

光温度分布レーダを用いた 閉鎖配電盤温度監視システムの開発

Development of Temperature Monitoring System for enclosed switchboard
using an Optical Fiber Sensor

楮本 豊、高橋 正彦、三好 哲
Yutaka KAZUMOTO Masahiko TAKAHASHI Akira MIYOSHI

東京都水道局経営計画部技術開発室／東京都新宿区西新宿2丁目8番1号
Technical Development office, Tokyo Bureau of Waterworks, Tokyo Metropolitan
Government/2-8-1 Nishi-shinjuku Shinjuku-ku, Tokyo

Summary

In waterworks facilities, We have carried out daily patrol and inspection to maintain equipment; Although there are limitations to maintain by only method which has mainly depended on human sense. Therefore, we need development of equipment diagnostic system which can assist maintenance job and detect device fault in early stage. We paid attention to the heat of enclosed switchboard inside as indication of device faults. And we are developing the temperature monitoring system for enclosed switchboard which can monitored the change of temperature data continuously. This system is allowed to measure multiple point of temperature data with single optical fiber sensor using OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) method. And we developed the analysis method use algorithm adapted Walsh transform to improved the precision of decision by the change of temperature distribution pattern. In this paper, we describe outline of this system include consideration about mounting method and application range of this system, and valuation of field test in pump plant.

Key words : OTDR(Optical Time Domain Refractometry) , Walsh transform,
Equipment diagnostic system

1. はじめに

上水道施設は、社会的な基盤としてその重要性は高く、設備に一旦問題が生じると、施設の一部または全部の機能が停止し、多大な影響が出るのが予想される。施設の安定維持のためには日常の巡視点検が不可欠であり、これにより設備異常の兆候を早期に発見し、交換・精密点検・オーバーホール等適切な処置を行い、良好な施設維持に努める必要がある。しかしながら、一般に水道施設は広大な敷地に点在し、機種が多様さ、点検等における設備停止時間の制約、専門的知識を持つ技術者の不足

等により多大な労力と時間を要しているのが現状であり、保全業務全般の改善が望まれている。

このような状況を踏まえ、当局では設備状態情報を収集し、異常兆候を早期に発見する総合的な保全システムの実現可能性について検討を行ってきた。その一例として、閉鎖配電盤内の温度を監視し、接触不良等による通電機能の低下を温度異常で検出する通電異常監視機能及び、放電破壊音を監視し絶縁劣化を検出する絶縁異常監視機能を有する「閉鎖配電盤内状態監視システム」の開発が挙げられる。本稿では、このうち、通電異常監視機能に関する開発内容について「閉鎖配電盤温度監視シ

テム」として報告する。

2. 監視システムの概要

2.1 監視対象設備

本システムは、温度計測に高精度の電子機器を使用していることから、対象を原則として屋内の閉鎖配電盤内とした。想定される監視対象設備としては、受電盤、変圧器盤、ポンプ盤等が挙げられる。当局ポンプ場で行ったフィールドテストでは、受電盤、変圧器盤、ポンプ盤を監視対象とした。

2.2 検出対象機器の劣化要因

設備機器の劣化は、電気的要因、化学的要因、機械的要因、熱的要因等に分類されるが、本システムでは、このうち熱的要因による異常過熱を常時監視の対象とした。図1は典型的な異常過熱の進展フローで各部位の不良が最終的に発熱に至る過程を表している。

配電盤内に収納されるスイッチギヤや共通母線等の通電部分は、材質不良による接触面への分解生成物の付着、破損・折損、取付不良等による接触不良が原因で部分的に電気抵抗が増大し、通電機能が低下することがある。これらの部位に電流が流れると異常発熱が起り機器故障の原因となる。本システムは、異常兆候としての発熱に注目し、盤内の温度を常時監視することにより、その温度変化から通電異常の判定が可能であるとの観点から開発を行ってきた。

2.3 最適センサーの検討

異常発熱を検出するためには、配電盤内部の監視対象部位近傍に温度センサを配置すれば容易に温度監視を行うことができる。しかし、配電盤内部は充電部が多く個々の部位ごとに温度センサを配置することは、経済性、安全性、メンテナンス性の観点から現実的でない。よって本システムでは、配電盤の内部で発生した熱が配電盤内の空気の対流や発熱点の支持物を通して配電盤表面から周囲雰囲気中に放熱されていることに着目し、配電盤の上部外面に設けたセンサで配電盤内部の発熱を盤外面の温度パターンとして監視することにより通電異常を判定することとした。本システムに最適なセンサとして、使用条件、実績等を総合的に検討し、光ファイバセンサを採用した。以下に光ファイバセンサの特長を示す。

