配電用中型変圧器に適した劣化診断法の開発

非会員 須崎 嘉樹 (関西電力)

正員 中村 脩 (関西電力)

正員 河内 二三夫 (関西テック)

非会員 山岡 正佳 (関西テック)

非会員 西村 武 (ダイヘン)

非会員 栗山 忠士 (ダイヘン)

Medium-Size Distribution Transformer Diagnostics

Yoshiki Susaki, Non-member, Osamu Nakamura, Member (Kansai Electric Power Co., Inc.)

Fumio Kawachi, Member, Masayoshi Yamaoka, Non-member (Kansai Tech Corporation)

Takeshi Nishimura, Non-member, Tadashi Kuriyama, Non-member (Daihen Corporation)

An improved method of degradation diagnosis for medium-size distribution transformers is described. The proposed method uses refined criteria of degradation for specific application for 200- to 1000-kVA range transformer diagnostics. The new criteria were established with a 95% confidence limit of data after extensive case studies focusing on the relationship between the amounts of CO and CO₂ generated in transformer oil and the length of operating time of transformer. Another feature of this diagnostic technique is the provision of a capability to estimate the thermal history of the insulation material by examining the amounts of certain trace products of decomposition present in the transformer oil. For this purpose, a thermal history discriminant chart was devised by application of a canonical discriminant analysis method.

キーワード：中型変圧器，ガス分析，劣化診断法，CO，CO₂，微量劣化生成物

1. ま え が き

油入変圧器の経年劣化の要因のひとつとして熱による絶縁紙の劣化が考えられるが、これは個々の変圧器の運転状態により劣化の進行速度が異なり一様には判断できないものである。このため各種の診断によって定期的に予防保全を図っている。絶縁紙の劣化はその平均重合度を測定することにより判定できるが、運転中の変圧器では実施できず、分解検査等の運転停止の場合に限られる。このため、現実的には平均重合度と関係の深いCO、CO₂の発生量を測定し、劣化判定することが一般的となっている⁽¹⁾⁽²⁾。

CO、CO₂は絶縁紙の主成分であるセルロースが熱分解して生成され絶縁油中に溶存している。この絶縁油を採取し、CO、CO₂などのガスを窒素ガスでバブリングし

て抽出し、活性炭などをカラムとしたガスクロマトグラフで分析し、ガス発生量と運転年数の関係を知ることで変圧器の劣化度合を判断することができる。

ガス分析結果の判定方法には、可燃性ガス総量による判定、各ガス量による判定および可燃性ガス総量の増加傾向による判定が一般的となっており⁽³⁾、当電力会社においてもこれらに準拠した独自の判定基準を設定し、運用している。ところが、22kV供給のマンション等に設置している比較的小容量(200～1000kVA)の22kV/6kVまたは22kV/400Vの変圧器(以下、中型変圧器という。)にこの判定基準を適用すると、支障なく運転されているにもかかわらずCO、CO₂発生量の多さのために要注意判定となる場合が非常に多く、実際の劣化実態から大きくかけ離れた判定となるという問題があった。そこで筆者らは、過去のガス分析デ

ータを解析することにより中型変圧器に適した新しい判定基準を設定するとともに、今までにない新しい判定指標として、絶縁物から生成され油中に溶けているメタノール、エタノール等の微量劣化生成物を用いた劣化判定法についても検討した。以下にこれらの内容について報告する。

2. ガス分析データの解析

〈2・1〉 ガス発生傾向の調査 当電力会社の変電所等に設置されている2000kVA以上の変圧器（以下、大型変圧器という。）用の油中ガス分析判定基準を表1に示す。中型変圧器についてもこの判定基準を準用して診断を行なっているが、大型変圧器に比べて要注意または異常と判定されるものが多く、図1のように大型変圧器の要注意または異常の判定が約10%であるのに対し、中型変圧器では約75%にもなっている。この中型変圧器の要注意または異常と判定される原因となっているCO、CO₂の2成分について、過去のガス分析データからガス発生量の経年変化を調査した。図2にその調査結果を示すが、本結果で着目すべき事項は次の2点があげられる。

(1) 中型変圧器は大型変圧器に比べて、CO、CO₂の発生量が多い。

(2) 中型変圧器は大型変圧器に比べて、CO、CO₂発生量のばらつきが大きい。

この2点について原因を解明すべく検討を行なった。

〈2・2〉 変圧器の構造、製造工程調査 中型変圧器が

表1 大型変圧器の判定基準

Table 1. Criterion of degradation for the large-size transformer.

