

# 油入変圧器の異常診断技術の高度化

加藤福太郎\* 柏野敦彦\*  
近野智規\*  
網本 剛\*

Enhancement of Fault Diagnostic Technique on Oil-immersed Transformer

Fukutaro Kato, Tomonori Chikano, Tsuyoshi Amimoto, Atsuhiko Kashino

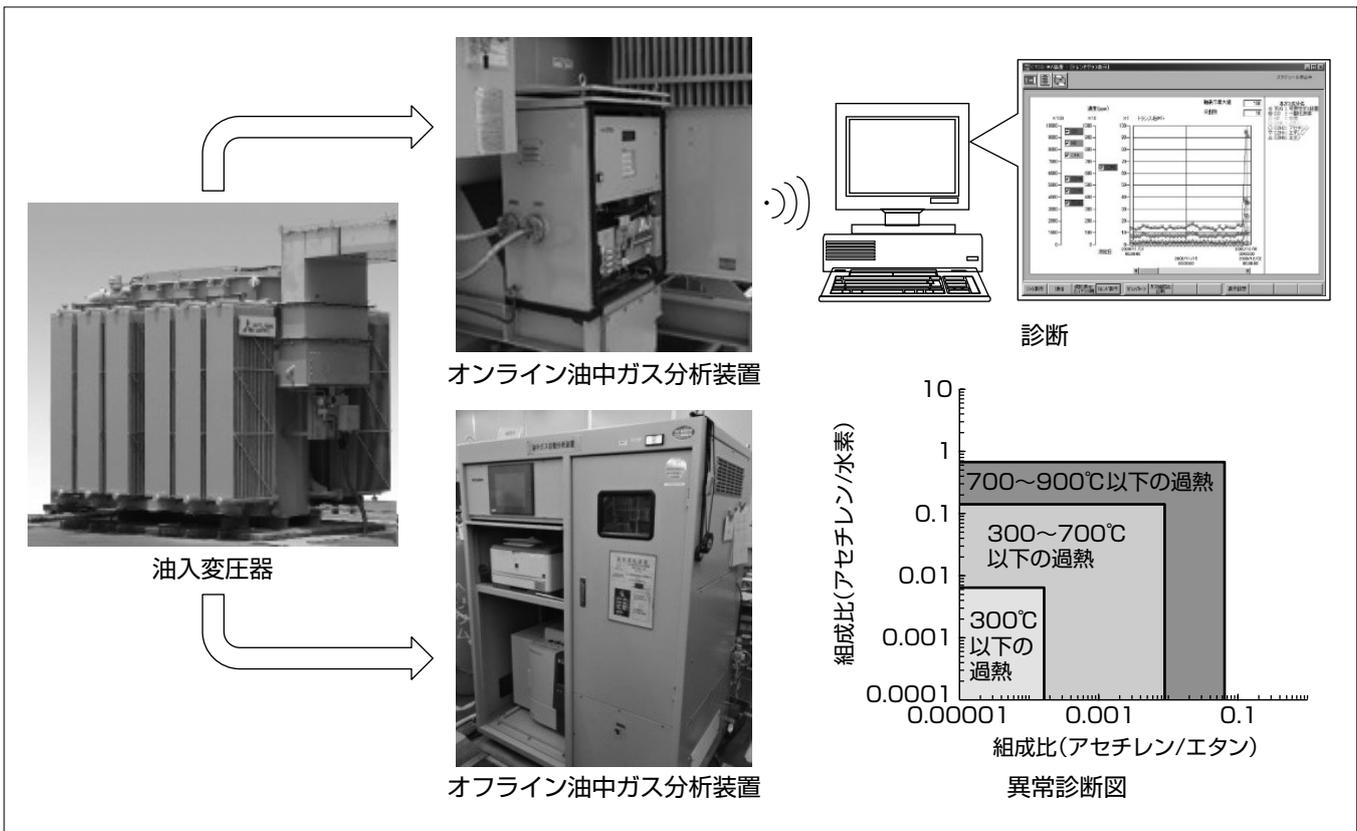
## 要 旨

高経年変圧器の増加を背景に、保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして油入変圧器の異常を診断する技術のニーズが高まっている。これまで鉱油入変圧器に関しては、変圧器の運転を停止せずに診断可能な手法として、定期的オフラインで実施する油中に溶解するガスの分析によって異常の有無や様相を特定する技術が実用化され、鉱油入変圧器の信頼性向上に寄与してきた。