- ① 一本のセンサで多点の温度計測が可能（布設の方法により2次元・3次元の温度分布の計測も可能）
- ② 光ファイバはそれ自体が絶縁体で無誘導性であるため、電気的外来ノイズの影響を受けない
- ③ 可とう性があり、既存の盤等へ取付ける場合に施工の自由度が大きい
- ④ 温度計測機能に加えて、断線等の障害点の検出機能（自己診断機能）を持たせることが容易である
- ⑤ パッシブデバイス（受動素子）であるため寿命が長い

2.4 光温度分布レーダの測定原理

(1) 光温度分布レーダ

光温度分布レーダは、光ファイバセンサの軸方向に沿

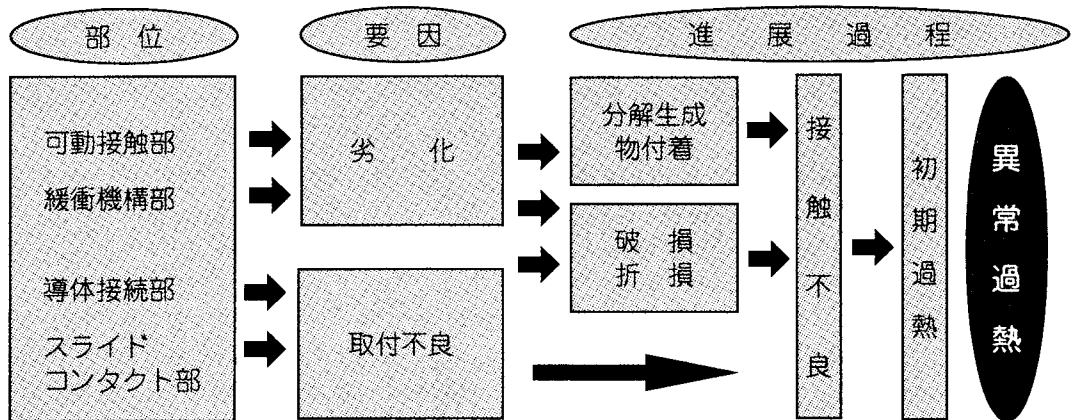


Fig. 1 development flow of abnormality heat

った温度分布を一度に計測できる測定技術で、距離と温度双方の信号を処理する系を有している。距離計測についてはOTDR法(Optical Time Domain Reflectometry)として、通信用光ファイバケーブルの障害点の検出等に広く用いられている。また、温度計測は散乱光のもつ物理的性質を巧みに利用した計測技術である。図2に測定原理図を示す。

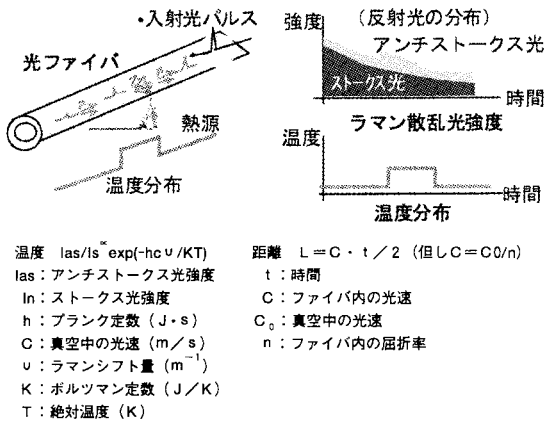


Fig. 2 a figure of measurement principle

(2) 温度の測定原理

半導体パルスレーザ光を光ファイバセンサに入射すると、光の粒子がガラス分子と衝突し入射光とは異なる2種類の波長の散乱光を生ずる。この物理現象をラマン散乱と呼び入射光に対して波長が短波長側にシフトするアンチストークス光と逆に長波長側にシフトするストークス光がある。このうちアンチストークス光の強度は温度依存性が高く、逆にストークス光の強度は殆ど温度に無関係である。

この2つの散乱光の強度の比を測定して信号処理を行うことにより、光ファイバセンサに沿った温度分布を計測することが可能である。

(3) 距離の測定原理

光ファイバセンサに短いパルス光を入射すると、パルス光の一部は媒質中を伝搬中に光ファイバのガラス分子によって散乱されて戻って来る(後方散乱)。このとき近くで散乱された光はすぐに戻って来るが、遠くの方で散乱された光は進む経路が長くなり到達時間に遅れを生じる。そこで散乱光の経路差に応じた到達時間を測定することにより、散乱が起こった位置を測定することがで