(単位: ppm)

検査項目	判定	異常なし	要注意	異常
可燃ガス値 合計 (500kV)	10MVA以下 10MVA超過 500kV	1200ppm 900ppm 600ppm	2700ppm 2700ppm 1800ppm	3600ppm 2700ppm 1800ppm
油中のガス				
* 水素		400ppm	800ppm	800ppm
* 一酸化炭素		300ppm	800ppm	800ppm
* アセチレン		20ppm	100ppm	100ppm
* メタン		250ppm	750ppm	750ppm
* エタン		250ppm	750ppm	750ppm
* エチレン		250ppm	750ppm	750ppm
* プロパン		250ppm	750ppm	750ppm
* プロピレン		250ppm	750ppm	750ppm
* イソブタン		—	—	—
二酸化炭素		要注意未満	下図基準値以上

大型変圧器に比べてCO、CO₂の発生量が多いのは、表2に示すとおり変圧器の構造および製造工程の違いが原因であると考えた。これを検証するため中型変圧器および大型変圧器それぞれの構成材料を縮小模擬したサンプルを作成し、これらを表2に示す製造工程を模擬した処理を施した後、加熱試験を行なった。加熱温度を50℃、70℃、90℃および110℃に設定し、恒温槽にてそれぞれ20日間加熱した後、CO、CO₂発生量を測定した。

中型変圧器 (N=171)	判定	大型変圧器 (N=111)
24.6%	異常なし	90.4%
74.3%	要注意	9.6%
1.1%	異常	0%

図1 大型変圧器用の判定基準での判定結果

Fig.1. Judgement result with criterion of degradation for the large-size transformer.

図2 変圧器の運転年数とガス発生量の関係

Fig.2. Relation of running period of transformer to generative volume of gas.

その結果、図3に示すようにすべてのパターンで中型変圧器を模擬した方がCO、CO₂の発生量が多くなった。このことから中型変圧器のCO、CO₂量の多さは、変圧器の構造および製造工程の相違によるものであることを確認した。

表2 中型・大型変圧器の構造および製造工程
Table 2. Structure and manufacture process of medium-size and large-size transformer.

	中 型 変 圧 器	大 型 変 圧 器
主絶縁物材料	プレスボード、耐熱接着紙	プレスボード、クラフト紙
空間部の気体	空 気 封 入	窒 素 封 入
製造工程	下表のとおり	

工 程	変 圧 器 乾 燥 工 程					
	中身組立	ケース入れ	乾 燥	ケース入れ	真空引き	注 油
中型変圧器	○		● 120°C 約8時間	● 約8時間	● 燃温30分	○
大型変圧器	○	●	● 80°C 4.8時間		● 80°C 4.8時間	○

図3 中型・大型模擬サンプルのガス発生量比較
Fig.3. Comparison of the amount of evolved gas between imitation of medium-size and large-size transformer.

〈2・3〉 ガス濃度を表す単位の検討 中型変圧器が大型変圧器に比べてCO、CO₂発生量のばらつきが大きい原因を探るために、まず、図2のガス発生量の経年変化をCOについて変圧器容量別に見たのが図4である。各グラ

図4 容量別変圧器運転年数とCO発生量の関係
Fig.4. Relationship between evolved amount of CO and the length of operating time by capacity of transformer.

フで中央の直線は一次回帰線、これを挟む上下の曲線のうち、内側の2本は回帰直線の95%信頼区間を意味する。また、外側の2本は推定値の95%信頼区間を意味し、回帰直線上の値(縦軸)を平均とした正規分布を考えた場合に95%の値がこの区間に存在することを意味する。

この外側の95%信頼区間の幅に着目すると300kVA以下と500kVA以上では前者の方がばらつきが大きいことがわかる。CO₂についても同様の傾向があることを確認している。そこで、中型変圧器の中で変圧器容量によりガス発生量にばらつきがあると統一した判定ができないため、この原因を解明すべく検討を行なった。絶縁油に溶解しているガスは絶縁物が熱分解して発生することから、絶縁物重量に比例すると考えられる。また、絶縁物重量および絶縁油容量は変圧器容量により異なるので、これらの比にばらつきがあると、ppmで表した発生量にもばらつきが出ることになる。

表3に中型変圧器の絶縁油容量と絶縁物重量の比を示すが300kVA以下と500kVA以上で大きく差があることがわかる。

表3 絶縁油容量と絶縁物重量の比

Table 3. Ratio of insulating oil capacity and insulating material weight.

