

センシングによる 受変電設備の状態診断技術

■ 出井 和弘
Kazuhiro Idei■ 折戸 由貴
Yuki Orito■ 栗原 二三夫
Fumio Kurihara

受変電設備メンテナンスのスマート化実現には、センシング技術を活用した状態診断や解析技術とシステム化が不可欠である。受変電設備の状態監視に活用可能なセンサを適用し、常時監視により蓄積したデータの解析技術を開発し活用することで、受変電設備の予期せぬ異常検知や劣化メカニズムに基づく診断システムが実現され、メンテナンスの省力化や効率化に大きく寄与することができる。東光高岳では、センサ技術を活用した受変電設備メンテナンスのスマート化へ向けた技術開発を進めており、その概要について紹介する。

1 はじめに

近年、急速に進む技術革新やデジタル化、少子高齢化や人口減少など経済社会構造の変化を的確に捉えながら、IoTやAIなど安全性と効率性を高める新技術の導入や産業保安における保安力の強化と生産性の向上を目指した「スマート保安」への取り組みが、経済産業省主導のもと官民連携によって進められている。

受変電設備メンテナンスのスマート化実現のためには、センシング技術による状態監視や状態変化のメカニズムに基づく診断や解析技術およびそのシステム化が不可欠である。最近では、状態監視に活用可能で精度よく測定できる水素センサや水分センサなどの小型センサが登場しており、このようなセンサを適用し常時監視により蓄積したデータの解析技術を開発し活用することで、受変電設備の予期せぬ異常検知や機器劣化の診断システムが実現され、メンテナンスの省力化や効率化に大きく寄与することができる。

東光高岳では、センサ技術を活用した受変電設備メンテナンスのスマート化へ向けた技術開発を進めており、本稿では状態監視に活用可能で各特性をセンシングし、その挙動を解析することによって受変電設備の状態診断を行う手法やシステムについて紹介する。

2 変圧器メンテナンスのスマート化へ向けた状態診断技術

2.1 変圧器の異常診断技術

(1) 異常診断の概要

変圧器内部で過熱および放電に伴う異常が発生した際は、絶縁油が熱エネルギーによって分解され、エネルギー量やエネルギー密度に応じて水素ガスをはじめ各種分解ガスが生成される。異常発生時の油中水素ガスの生成挙動（生成量、生成傾向、生成速度など）を連続で感度よく監視できれば、変圧器内部異常の早期発見や様相変化が把握可能である。内部過熱異常を模擬し、水素生

成挙動を油中ガス^{注1)}センサでモニタした事例を紹介する⁽¹⁾。

(2) 内部異常による水素生成挙動

過熱異常および放電異常時には、発生エネルギー量に対するセンサで測定した水素生成量と生成速度は、いずれも発生エネルギー量の増加に対して一定の増加傾向を示す。これらの知見は、異常の規模をセンサによる水素生成傾向監視によって推定できる可能性があることを示している。

(3) 異常様相判別

センサで測定した水素生成量に対する水素生成速度の相関関係から、過熱による異常か放電による異常かの判別の可能性について検討した結果を図1に示す。

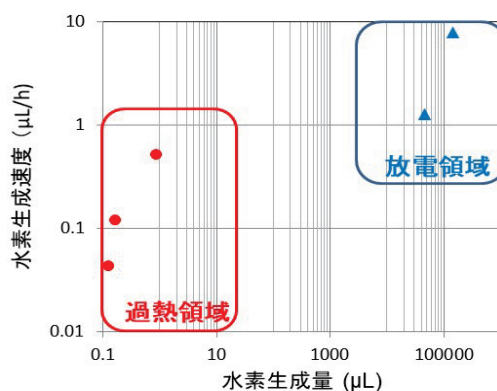


図1 油中ガス（水素）センサで測定した水素生成量と水素生成速度の相関

過熱時は水素生成量や生成速度が小さい領域に、放電時は大きい領域に分布した。過熱および放電に伴う異常現象は、それぞれの温度レベルやエネルギー密度が異なるため、過熱および放電領域の差として大きく表れていると考えられる。センサによる油中水素量測定に加え連続測定で得られる生成速度をモニタし診断指標とすることで、過熱に伴う異常と放電に伴う異常との様相判別が可能と思われる。