きる。これはレーダの測距技術と原理的には同一のものである。

このように光温度分布レーダは、一本の光ファイバセンサにより励起光パルス幅内の平均温度を連続して多点計測することが可能である。また、計測精度の決定要因である光ファイバ内の光速の変化が周囲温度に殆ど依存しない等、外乱による誤差も極めて小さく安定した計測が可能である。

2.5 システム構成

本システムの概要は以下のとおりである。図3にシステム構成図を示す。

(1) 温度センサとして、ケーブルセンサとスポットセンサの特徴の異なる2種類の光ファイバセンサを使用した。

ケーブルセンサは、ステンレス製の可とう管に光ファイバを挿通したもので、測定対象物の表面に展開させて用いることにより広範囲の温度測定が可能である。

本システムでは、配電盤上部外面を奥行方向に蛇行しながら敷設し盤上部の外面温度分布を測定した。(写真1)

スポットセンサは、光ファイバセンサを金属容器の中に一定の長さ(約20m)巻き込んだ構造で、部分的な温度を測定するのに適しており、配電盤前面扉内側の収納機器周辺に上下方向4点(VCB等近傍)と雰囲気温度(室温)測定用として盤外に1点設置した。(写真2)

(2) 光温度分布レーダは、本システムの計測精度を決定づける重要な機器でレーダ本体と基準温度ユニットから構成されている。基準温度ユニットは恒温槽内に収納され高い精度を維持している。

(3) システムモニタは、光ファイバセンサによって得られた温度測定データを収集し演算処理を行う装置で、通電異常の判定を行う他、温度分布表示、トレンド表示、日報・月報の表示・保存などの機能を有する。

(4) 機器仕様

- ① 温度測定精度: ±1% FS
- ② 温度測定範囲: 0~100℃
- ③ 測定距離 : 500m
- ④ サンプル間隔: 1m
- ⑤ 距離測定精度: 1m以内
- ⑥ 測定時間 : 100秒

(光ファイバセンサ1本あたり)

- ⑦ 最大測定点数: 500点

(光ファイバセンサ1本あたり)

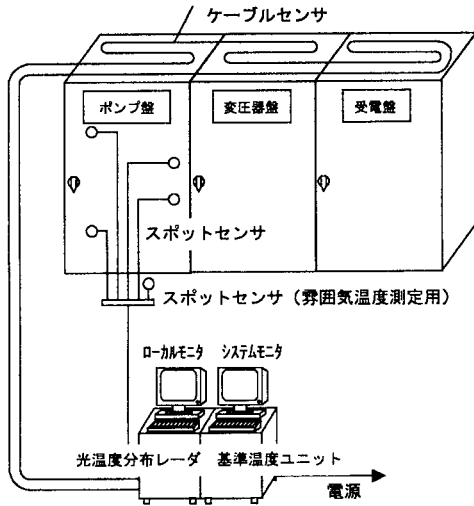


Fig. 3 a figure of system constitution

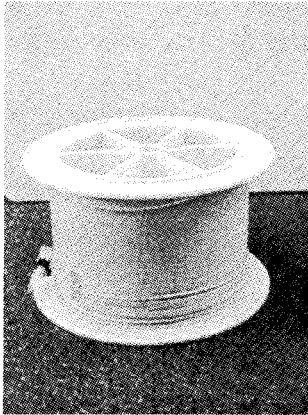


Photo 1 cablesensor

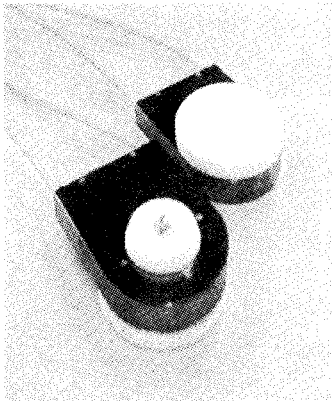


Photo 2 spotsensor

3. 光ファイバセンサの実装方法の検討

光ファイバセンサを既設の設備に設置可能とするため、以下の条件を満足することを目標とした。

- (1) 短時間で施工可能なこと（取付作業に伴う停電時間を可能な限り短くする）
- (2) 施工性が良好なこと（既設盤の加工を最小限にし、いわゆる現場合わせの部分を少なくすること）
- (3) 盤筐体との結合が強固であること（盤の振動等で浮きや剥離が起きないこと）