変圧器容量[kVA]	200	300	500	750	1000
(A) 絶縁油容量[l]	340	350	440	620	1050
(B) 絶縁物重量[kg]	39.91	43.24	44.66	58.79	102.15
(A)/(B) [l/kg]	8.519	8.094	9.852	10.546	10.279

そこで絶縁物1kg当たりのガス発生量を表すml/kgという単位を用いて、容量別にガス発生量の経年変化を表したものが図5であり、95%の信頼区間でみると変圧器容量によるばらつきが小さくなっていることがわかる。

〈2・4〉 新しい要注意基準の設定 前述のようにガス発生量を表す単位をppmからml/kgに変換し、運転年数との関係を表したものが図6である。このガス発生量を運転年数の2次回帰式で表し、これを中型変圧器の平均的な劣化曲線と考えた。そして、その95%信頼限界の上限ラインを超える部分を正常な運転状態とはいえない難い領域とし、新しい要注意基準として設定した。

この新しい要注意基準の妥当性を検証するために、この基準を中型変圧器の過去のガス分析データに適用して判定基準を見てみると、図7のとおり判定結果の分布が大型変圧器の判定結果の分布とほぼ同レベルとなった。

また、運転中の中型変圧器で新しい要注意基準を超えているもの11台を定期的にガス分析を行ない、ガス発生量の追跡調査を行なった。その一例を図8に示すが、ガス発生量の経年変化は新しい要注意基準に沿って推移しており、特に支障は発生していない。他の10台の変圧器についても同様の傾向を示している。これらのことから新しい要注意基準は、現時点ではほぼ妥当な線であると考えられる。

図5 単位変換後の容量別CO発生量

Fig.5. Evolved amount of CO converted unit by capacity of transformer.

図6 単位変換後のガス発生量

Fig.6. Evolved amount of CO converted unit.

中型変圧器 (N=111)	判定	大型変圧器 (N=111)
91%	異常なし	90.4%
9%	要注意	9.6%
0%	異常	0%

図7 新しく設定した判定基準での判定結果

Fig.7. Judgement result with new criterion of degradation.

3. 微量劣化生成物を用いた劣化判定法の検討

CO、CO₂以外に変圧器の劣化を表す指標として、絶縁物の熱分解により生成され、絶縁油中に溶解している微量劣化生成物の劣化診断への適用の可能性について検討を行なった。加熱温度により、絶縁物から生成される微量劣化生成物の構成比率に特徴があることに着目し、絶縁物の加熱試験によりその検証を行なった。

〈3・1〉 絶縁物の加熱試験 図9に示すとおり変圧器

図8 運転中中型変圧器のガス発生傾向の一例

Fig.8. Example of trend of gas evolution of running medium-size transformer.

内容積 1.5ℓ

図9 試験容器と加熱方法

Fig.9. Test container and heating method.

を縮小模擬した容器を製作し、その中に絶縁物、銅、鉄心材および絶縁油を封入し、恒温槽にて加熱試験を行なった。容器内の材料は、中型変圧器として300kVA、大型変圧器として3000kVAを模擬し、表4に示すようにそれぞれ絶縁油1ℓ当たりの材料比率を算出し、その比率で表5に示す各試料を準備した。また、加熱試験に先立って各試料を表2の製造工程に示すとおり、それぞれの製造工程を模擬した処理を施し、空間部には実機と同様に、中型模擬は空気を、大型模擬は窒素を封入し容器内に納めた。加熱時間は各温度に対して、5日、10日、20日および30日とした。

加熱後の絶縁油を窒素ガスでバブリングして微量劣化生成物を追い出し、TENAX-GCを吸着剤とした吸着管に捕集後、吸着管に窒素ガスを流しながら加熱して微量劣化生成物を脱着し、PORAPAK-Qをカラムとしたガ

表4 中・大型変圧器の油量当たり材料比率

Table 4: Material ratio by liter of oil of medium-size and large-size transformer.

変圧器容量 (絶縁油容量)	300kVA (350ℓ)	3000kVA (3000ℓ)
銅	0.631	0.299
鉄心材	1.086	0.760
耐熱接着紙	0.047	—
クラフト紙	—	0.013
プレスボード	0.064	0.043

(単位: kg/ℓ)

表5 加熱試験材料

Table 5. Heating test materials.