2.2 変圧器の劣化診断技術

(1) 劣化診断の概要

変圧器に平常運転による負荷がかかった際には、巻線の温度が上昇し巻線絶縁紙がその温度によって劣化する。その場合は絶縁紙の平均重合度^{注2)}が低下する。巻線絶縁紙の劣化によって平均重合度が低下すると、絶縁油と絶縁紙との間の水分平衡関係^{注3)}が絶縁油側へシフトすることが知られている⁽²⁾。よって絶縁油の油温と油中水分量を連続で感度よく測定できれば、絶縁紙劣化を把握できる可能性があり、変圧器劣化診断技術の確立に繋がると考える。

(2) 診断のためのメカニズム

新品から寿命レベルまでの劣化度に調整した絶縁紙を検証装置内へ配置し、変圧器の負荷や外気温から想定した変動パターンで油温を変化させ、油温変化によって絶縁紙と絶縁油との間で吸脱着する水分を油中水分量としてセンサで連続測定した結果、油温変化に対し、油中水分量はヒステリシスループ状の変化傾向を示すことを確認している⁽²⁾⁽³⁾。これは油温上昇時には絶縁紙に吸着している水分が離脱され油中へ拡散し（油中水分量が増加し）、温度低下時には絶縁紙へ再吸着される（油中水分量が低下する）水分の移行現象を感度よく捉えている。劣化した絶縁紙の油温に対する油中水分量の変化傾向も新品と同様である。しかし絶縁紙の劣化が進むとこの変化傾向は高水分側に移動することを確認している。これは絶縁紙の劣化により絶縁紙と絶縁油との間の水分平衡関係が絶縁油側へシフトする（絶縁紙の保水力が低下する）という知見⁽⁴⁾に合致しており、同現象をセンサによる連続測定によって感度よく捉えられていると考えられる。すなわち絶縁紙の劣化は、油温と油中水分量のセンシングによって診断可能と考えられる。

(3) 実変圧器を用いた検討結果

油温と油中水分量が測定できるセンサを既設の劣化度の異なる一般産業向けの稼働中の変圧器に取り付けた設置例を図2に示す。絶縁油を循環させ連続的にデータを取得した一例を図3に示す。

油温に対する油中水分量は、変圧器ごとに一定の範囲で推移する挙動が見られ、変圧器の油温に対する油中水分量の関係は、変圧器の劣化度に応じて変化し、劣化が進むと高水分量側へシフトするという傾向が確認できている。これらのことから、変圧器の劣化度がこの変化の傾向から推定可能であると考えられる。

2.3 メンテナンス事業への展望

このようなセンシングによって得られる情報をAIなどの最新の解析技術を活用し評価することで、変圧器の予期せぬ異常の早期発見に加え、異常様相判別、余寿命の精度良い推定、ひいては適切な機器更新時期の予測や