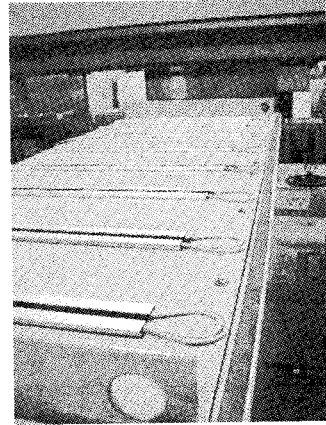


Photo 3 a case of setting up the cablesensor

3.1 ケーブルセンサの実装

(1) センサ布設上の問題点

ケーブルセンサを配電盤上部に敷設して温度監視を行う場合、盤上部を蛇行させて敷設するのが最も効果的であるが、その固定方法が問題となる。固定用に何らかの治具を使用する場合、治具による熱伝導の遅れや熱の吸収等による誤差が少なくなるよう考慮しなければならない。また、温度分布レーダのサンプリング間隔は1mであることから、測定点1点あたりケーブルセンサの長さは最低でも1m以上が必要である。

(2) ケーブルガイドの考案

敷設方法の問題を解決する方法として、センサ固定用治具に熱伝導率の良いアルミ製のケーブルガイドを考案した。これにより敷設する際の労力を軽減するとともに、ケーブルガイドに収納した光ファイバセンサをゴム製スペーサで押さえることにより、確実な固定を可能とした。一般に温度測定点に敷設されるケーブルセンサは長いほど精度が向上することから今回は温度測定点1カ所あたり最低2mのケーブルセンサが敷設されるように、ケー

ブルガイド内を2往復するよう固定方法を工夫した。写真3にケーブルガイドを使用したケーブルセンサ実装例を、図4にケーブルガイドの外形図を示す。

(3) ケーブルガイドによる温度誤差

ケーブルガイドを使用したことによる温度測定誤差は、熱電対温度計を用いた比較試験を行い、誤差が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下であることが確認された。(表1)

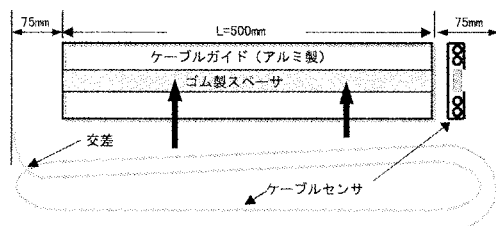


Fig. 4 a figure of cable guide external form

Table 1 a measurement's error ($^{\circ}\text{C}$)

表面温度 (熱電対)	センサ 測定値	誤差	室温
26.7	26.5	-0.2	24.1
29.2	29.2	0.0	23.9
30.7	30.4	-0.3	23.3

3.2 スポットセンサの実装

(1) 実装位置の検討

一般的な配電盤では、遮断器等の収納機器は、前面からの保守点検を考慮した設計となっているため配電盤の前面側に収納され、後方は配電スペースに充てられている。前面扉内側に充電部は露出されておらず、スポットセンサの実装は比較的容易であるが、効果的に機器の温度を測定するには測定対象となっている機器の近傍に実装することが望ましい。スポットセンサの実装は磁石による固定も可能であるが、さらに落下等により配電盤の機能に支障を及ぼさないよう、強固な固定方法を検討した。

(2) 実装方法

日常の点検作業等や、遮断器等のスライド着脱によりスポットセンサの取付け位置が制限される場合は、配電盤正面にこだわらず各種機器近傍の配電盤側面に取付けた。実装は固定用磁石の磁力の低下や地震・機器自身の振動を考慮し、スポットセンサ中央のネジにより配電盤に直接固定するとともに、スポットセンサから出ているケーブル部分は配線ダクトに収納し、周囲構造体に固定した。(写真4)

