

# 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

■ 栗原 二三夫 ■ 大橋 優一 ■ 小川 賢治  
Fumio Kurihara Yuichi Ohashi Kenji Ogawa

## 1 はじめに

近年、IoT、AIなどの技術活用が急速に進行している。電力システムにおいても、2016年の電力市場自由化から2020年の発送電分離といった大きな構造変革の中で、Utility3.0<sup>注1)</sup>などで描かれるような新たな電力ネットワークへの変革・技術開発が各所で検討されている<sup>(1)</sup>。

受変電設備においては高経年設備の安定かつ効率的な運用が課題となっており、機器メンテナンスの重要性や高度化へのニーズがますます高まっている。変圧器においては、CIGRE（国際大電力システム会議）ではTransformer Intelligent Condition Monitoring (TICM) Systemsといった考え方が検討・報告されており<sup>(2)</sup>、また機器メーカーにおいても変電所監視・診断システムなどが検討、実現されている<sup>(3),(4)</sup>。このようなトレンドの中で、東光高岳においても変圧器とそのメンテナンスのスマート化は重要なテーマである。

変圧器メンテナンスにおける内部異常状態の監視・診断方法として、変圧器から採取した絶縁油中のガス成分を測定し評価する方法が実施されているが、近年では油中ガスモニタリング用のオンラインセンサも活用されており、海外では多くの適用実績がある<sup>(5)</sup>。また変圧器余寿命を想定する目的で実施する劣化診断は、油中に溶存する絶縁紙劣化生成物（一酸化炭素、二酸化炭素、フラン化合物など）の測定による絶縁紙劣化評価が行われているが、これをオンサイトで状態監視しようとした場合、絶縁紙の劣化生成物である一酸化炭素や二酸化炭素を検出するために大型で高価な設備が必要である。

変圧器内部で異常が発生した際は、水素をはじめとした各種の絶縁油分解ガスが生成する。異常発生時の水素生成挙動（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把握ができる可能性がある。また巻線絶縁紙が劣化した場合は、絶縁紙平均重合度の変化に応じて絶縁紙-絶縁油間の水分平衡関係<sup>注2)</sup>が変化することが知られており<sup>(6)</sup>、絶縁紙劣化に応じた油温と油中水分量を連続で感度よく測定できれば、絶縁紙劣化を精度よく推定し、変圧器の劣化診断に寄与できる可能性がある。

近年、油中ガス（水素）、油温、油中水分を感度よく測定可能な小型で安価なセンサが販売されており、このようなセンサを用いることで大型で高価な設備を用いず常時監視による変圧器状態診断システムを構築できる可

能性がある。東光高岳ではこのようなセンサを活用したスマート変圧器やスマートメンテナンスに関する研究を実施しており<sup>(8)</sup>、今回、検証装置内で異常状態や巻線絶縁紙劣化状態を模擬し、油中ガス（水素）、油温、油中水分を連続で測定することにより、変圧器異常診断および劣化診断を同時に実施する方法を検証したので報告する。

## 2 検証方法

### 2.1 検証装置

図1に検証装置の構成と外観を示す。本装置内部には、過熱や放電などの変圧器内部異常を模擬するための異常模擬部、または絶縁紙劣化時の絶縁紙-絶縁油間の水分の移動を検証するための絶縁紙を設置した。油中ガスセンサには、VAISALA製MHT410オイル内水分水素温度変換器（以下、非循環式モニタと略す）、および絶縁油循環機能を有しMHT410の水素検出機能を内蔵したVAISALA製Optimus DGAモニタ（以下循環式モニタと略す）を選定し、下部フランジに取り付けた。後者は多成分検出が可能であるが、今回は水素ガス検出のみに用いた。過熱異常模擬では油中での局部過熱を再現するための発熱体を、放電異常模擬では放電のための電極を設置した。

### 2.2 検証方法

絶縁油はJIS C 2320「電気絶縁油」1種2号油を使用し、検証時の初期油温は40℃とした。異常模擬検証においては、センサによる水素ガス量の連続測定に加え、正確に油中水素量を把握するための油中ガス分析<sup>注3)</sup>も実施した。過熱異常模擬では、装置内異常模擬部に発熱体を設置し、設定した過熱レベルに応じた電流を通電し局部過熱異常を模擬した。また放電異常模擬では、装置内異常模擬部に放電レベルに応じた電極を設置