近年、鉱油入変圧器に対して、従来の油中ガス分析では診断が困難な現象を解決するための技術開発や異常を早期に検出できるオンライン診断のニーズが高まっている。ま

た、欧米を中心に防災性や環境調和性に優れた植物油入変圧器の導入が進んでおり、植物油入変圧器に対応した異常診断技術の確立が急がれる。

このような背景から、三菱電機は、鉱油入変圧器に対して高精度油中ガス分析によって異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。また、植物油入変圧器に対して、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデル試験の結果に基づいた異常診断技術を開発した。



## 油入変圧器のオンライン油中ガス分析とオフライン油中ガス分析

無線通信技術を活用したオンライン油中ガス分析によって異常を早期に発見する診断技術及び高精度オフライン油中ガス分析によって異常部位を特定する診断技術を示す。

## 1. ま え が き

設計想定寿命の30年を超える高経年鉱油入変圧器の増加を背景に、保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして油入変圧器の異常(放電、過熱)を診断する技術のニーズが高まっている。油入変圧器の内部に異常が発生した場合、変圧器を構成する絶縁物や絶縁油などの絶縁材料が分解することによって発生したガスが絶縁油中に溶解する。この絶縁油中に溶解したガスを分析することで、油入変圧器内部の異常が診断できる。油中ガス分析による異常診断技術は、油入変圧器の運転を停止することなく診断できるため、古くから技術開発が行われ、鉱油入変圧器では保守管理指針が制定され、広く適用されてきた。

近年、鉱油入変圧器に対して、従来の油中ガス分析では診断が困難な現象を解決するための技術開発や異常を早期に検出できるオンライン診断のニーズが高まっている。また、欧米を中心に防災性や環境調和性に優れた植物油入変圧器の導入が進んでおり、植物油入変圧器に対応した異常診断技術の確立が急がれる。

以上の背景から、当社は、鉱油入変圧器に対して異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。また、植物油入変圧器に対応した植物油のガス生成特性に基づいた異常診断技術を開発した。

本稿では、鉱油入変圧器の異常診断技術の高度化開発及び植物油入変圧器の異常診断技術開発について述べる。

## 2. 油入変圧器での異常

油入変圧器には、絶縁油や絶縁物などの絶縁材料が使用されており、内部で異常(放電、過熱)が発生すると、絶縁材料が損傷してガスが発生する。絶縁材料は主に炭素(C)・水素(H)・酸素(O)で構成されており、異常発生時はこれらの元素で構成されるアセチレン(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)・水素(H<sub>2</sub>)・エチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)・エタン(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)・メタン(CH<sub>4</sub>)・一酸化炭素(CO)の可燃性ガスが発生し、診断のための指標ガスとして扱われる。

油入変圧器の異常現象で発生する可燃性ガスを図1に示

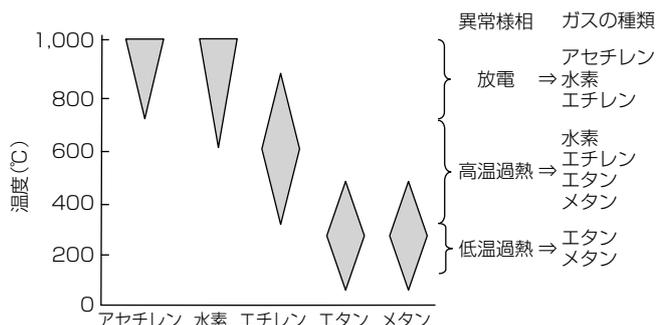


図1. 油入変圧器の異常現象で発生する可燃性ガス

す。油入変圧器の異常の様相には、放電、高温過熱、低温過熱があり、これら異常様相と発生するガスの種類・濃度比率は固有の相関関係がある。異常発生時に絶縁油に溶解したガスを分析することで、異常の有無や様相を特定できる。

## 3. 油中ガス分析による油入変圧器の異常診断

### 3.1 鉱油入変圧器の異常診断

異常の有無や異常の様相を特定することを目的として、オフラインで定期的(1~3年に1回)に採油・分析することで運用がなされてきた。近年、異常部位の特定が可能なオフライン診断及びIT技術やセンサ技術を適用したオンライン診断のニーズが高まっており、これらニーズに応える診断技術を開発してきた。具体的なオフライン/オンライン診断を3.1.1項、3.1.2項で述べる。