図5に両センサの取付イメージを示す。

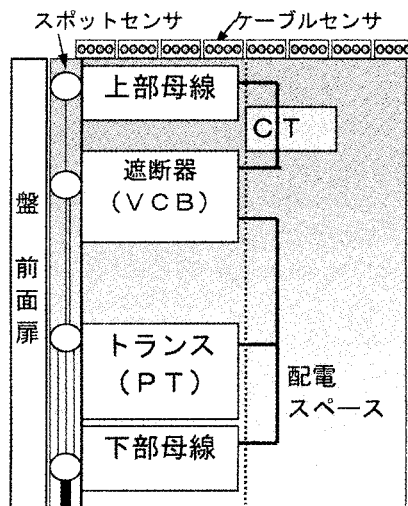


Fig. 5 a figure of sensor installation image

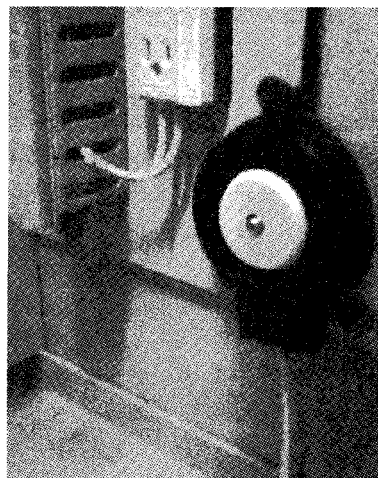


Photo 4 a case of setting up the spotsensor

4. 異常判定アルゴリズムの検討

異常判定のプロセスにおいては、観測パターンそのものが識別信号となる場合を除いて何らかの操作により特徴パターンを生成(抽出)するのが一般的である。本システムでは図6、図7に示す手順に従って異常判定を定量的に処理している。

以下に異常模擬実験を例にデータ処理手順を示す。異常模擬実験は、盤内部に50~300Wの発熱体を設置し疑似故障を発生させた。盤天井部分に敷設したケーブルセンサで温度分布を計測したデータ、およびこのデータを規格化したグラフを図8に示す。(発熱体の設置位置は実際の盤内機器配置を考慮し盤前面より50cm、盤の奥行きは約180cmとした。センサ配置は図5参照)

- (1) 配電盤の天井部分には模擬発熱による温度分布が観測される。(図8 a) 発熱量と温度上昇は正の相関があり、発熱体直近の温度が最も高い。
- (2) 異常発熱による温度分布の変化を発熱量に依存しない形で比較するため、測定部分の全温度上昇値に対する相対値で測定値を規格化する。
- (3) 通常の温度分布との比を求め規格化差分温度を算出する。(図7中規格化式) 発熱量による差がキャンセルされ、全温度上昇に対する温度上昇率はほぼ一定になる。(図8 b)
- (4) 規格化した差分温度上昇率を用いて異常判定を行う場合、温度変化が基準温度と比べ+なのか-なのかという離散的な情報により特徴抽出するほうが、計算機処理するうえでは有利である。実際には、差分温度上昇率にあるしきい値を設定して、+1, -1, 0の数値に3値化し、特徴パターンを生成する。なお、しきい値は実験等により求める。今回は100Wの異常発熱で異常検出となるよう、しきい値を設定、外乱除去のため不感帯として±1%のマージンをとった。

(5) 相関係数の算出

離散値として得た特徴パターンを分析する手法として、フーリエ変換に類似した演算であるウォルシュ変換によって関数展開する方法がある。これにより、フーリエ変換によるスペクトル解析よりも高速な変換が可能となる。よって異常時の特徴パターンとの相関係数としてウォルシュ変換の結果が得られる。(図8 c) 発熱量によらず強い相関が得られることがわかる。

図9にシステムモニターでのウォルシュ変換結果の表示例を示す。

5. フィールド試験

5.1 試験の概要

平成10年2月9日から、当局ポンプ所電気室においてフィールド試験を行った。対象設備は通常の使用状態でデータを収集し、特に以下の事項について検証した。

- (1) 周囲温度の変動及び機器の稼動状態等の外的要素が

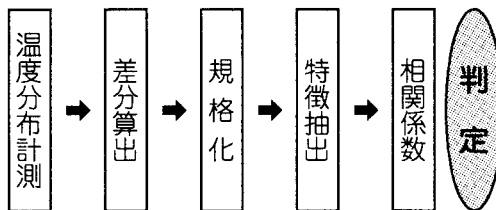


Fig. 6 characteristic extraction procedure

特徴抽出

温度変化 ΔT を規格化した分布の変化 ΔD を求めウォルシュ変換によりパターンの特徴抽出 I を算出する

$$\text{規格化} \quad \Delta D_I = \frac{\Delta T_I}{\sum \Delta T_I} - \frac{\Delta T_{0I}}{\sum \Delta T_{0I}}$$

ウォルシュ変換 $I(n) = H(n) \Delta D(n)$ ΔT_I : 測定温度変化
 ΔT_{0I} : 基準温度変化
 ΔD_I : 規格化差分温度
 I : 特徴振幅