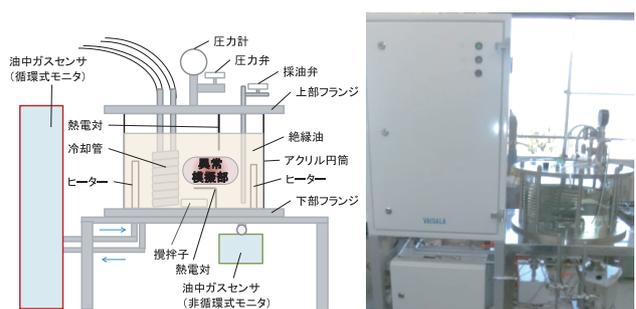


図1 検証装置の構成と外観写真

し、油中放電を発生させることにより放電異常を模擬した。表 1 に異常模擬時の設定条件を示す。

表 1 異常模擬時の条件設定

過熱レベル	使用電極	通電電流	設定温度	計算エネルギー量
高温過熱	ニッケルクロム合金発熱体	24 A	787°C	29.0 MJ
中温過熱		20 A	562°C	20.2 MJ
低温過熱		17 A	420°C	14.6 MJ

放電レベル	使用電極	電極間隔	放電条件	計算電荷量
高エネルギー	ステンレス製 円錐 - 平板 (先端角 27° R0.4 mm)	0.5 mm	10 s 継続	$3.4 \times 10^6$ pC
中エネルギー	ステンレス製 球 - 平板 (φ 12.5 mm)	0.08 mm (紙介在)	4 回破壊	$2.6 \times 10^6$ pC
低エネルギー			1 回破壊	$0.6 \times 10^6$ pC

絶縁紙劣化検証においては、新品から寿命レベルの劣化度に調整した絶縁紙 (平均重合度 (DP) 1250, 550, 350<sup>注4)</sup>) を異常模擬部に配置し、一般的な工場における変圧器負荷や季節から想定した複数の油温変動と、操業に応じた高温時 / 低温時の保持時間を油温変動パターンとして設定し、油温と、油温変動によって絶縁紙から油中へ移動する水分を油中水分量として連続測定した。図 2 に油温保持時間と油温変動パターンを示す。

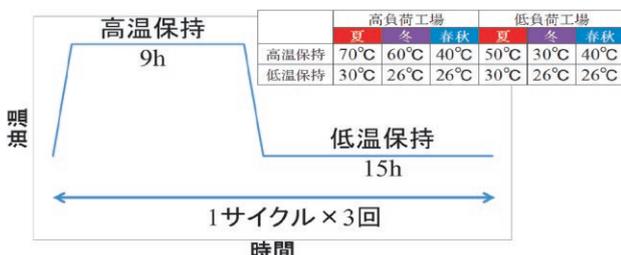


図 2 油温保持時間と油温変動パターン

### 3 検証結果と考察

#### 3.1 変圧器内部異常模擬時の水素生成挙動

図 3 に過熱異常模擬を例にとり、経過時間に対する水素増加傾向を示す。循環式モニタで測定した水素挙動は、過熱開始後 1 時間程度で検出し増加傾向を示し、最大値は油中ガス分析結果と同程度であった。絶縁油循環の効果により若干の検出遅れはあるものの水素の生成傾向をよくモニタできていると考えられる。非循環モニタでは過熱開始後、約 5 時間遅れて水素を検出し 3 時間程度の増加の後、飽和する傾向を示した。また飽和時の水素量は油中ガス分析結果と比較して大幅に少なかった。絶縁油循環機能がない場合、油中ガスの拡散、センサ取付位置や応答などの影響と思われる検出遅れや油中ガス分析結果に対する検出量の差異が生じるが、一定の遅れの後、異常による水素増加がモ