#### 3.1.1 高精度油中ガス分析によるオフライン診断

油入変圧器はプレスボードやコイル絶縁紙など主要な絶縁材料以外に、種々の絶縁材料が使用されており、それぞれ使用部位が異なる。絶縁材料から発生する特徴的な成分の一例を表1に示す。高精度油中ガス分析を用いたオフライン診断では、絶縁材料から発生する特徴的な成分を検知することで異常が生じている絶縁材料を発見し、異常部位を特定できることを特長とする。油入変圧器に新規適用する絶縁材料に関しては、事前に試験を行い、随時データベースの拡充を図っている。

#### 3.1.2 オンライン診断

オンライン診断は、通常の油中ガス分析装置をコンパクト化し、油入変圧器に追設することで、常時、油中ガス分析が実施できる<sup>(1)</sup>。

オンライン油中ガス分析装置は、油配管で油入変圧器と接続しており、採油・分析する。多頻度で分析するためには、油入変圧器の運転停止を伴う油の補充作業が不要のように、油を消費せず油入変圧器に返送することが重要である。また、高経年機器に適用するためには停電を必要とせず、容易に据付けが可能であることも重要である。

当社のオンライン形油中ガス分析装置“N-TCG-6C”の仕様を表2に示す。N-TCG-6Cは、IEC(International Electrotechnical Commission)や一般社団法人電気協同研究会<sup>(2)</sup>で策定されている保守管理基準に準拠した成分であるCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>及びTCG(可燃性ガス総量)を分析できる。放電発生の有無を判断する指標

表1. 絶縁材料から発生する特徴的な成分例

絶縁材料	特徴的な成分
耐熱処理紙	アンモニア, 1, 3-ジアジン
ワニス処理紙	ブタノール
ガラスエポキシ	2-メトキシエタノール
接着剤	2, 3-ジヒドロベンゾフラン, 2, 6-ジイソシアネートトルエン
接着紙	1, 3, 5-シクロヘプタトリエン, 2, 5-ジメチルフラン

ガスC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>を保守管理基準値である0.5ppmから検出できる。

無線通信方式のオンライン油中ガス分析装置のシステム構成例を図2に示す。最新のIT技術を活用した無線通信では通信線を敷設する必要がなくなり、装置据付けの工期が短縮される。さらに、装置レイアウトの制約による検討が軽減される。

オンライン油中ガス分析装置によるトレンド監視のイメージを図3に示す。高頻度の分析によるトレンド監視に

よって急激な油中ガスの変化を把握できる。これによって定期的な採油・分析では早期検出が困難であった、異常時の様相の変化をオンライン分析によって容易に検出できる。さらに、IEC、IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)等の油中ガス分析による保守管理指針では、分析結果から異常様相を診断する方法として、ガスパターン診断、ガス組成比診断等が提案されており、この装置にも客先ニーズに対応し、各種診断機能を搭載している。

油中ガスと油温、負荷電流を同時に取り込むことによってトレンドの急激な変化時の油温や負荷状況を確認できる。

### 3.2 植物油入変圧器の異常診断

#### 3.2.1 植物油の変圧器への適用と現状

従来、変圧器内部の絶縁油としては石油由来の鉱油を使用しているが、近年、環境配慮や高い防災性の観点から、植物を基材とした絶縁油を変圧器に適用する動きが進んでいる。

絶縁油の特徴を表3に示す。植物油は鉱油やシリコン油に比べ、引火点が高く、生分解性があり、植物由来であることが特徴である。これら特徴を背景に、特に欧米では、植物油を使用した変圧器の納入台数は100万台を超えており(今特集号の論文“高生分解性を持つ植物基材の絶縁油を使用した変圧器”参照)、今後更なる増加が見込まれることから、植物油入変圧器の油中ガス分析による異常診断技術の確立が急がれる。

鉱油入変圧器と植物油入変圧器の絶縁油に関する規格の比較を表4に示す。新油の品質規格は制定されているものの、既設器油に対しては、フィールドデータが乏しく未制定である。鉱油と同様の保守管理指針の制定が望まれている。

#### 3.2.2 植物油入変圧器の異常診断技術の確立

植物油入変圧器の油中ガス分析による保守管理指針の制定につながる異常診断技術を開発した<sup>(3)(4)</sup>。この診断技術は、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデル試験結果に基づいた2種類のガスの組成比(油中濃度比)を組み合わ