Fig. 7 characteristic extraction expressions

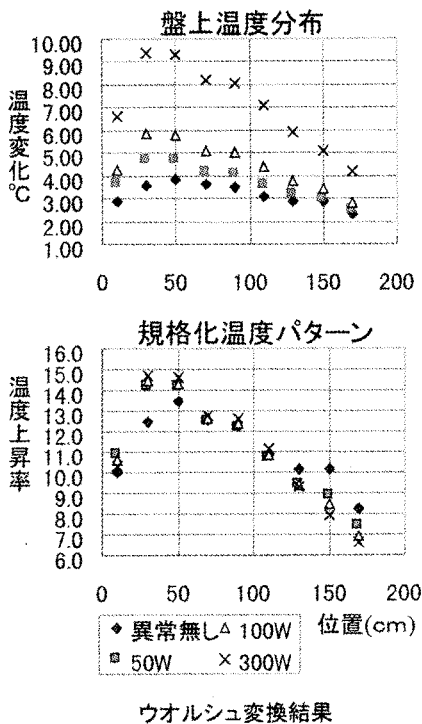


Fig. 8 conversion process by imitation abnormality

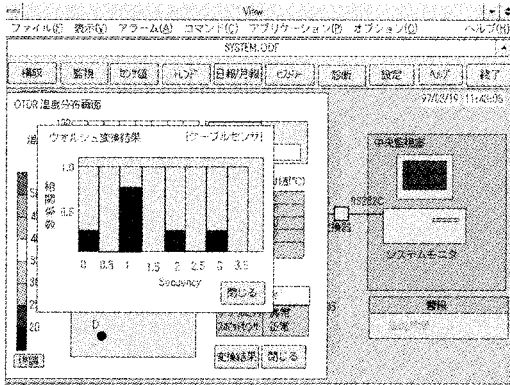


Fig. 9 indication example of conversion result

本システムに及ぼす影響

- (2) 電気的外乱 (設備の運転・停止に伴うパルス性ノイズ等) が本システムに及ぼす影響
- (3) 制約された条件下 (停電時間内作業等) での光ファイバセンサの効率的な敷設・施工

5.2 フィールド試験のデータと考察

(1) 周囲温度変動及び負荷変動の影響

図10及び図11は平成11年11月10日の14:00から14日の12:00までのケーブルセンサおよびスポットセンサによる3号ポンプ盤の温度測定値である。ただし、グラフ中に負荷電流値の変動を示す。ケーブルセンサの基準温度(室温)は室温測定用のセンサ値とし、スポットセンサの基準温度(S P基準)は配線用ピット内に設置した基準温度スポットセンサ値としている。

図10からケーブルセンサでは11日、13日、14日の深夜や明方で電流が数時間にわたり零になった時に温度測定値が低下する傾向が見られる。温度測定値と室温はほぼ同様の変化をしている。

図11からスポットセンサでは負荷変動と温度測定値が関連を持って変化する傾向が見られる。

図12と図13にケーブルセンサ、スポットセンサの温度測定値から室温、S P基準を減算して室温の影響を除去した結果を示す。ケーブルセンサ、スポットセンサの温度上昇値と電流を比較すると電流と温度上昇値の比例関係が見て取れる。(スポットセンサ下部の温度上昇値がマイナスになっているが、これはS P基準の温度降下よりもスポットセンサ下部の温度降下が大きかったことを示す。)

以上の結果から以下の項目が確認された。

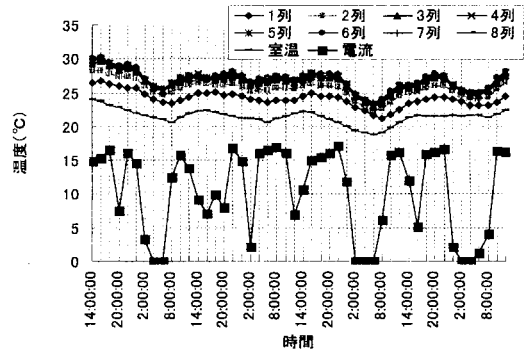


Fig. 10 temperature value measured by cablesensor

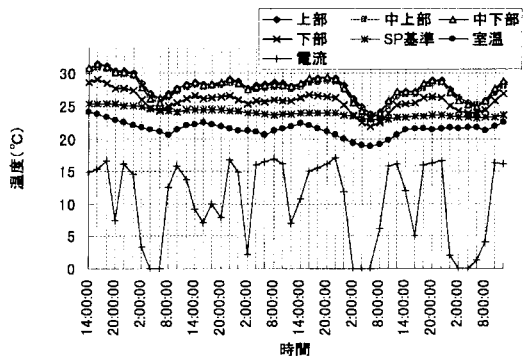


Fig. 11 temperature value measured by spotsensor

① 周囲温度の変動との関係

ケーブルセンサとスポットセンサの違いによる大小はあるものの、温度測定値は室温による影響を受けている。(ケーブルセンサの測定値と室温の相関係数は、0.84から0.94と高い相関があった。他期間でもほぼ0.8以上であることを確認している。) また、スポットセンサはケーブルセンサと比べて室温の影響を受け難い。