図2 実器での検証風景

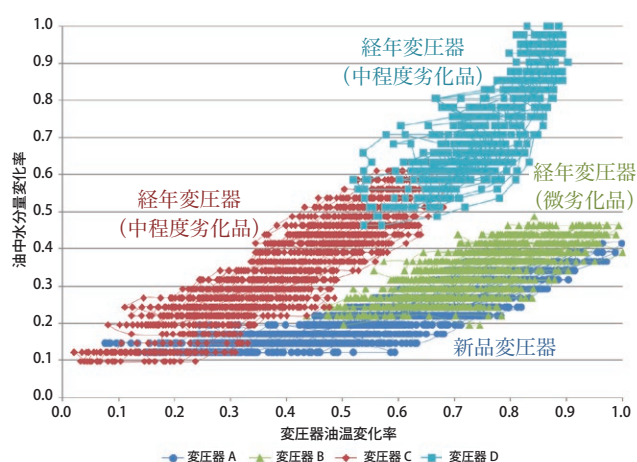


図3 実器での油温と油中水分量のトレンド

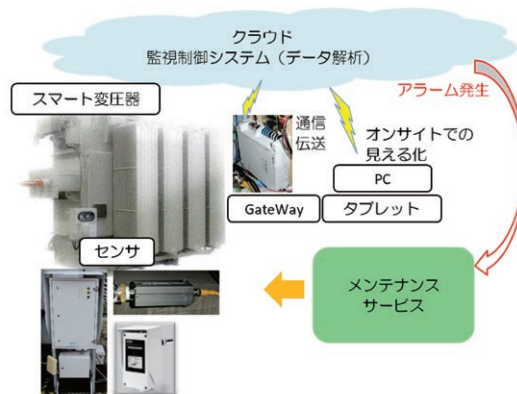


図4 スマート化した変圧器の状態診断システムのイメージ

過負荷時の寿命損失評価への応用など設備の安定的・効率的運用が期待できる。

図4にスマート化した変圧器の状態診断システムのイメージを示す。センシングした機器の情報を、クラウド^{注4)}へ伝送・データ蓄積、情報の見える化を行うとともに、AI技術などを活用したデータ解析/診断機能を備えたクラウド上の監視制御システムを構築し活用することによって、次世代の変圧器メンテナンス事業が実現可能であると考えられる。

3 配電盤メンテナンスのスマート化へ向けた劣化診断技術の開発

3.1 配電盤内絶縁物の絶縁性能低下リスクとは

受配電盤（以下、配電盤）内には、機器絶縁や導体支持のための絶縁物として不飽和ポリエステルやエポキシなどの樹脂材料が使用されている。これらの絶縁物には高い絶縁特性が必要であるが、塵埃や海塩粒子などの汚れが樹脂表面に積もり、さらに降雨時などの高湿度状態が重なることで絶縁性能が悪化することが知られている。

配電盤は扉下部に換気窓などを設けた半密閉状態であることが多く、内部の絶縁物に付着した汚れが風雨などで除去されにくい環境にある。特に塩害地域や工業地帯では汚れによる絶縁破壊のリスクが大きい傾向にあるため、リスク軽減のためには絶縁物表面の清掃などのメンテナンスが不可欠である。

東光高岳では配電盤メンテナンスに関してセンサ技術を用いた効率的な劣化診断技術の開発を進めており、今回は樹脂絶縁物に対して実施した基礎検証内容のほか、検証中のメンテナンス効率化システムについて紹介する。

●絶縁物表面の汚れと絶縁破壊リスク

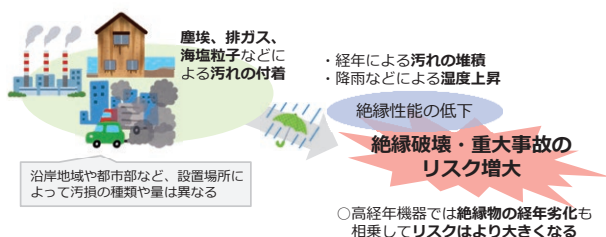


図5 絶縁物表面の汚れと絶縁破壊リスクのイメージ

3.2 配電盤内絶縁物性能劣化のメカニズム

(1) 絶縁物表面の汚れが絶縁性能におよぼす影響と湿度の関係

配電盤内で用いられている不飽和ポリエステル繊維強化樹脂（以下、FRP板サンプル）の表面が汚れた状態を再現し、盤内絶縁物が汚損した際の表面抵抗低下メカニズムについて検証した。

図6に、汚れを再現したFRP板サンプル（汚損サンプル）が湿度80%RHの高湿度状態にさらされた場合の表面抵抗の経時変化を示す。表面に汚れのないサンプルでは時間が経過しても表面抵抗はほとんど変化しなかったが、汚損サンプルでは測定開始から約3分間で抵抗値が急激に悪化する結果となった。このことから、近年多発しているゲリラ豪雨などのごく短時間の降雨であっても、汚損した絶縁物が高湿度にさらされることで絶縁破壊のリスクは増大するおそれがあると考えられる。