表2. N-TCG-6Cの仕様

項目	仕様	
一般	寸法	500(W)×360(D)×360(H)(mm)
	質量	70kg
	電源	AC単相500VA、電圧：指定電圧
ガス抽出方式	真空空間中への平衡抽出方式	
ガス検出方式	カラム+4種類ガスセンサ	
検出対象ガス	CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 及びTCG	
検出感度	TCG	20ppm
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.5ppm
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10ppm
	CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	20ppm
制御部	32ビットCPU制御部	
通信方式	RS-232C/RS-485/RS-422モデム、MODBUS <sup>(注1)</sup> 、Ethernet <sup>(注2)</sup> 、無線(無線LAN、LTE(Long Term Evolution))	

(注1) MODBUSは、Schneider Electric USA Inc.の登録商標である。  
(注2) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

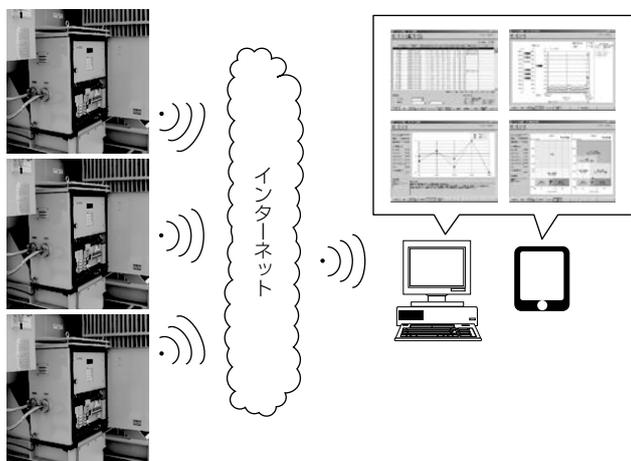


図2. オンライン油中ガス分析装置のシステム構成例

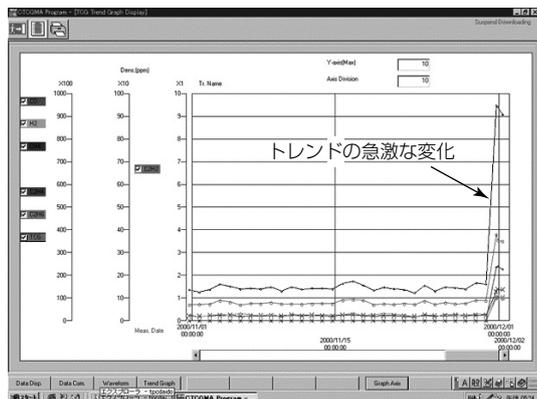


図3. オンライン油中ガス分析装置によるトレンド監視のイメージ

表3. 絶縁油の特徴

	鉱油	シリコン油	植物油
引火点(℃)	147	300	330
生分解性	低い	低い	高い
植物油由来	×	×	○

表4. 鉱油入変圧器と植物油入変圧器の絶縁油に関する規格の比較

	鉱油入変圧器	植物油入変圧器
新設器	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 60296</li> <li>ASTM D 3487-16</li> <li>JIS C 2320</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 62770</li> <li>ASTM D 6871-17</li> </ul>
既設器	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 60422</li> <li>IEC 60599</li> <li>IEEE Std C57.106-2015</li> </ul>	—