これはケーブルセンサが配電盤の表面に設置して温度を測定しているために室温の影響を強く受けているのに対して、スポットセンサでは配電盤前面扉内側に付いているので室温の影響よりも負荷変動による影響を強く受けているものと考えられる。両方とも基準温度との減算により周囲温度の変動をキャンセルできる。

② 負荷変動 (機器の稼動状態) との関係

電流の変動つまり負荷変動に応じて配電盤の温度が変化していることが確認できる。配電盤の発熱は収納機器自身の発熱 (機器を制御するために必要な電力) と通電電流による発熱が加算的に現れることが想定されるが、

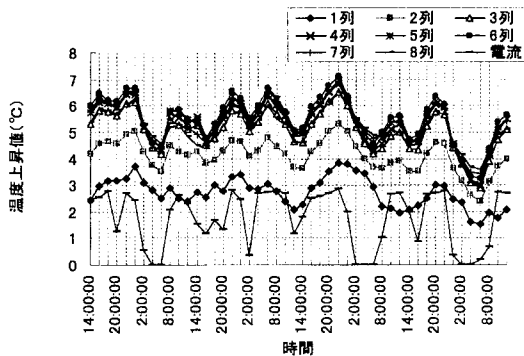


Fig. 12 temperature rise value measured by cablesensor

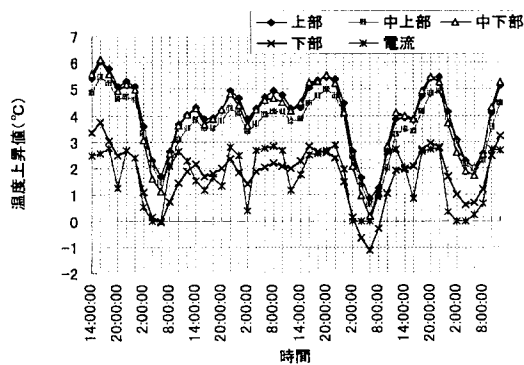


Fig. 13 temperature rise value measured by spotsensor

配電盤の発熱の中心は通電電流であることが確認された。

(2) 電気的外乱の影響

設備の状態変化に伴う電気的外乱の影響は、全く検出されなかった。これは光ファイバ固有の無誘導性、およびステンレス管によるシールド効果によるものと考えられる。

(3) センサ類の実装方法

ケーブルセンサについては、ケーブルガイドを使用した施工方法により列盤3面分の施工に要した時間は約2時間と停電予定時間の3時間以内に完了し、効率的な施工方法であったことが検証できた。

5.3 判定方法の検証

(1) ウォルシュ変換による異常判定について

ウォルシュ変換による異常判定では、盤前方に収納される各種機器で異常があった場合には天井前方付近が、盤中央付近に収納された母線等に異常があった場合には

天井中央付近がそれぞれ発熱することを想定している。変換行列の交番数0.5は相関係数+0.5以上、交番数1.0は相関係数-0.5以下で異常と判定している。

(2) 判定結果と無通電時のウォルシュ変換について

図14に平成10年11月10日の14:00から14日の12:00までの3号ポンプ盤の判定結果を示す。

深夜から早朝にかけて、ウォルシュ変換結果に相関係数の大きな箇所が数カ所見られる。この間はいずれも配電盤の電流値が零となっており、通電により形成される平常設備稼動時の温度分布(通常パターン)を維持できなくなったことが原因と思われる。この現象は監視対象盤の種類によらず試験期間中度々起こっている。