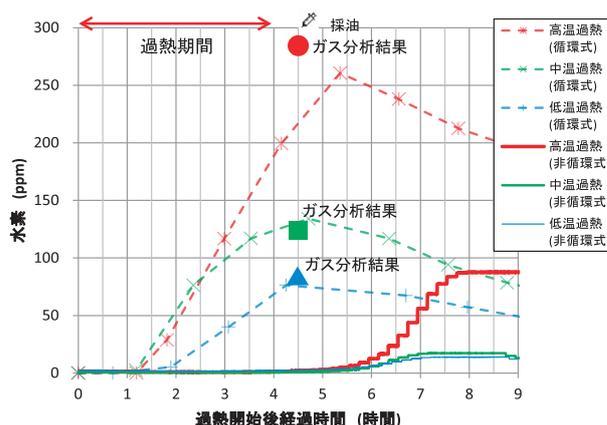


図 3 過熱時の経過時間に対する水素増加傾向

ニタできることがわかった。なお放電異常模擬における水素生成挙動も、高・中エネルギー放電では過熱異常同様の傾向を示したが、低エネルギー放電では水素発生量が少なく非循環モニタでは検出できなかった。非循環モニタの検出感度や油中ガスの拡散の影響などの要因により水素生成量が微量の場合は、水素検出が困難な場合があると考えられる。

図 4 に過熱を例にとり、発生エネルギー量に対する非循環式モニタで検出した水素生成量、水素生成速度の相関を示す。

水素生成量、水素生成速度とも過熱による発生エネルギー量の増加に対し、一定の増加傾向を示すことがわかった。これは異常の規模を水素生成傾向によって推定できる可能性があることを示している。なお放電異常模擬においても発生電荷量に対し水素生成量、水素生成速度とも過熱同様、一定の増加傾向を示した。

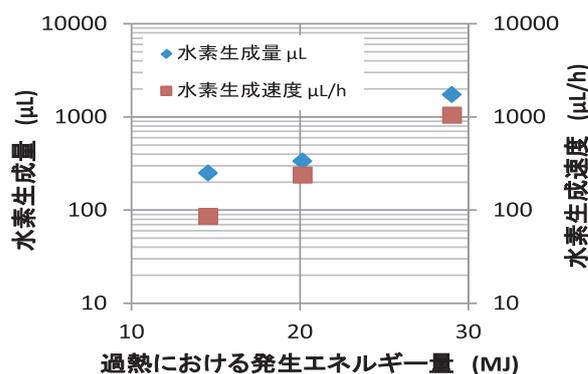


図 4 過熱における発生エネルギー量と水素生成量、水素生成速度の相関

#### 3.2 異常様相判別に関する考察

変圧器内での過熱や放電といった異常現象は、温度レベルやエネルギー密度が異なるため水素生成量や生成速度に差が生じると想定される。そこで、非循環式モニタで測定した水素生成量に対する水素生成速度の相関により、過熱異常と放電異常の判別の可能性を検討した。図

5 に非循環式モニタで測定した水素生成量と水素生成速度の相関を示す。

過熱異常におけるプロットは水素生成量・生成速度が小さい領域（左下）に、放電異常におけるプロットは水素生成量・生成速度が大きい領域（右上）に分布した。前述のように、温度レベルやエネルギー密度の関係で、過熱と放電プロット位置の差が大きく表れていると考えられる。実器適用においては異常の規模や継続時間によって生成量は変動するが、このような関係性は保持されると考えられる。非循環式モニタのように小型で安価な油中ガスセンサによる油中水素量検出に加え、連続で測定することにより得られる水素生成速度をモニタし診断指標とすることで、過熱異常と放電異常の様相判別の可能性が示唆される。

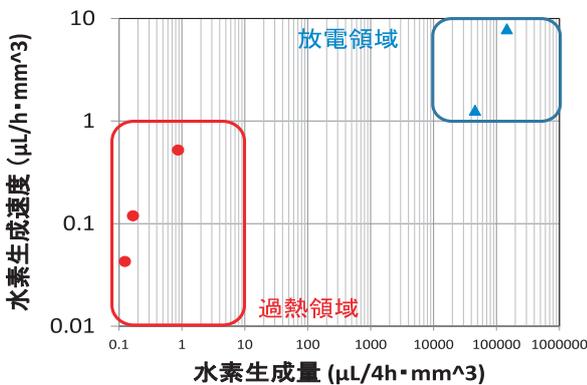


図5 水素生成量と水素生成速度の相関

### 3.3 絶縁紙劣化模擬における油温変動時の油中水分量の変化挙動

図6に、センサで連続測定した各種劣化レベルの絶縁紙における油温変化に対する油中水分量の変化傾向を示す。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。これは油温変化に対し、絶縁紙に吸着している水分が油温上昇時には油中へ拡散し（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