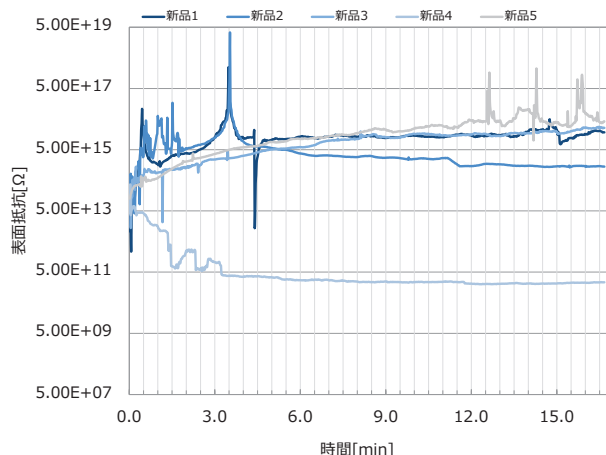


図6 (a) 未汚損FRP板サンプルでの経時変化（湿度80%）

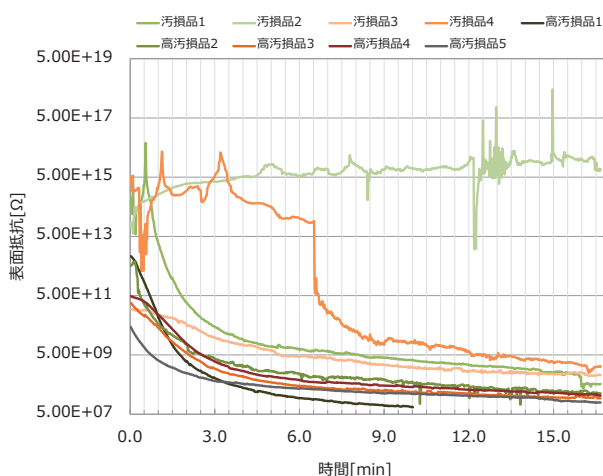


図6 (b) 汚損FRP板サンプルでの経時変化（湿度80%）

(2) 絶縁物表面を清掃した際の絶縁性能の変化

図7に、汚損処理したFRP板サンプルの清掃前後での表面抵抗の変化を示す。サンプルはあらかじめ劣化3年相当および30年相当となるように加速劣化を行い、汚損処理後は汚損をある程度定着させるために3年経過相当まで劣化処理したものである。清掃は、乾燥したろ紙を使ってFRP板表面全体を強く拭くことで模擬している。

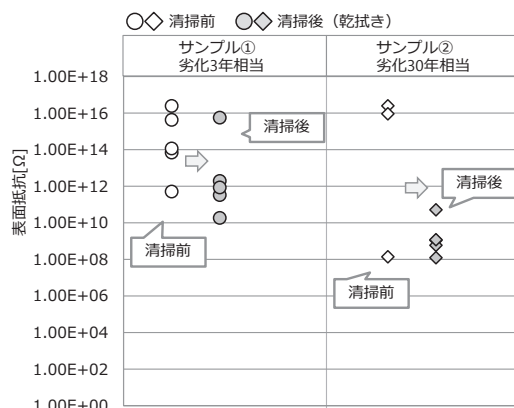


図7 FRP板サンプルにおける清掃前後の表面抵抗

清掃後のサンプルは清掃前よりも表面抵抗が低下したものが多く、値のばらつきが小さくなる結果となった。

そのため、絶縁物表面の汚れがひどい場合、または汚れ付着から時間が経過している場合には、十分な清掃が行われないと抵抗値が回復せず、かえって悪化する場合があることが判明した。

3.3 メンテナンス事業への展望

前述した表面抵抗低下のメカニズムおよび既報⁽⁵⁾によって汚損が絶縁物表面におよぼす影響が明らかになったが、現状では絶縁物表面の汚損を採取・分析するには機器の停電が必要であり、汚損状態の把握は設備管理者の負担が大きくなる。そこで、図8のようなセンサを用いた配電盤状態診断のシステムが有効であると考えられる。