ASTM : American Society for Testing and Materials

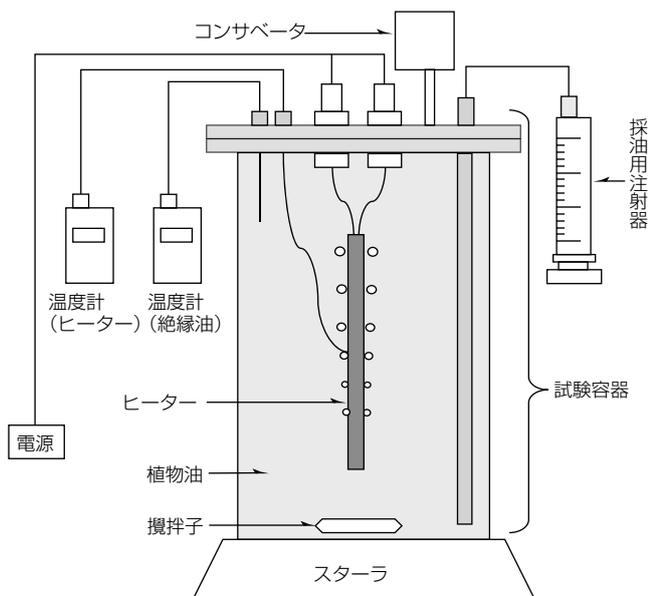


図4. 要素モデル試験装置の構成

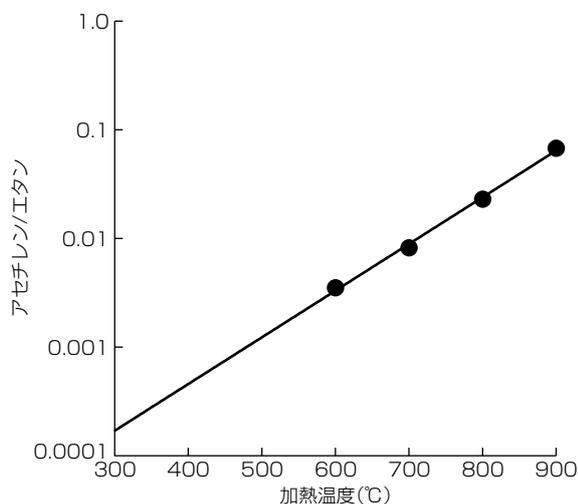


図5. 加熱温度とガスの組成比の例

せた異常診断図で診断することを特長とする。

図4に要素モデル試験装置の構成を示す。油入変圧器の過熱異常を模擬するため植物油中にヒーターを設置し、100℃から900℃まで連続的に加熱した。スターラで植物油を攪拌(かくはん)した後、採油し、加熱によって生成したガスを油中ガス分析によって検知した。試験の結果、植物油からも鉱油と同様の可燃性ガスが生成されたが、各ガスの油中濃度比率は鉱油と異なることが分かった。

図5に加熱温度とガスの組成比の一例を示す。ガス濃度は加熱温度の上昇に伴い増加した。各ガス濃度は変圧器の構造や診断のタイミングに依存する。これらの影響を受けないガスの組成比で加熱温度との相関を調査した。

図6に2種類のガスの組成比からなる異常診断図の一例を示す。フィールドの油入変圧器の場合、経年劣化など異常以外の要因で発生するガスは異常診断の妨害要因となる。これら妨害要因の影響低減のため、2種類のガスの組成比

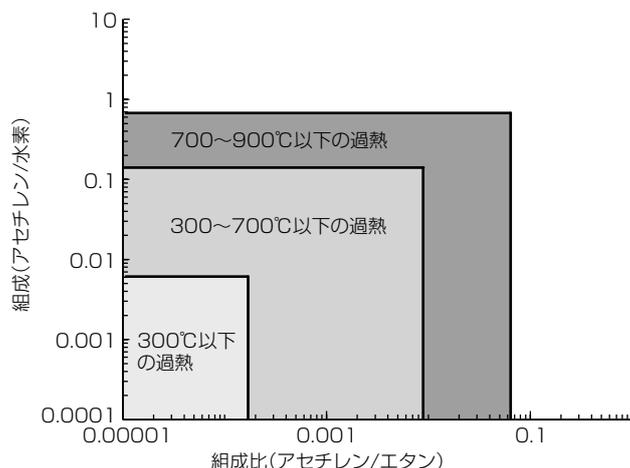


図6. 異常診断図の例

からなる異常診断図を構築した。この手法を適用することで、植物油入変圧器を高精度に異常診断できる。

これまで述べた指標となるガスは鉱油で検出されるガスと同種である。2種類のガスの組成比を組み合わせることで診断する異常診断図のアルゴリズムを採用し、鉱油入変圧器の診断用センサ技術を活用・カスタマイズして、植物油入変圧器へオンラインの診断機能を拡充していく計画である。

#### 4. む す び

鉱油入変圧器に対して、高精度油中ガス分析によって異常の部位を特定できるオフライン診断技術及び異常を早期に検出できるオンライン診断技術の開発を進めてきた。

植物油入変圧器に対して、油入変圧器の過熱異常を模擬した要素モデルの試験結果に基づいた異常診断技術を開発した。

高度化した鉱油入変圧器の異常診断技術及び新規開発した植物油入変圧器の異常診断技術を、油入変圧器の保守・更新の時期と優先順位を判断するための支援ツールとして役立てていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 内藤貞夫, ほか: 変圧器内部診断用油中ガス分析装置, 三菱電機技報, 79, No.12, 773~776 (2005)
- (2) 電気協同研究会: 電力用変圧器改修ガイドライン, 65, No.1 (2009)
- (3) 栗山遼太, ほか: 非鉱油系絶縁油の異常診断技術の開発, 石油学会 第36回絶縁油分科会研究発表会 (2017)
- (4) Kuriyama, R., et al.: Investigation of Indicator Gas for Internal Fault on Ester Oil-immersed Transformer, International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (2017)