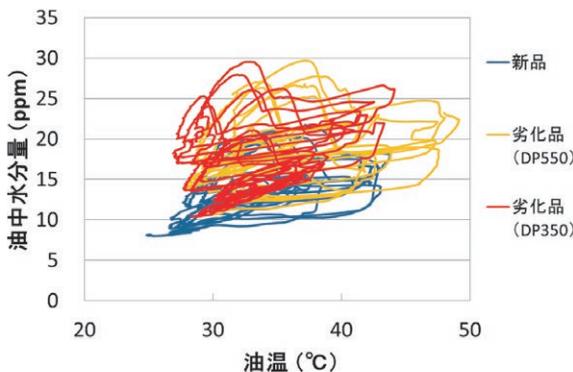


図6 各種劣化レベルの絶縁紙における油温変化に対する油中水分量の変化傾向

くとらえていると言える。

また巻線絶縁紙寿命レベル (DP450)<sup>(8)</sup>に近い劣化品2種 (DP550, DP350)における油温変化に対する油中水分量の変化傾向も新品と同様であるが、絶縁紙劣化が進行することにより変化傾向（図中のヒステリシスループ状のトレンド）の面積や位置などが変化し、おおむねグラフ上方（油中水分が高くなる方向）へ移動する傾向があることがわかった。これは絶縁紙劣化により絶縁紙と絶縁油間の水分平衡関係が、絶縁紙劣化にともなう分子構造変化や水分の吸着熱変化によって絶縁油側へシフトする（絶縁紙が水分を吸着しにくくなる）という知見<sup>(6)</sup>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とらえられていると考えられる。

### 3.4 絶縁紙劣化診断に関する考察

得られた変化傾向（図6）から絶縁紙劣化度（平均重合度）を定量化する方法を検討したところ、図7に示すように絶縁紙劣化度が大きい（平均重合度が小さい）ほど単位温度あたりの油中水分量を1サイクル分積算した値（積算水分量と略す）が大きいという相関が見られた。

変圧器負荷や季節から想定した複数の油温変動パターンによって積算水分量にばらつきがあるものの、以上のような変化傾向の特徴を利用することで既設変圧器においても巻線絶縁紙劣化評価が実施できる可能性が示唆される。また新設変圧器においては運転初期からの変化傾向を経年にわたって連続で測定・蓄積し、経年による巻線絶縁紙の劣化に応じた変化傾向を機械学習やディープラーニングなどのAI技術によって解析することにより、より正確な絶縁紙劣化の診断が可能と思われる。

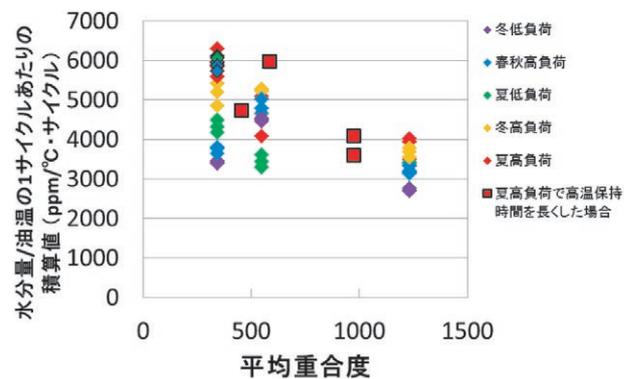


図7 絶縁紙劣化度（平均重合度）に対する積算水分量

## 4 油中ガスセンサを用いた変圧器状態診断システム

上記結果から、小型で安価なセンサを用いて油中ガス（水素）、油温、油中水分を感度良く連続で測定することにより、変圧器内部異常診断、巻線絶縁紙劣化診断の可能性

が示唆された。このようなセンサを使用したスマート変圧器によるスマートメンテナンスのイメージを図8に示す。

小型で安価な油中ガスセンサは、取付も容易で既設/新設の変圧器を問わずに対応でき、異常・経年劣化を含めた変圧器内部状態の常時監視・診断といったメンテナンスサービスを提供できる。センサで取得した機器状態のデータを、クラウド上のIoTプラットフォーム<sup>注5)</sup>へ伝送し、データ蓄積すると同時にデータ解析や診断機能を備えた監視制御システムの活用によって、次世代のスマートメンテナンスサービスが実現可能となると考えられる。