図15、図16に平成10年11月10日の0:00から17日の22:00の変圧器盤、受電盤の判定結果を示す。ポンプ盤と同様、相関係数の大きな箇所が見られる。

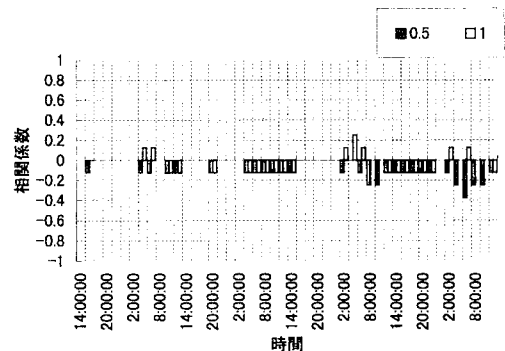


Fig. 14 judgment result of incoming board

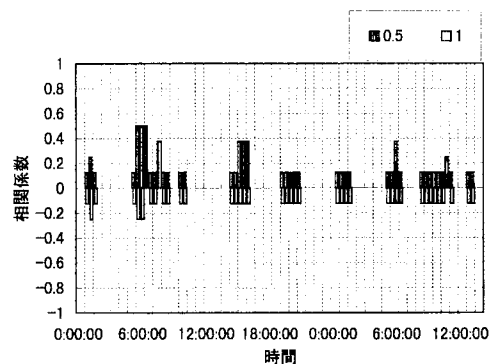


Fig. 15 judgment result of transformer board

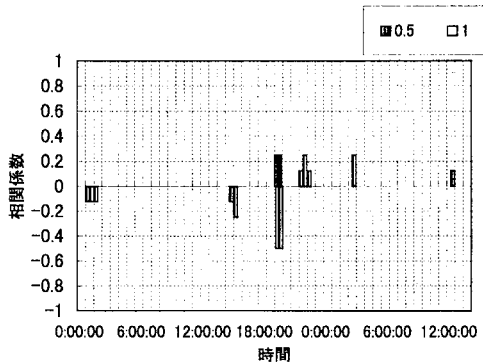


Fig. 16 judgment result of pump board

(3) 判定方法の検討

ケーブルセンサによる異常監視ではウォルシュ変換後の相関係数の値に大きな個所が見られた。理由は前述した通りであるが誤判定の原因となる可能性があり、これを防止する対策として以下のことが考えられる。

① 異常継続時間の利用

本システムでは事故を未然に防止する予防保全を目的としているので、100W 程度の低い発熱量でも検出できるようにしきい値を設定している。このため異常発生から事故にいたるまでには時間的余裕がある。これを利用してある時間異常が継続した時に異常判定を行うようにする。

② 温度上昇値の利用

一般に配電盤の事故は主に大電流を流す母線や遮断器等の通電中に発生すると考えられており、無通電時は事故の確率が極めて少ない。ただし、各盤には母線が連絡しており、夜間であっても完全な無通電とはなりえない。夜間、明け方など通電電流の低下により配電盤の温度が低下してきた場合には異常判定用以外の交番数を考慮に入れた判定方法、もしくはしきい値を緩やかにするなどすれば誤判定を防止できる。

また、スポットセンサでの測定値は配電盤の電流値に

感度良く応答することから、異常判定法の切替タイミングを決める際の基準値とする方法がある。

③ 高さ方向の温度分布による異常検出

通電中の各スポットセンサの温度上昇値は下部から上部方向へ高くなっており、この傾向は比較的安定している。この順番は配電盤内部の各種機器からの発熱状況により決定されたものと考え、これまでの試験データからは中上部付近から上の部分での熱の発生を確認している。配電盤内では故障により温度上昇が発生すると発熱点から上の部分で空気が対流することから一番近くのセンサから上の部分での温度上昇が顕著に現れる。これを利用して故障位置の特定とウォルシュ変換結果との組合せで判定精度向上をはかることができる。

6. まとめ

フィールド試験の結果から、ケーブルセンサ、スポットセンサ共、既設の閉鎖配電盤への実装は比較的容易であり、耐環境性・ノイズ性においても問題なく安定した監視を行えることが検証できた。

今後は、判定精度の向上とこれまでの開発で得た成果をもとに、設備の運転・制御データと組み合わせて、より高機能な設備監視システムの構築と実用化に向けて研究開発を行っていく考えである。

なお、本開発は平成7年度から株式会社東芝へ開発委託を行っているものであり、今回はその成果に基づき報告を行った。

[参考文献]

- 1) 設備点検ロボットに係わる技術開発委託平成8年度研究開発報告書, 東京都水道局, 1997
- 2) 設備監視システムに係わる技術開発委託平成9年度研究開発報告書, 東京都水道局, 1998
(受付 1999. 2. 16)
(受理 1999. 3. 10)