電気学会全国大会, No.5-059, 2010
- 4) 伊吹恒二, 中島邦昭: 開閉機器動作特性解析装置, 公開特許公報 特開昭和62-261978, 1987
- 5) 薩摩順吉: 確率・統計, 岩波書店, pp163, 1990
- 6) 電力設備の絶縁材料から見た劣化診断技術調査専門委員会: 電力設備の絶縁材料と劣化診断技術, 電気学会技術報告 No.1245, 2012
- 7) 梶村和成, 田中武司, 安川英明: 部分放電検出用壁面センサの実用性能試験, 平成23年電気学会全国大会, No.5-153, 2011