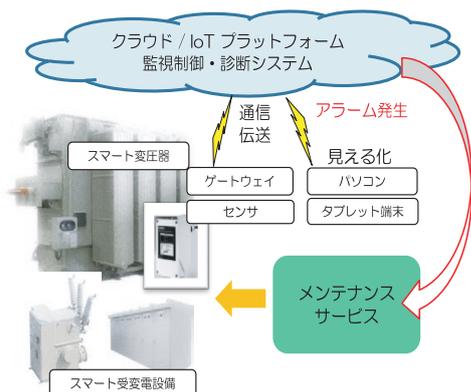


図8 スマート変圧器によるスマートメンテナンスのイメージ

## 5 まとめ

高経年受変電設備の安定かつ効率的な運用のためのメンテナンスの重要性・高度化への要求が高まる中で、スマート変圧器によるスマートメンテナンスを目指し、小型で安価な油中ガスセンサを活用した変圧器状態診断技術について検討した。その結果、センサで検出した水素の生成傾向が異常様相に応じ一定の変化傾向を示すこと、水素生成量と水素生成速度の相関によって異常様相判別ができる可能性があること、油温、油中水分量の変化傾向から絶縁紙劣化評価（変圧器劣化診断）ができる可能性があることがわかった。本手法の活用により変圧器異常時の早期発見に加え、異常様相判別、劣化診断が同時に実施できるトータルな変圧器状態診断の可能性が示唆された。本要素技術は、変圧器のスマート化、次世代のスマートメンテナンスサービスを実現し受変電設備の安定かつ効率的な運用に寄与できると考える。

今後の技術課題として、油中ガス検出にかかわる課題解決や異常様相の判定値の検討、実器規模での実用性検証、システム化、AI技術活用による診断精度向上などがあり、鋭意研究を進め次世代のスマートメンテナンス構築に向け尽力する予定である。

### ■参考文献

(1) 竹内純子, 伊藤剛, 岡本浩, 戸田直樹「エネルギー産

業の2050年Utility3.0へのゲームチェンジ」日本経済新聞出版社(2017)

(2) CIGRE WG A2.44: Technical Brochure 630, GUIDE ON TRANSFORMER INTELLIGENT CONDITION MONITORING (TICM) SYSTEMS (2015)

(3) 平馬他, 「IoTによる設備管理(変圧器リモート診断)」, 明電時報, 通巻353号(2016)

(4) 荒川他, 「スマート電力供給システム(SPSS)と実規模検証計画の概要」, 日新電機技報, 59(1)(2014)

(5) CIGRE D1.01 (TF15): Technical Brochure 409, Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment, (2010)

(6) 石油学会絶縁油分科会技術資料No.07034「絶縁油と絶縁物の水分平衡関係専門委員会活動報告」(2007)

(7) 小川他, 「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.5-138(2018)

(8) 日本電機工業会規格JEM 1463, 「変圧器用絶縁紙の平均重合度評価基準」(1993)

### ■語句説明

注1) Utility3.0: エネルギー分野を中心とした公益事業の担い手"Utility"が、「Decarbonization(脱炭素化)」「Decentralization(分散化)」「Digitalization(デジタル化)」を目指し社会インフラを総合的に担うエネルギー供給の形態。

注2) 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3) 油中ガス分析: 変圧器内部異常のエネルギーによって絶縁油が熱分解・ガス化し、油中へ溶存する。その溶存ガスを抽出・定量分析する方法。

注4) 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5) IoTプラットフォーム: 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。



#### 栗原 二三夫

技術開発本部技術研究所  
材料技術グループ所属  
材料技術の開発に従事



#### 大橋 優一

技術開発本部技術研究所  
材料技術グループ所属  
材料技術の開発に従事



#### 小川 賢治

技術開発本部技術研究所  
材料技術グループ所属  
材料技術の開発に従事