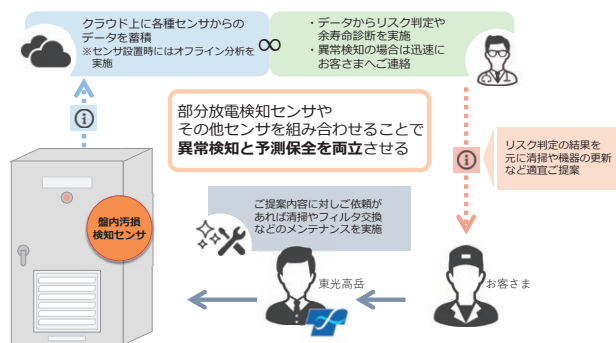


図8 配電盤状態診断サービスシステムのイメージ

上記システムでは、まず対象の配電盤の初期状態を把握するため、現地での絶縁性能評価と、汚損に対する成分分析を実施する。その後は盤内に設置した汚損検知センサ、およびその他センサの組み合わせによって配電盤内の汚損状態と異常の有無についてオンライン監視し、予測保全と異常検知を両立させるものである。

この状態診断システムには、以下のようなメリットがある。

- 一度配電盤の状態を調査した後は無停電かつ無人でオンライン監視が可能になり、メンテナンスの負担軽減や効率化に貢献できる。

- お客さまごとの設置環境・状態に合わせ、現状に即した形のメンテナンス内容へ最適化（予知保全化）できる。

- センサによる常時監視により、経年劣化の監視だけでなく台風など自然災害が生じた際にもいち早く状態を確認でき、災害時の電源安定化に貢献できる。

東光高岳ではこの状態診断システムの実現に向けて汚損検知センサを選定・基礎検証を実施し、センサを用いた盤内環境診断法の確立に向け検討を進めている。

4 おわりに

現在、検証装置で得た知見にもとづき、お客さま設備による実器検証を実施するとともに、診断・解析技術、状態診断システムの構築を行っている。

東光高岳では今後も受変電設備メンテナンスのスマート化の実現へ向けたアクションを加速していく。

■参考文献

- (1) 栗原二三夫他：「スマート変圧器によるスマートメンテナンスを実現する油中ガスセンサを用いた変圧器状態診断技術に関する検討」，東光高岳技報，No.5，pp.6-9（2018）
- (2) 小川賢治他：「油中ガスセンサの油温・水分測定機能を用いた巻線絶縁紙劣化診断実用化に関する検討」，平成30年電気学会全国大会，pp.238（5-138）（2018）
- (3) 栗原二三夫他：「変圧器メンテナンスのスマート化へ向けた状態診断技術の開発」，電気現場，Vol.60，No.714，pp.26-30（2021）
- (4) 「絶縁油と絶縁物の水分平衡関係専門委員会活動報告」，石油学会絶縁油分科会技術資料，No.07034（2007）
- (5) 折戸由貴，栗原二三夫：「配電盤スマートメンテナンス化へ向けた盤内絶縁物の絶縁性低下評価と劣化診断技術」，東光高岳技報，No.6，pp.4-7（2019）

■語句説明

- 注1) 油中ガス：変圧器内部の絶縁油や絶縁物の経年劣化に伴い発生した分解ガス，また変圧器内部の局所的な過熱や放電等に伴い絶縁油や絶縁物が熱分解する際に生じた分解ガスのことをいう。この分解ガスは絶縁油中に溶存する。
- 注2) 平均重合度：絶縁紙の化学構造は，セルロースを単位構造とし，それが数多く結合している。その結合数を重合度とよぶ。重合度には分布があるため，平均値とする。
- 注3) 水分平衡関係：油中において紙中水分が温度の影響により油中へ溶出し，紙中水分量と油中水分量の濃度平衡を保つ現象。これは温度によって変化する。
- 注4) クラウド：センサなどからデータを収集・蓄積し活用する基盤。IoT活用に必要なさまざまな機能を提供するサービス全体を指す場合もある。

出井 和弘

戦略技術研究所
技術開発センター 材料技術グループ 所属

折戸 由貴

戦略技術研究所
技術開発センター 材料技術グループ 所属

栗原 二三夫

戦略技術研究所
技術開発センター 所属