モデル 材料	300kVA 模擬	3000kVA 模擬
銅	630	300
鉄心材	1086	760
耐熱接着紙	45	—
クラフト紙	—	15
プレスボード	65	50
絶縁油量 (ml)	1000	1185

(単位: g)

スクロマトグラフに導入して分析した。

〈3・2〉 正準判別分析 分析に用いた成分はメタノール、エタノール、アセトアルデヒド、酢酸、ギ酸メチルおよびアセトンの6成分で、低温ではアセトン(約50%)が主成分となり、加熱温度が高くなるとメタノールおよびエタノールが主成分(約60%)となった。発生量はギ酸メチルおよび酢酸を除いて、平均的に0~20mg/l、多くても100mg/l程度であり、ギ酸メチルおよび酢酸はこれらの1/10以下であった。

絶縁物の加熱試験の結果として、加熱温度を120℃以下、121~179℃および180℃以上の3種類に数量化して目的変数に、微量劣化生成物6成分の構成比率を説明変数にして、加熱温度と微量劣化生成物の構成比率との関係を見出すため、正準判別分析を行なった。その結果、第一正準変数 Z_1 、および第二正準変数 Z_2 を算出する式が次のとおり求まった。

$$Z_1 = 0.157 \times [\text{メタノール比率}] + 0.164 \times [\text{エタノール比率}] \\ + 0.236 \times [\text{アセトアルデヒド比率}] + 0.161 \times [\text{ギ酸メチル比率}] \\ + 0.162 \times [\text{アセトン比率}] - 17.131 \dots \dots \dots (1)$$

$$Z_2 = 0.093 \times [\text{メタノール比率}] + 0.181 \times [\text{エタノール比率}] \\ + 0.054 \times [\text{アセトアルデヒド比率}] + 0.253 \times [\text{ギ酸メチル比率}] \\ + 0.054 \times [\text{アセトン比率}] - 7.301 \dots \dots \dots (2)$$

加熱試験の結果を(1)(2)式に代入し、第一、第二正準変数を求めて判別図上にプロットしたものを図10に示す。全般的に見ると120℃以下の低温領域は第一正準変数が約-1.8から右側に位置し、左側は、第二正準変数が約1.5から下

図10 熱履歴判別図

Fig. 10. Thermal history discriminant chart.

側に121~179℃の中温領域が位置し、上側に180℃以上の高温領域が位置している。このように微量劣化生成物の構成比率をもとにした判別図上の位置で、変圧器の熱履歴を推定することができる。なお、 Z_1 と平均重合度との関係をみてみると、 Z_1 が小さいほど平均重合度が低下している傾向があることが確認できた。 Z_2 については顕著な相関は見られなかった。

この判別図を検証するために、正常運転中の変圧器の微量劣化生成物の分析結果から第一、第二正準変数を求め、判別図上にプロットしたものを図11に示すが、データの大半は低温領域に位置するが、中温領域または高温領域に位置するものも存在した。

また、前述の CO 、 CO_2 による新しい要注意基準の検証のために追跡調査を行なった変圧器11台のうちの4台について、同様に判別図上にプロットしたものを図12に示すが、4台とも低温領域と高温領域の境界線付近に位置した。

これらの検証の結果を見ると、支障なく運転されている変圧器のデータが、低温領域と高温領域の境界付近に位置しており、第一正準変数の僅かな変化でも、結果が大きく異なることになる。したがって、この判別図を運転中の変圧器に適用することを考えて、高温領域の低温領域側との境界付近についても中温領域とすることで、図13に示すように判別図を補正することができる。

4. む す び

本論文では、変圧器の油中ガス分析による劣化診断について、既存の判定基準が大型変圧器用に設定されたものであることから、過去からの蓄積データの分析および模擬実験により、中型変圧器に適用できる劣化判定基準を設定するとともに、今までにない新しい劣化判定の指標として、微量劣化生成物に着目し、絶縁物の加熱試験により、その構成比率から変圧器の熱履歴を推定できることを示した。

今後は、これらの劣化判定の手法の実現場への適用を図

り、引き続きデータを蓄積していくとともに、必要によりこれらの判定手法の見直しも図っていく必要があると思われる。

図11 正常運転中の変圧器の熱履歴判別図
Fig. 11. Thermal history discriminant chart of transformer running properly.

図12 要注意基準を超える変圧器の熱履歴判別図
Fig. 12. Thermal history discriminant chart of transformer over criterion of "warning".

図13 補正後の熱履歴判別図
Fig. 13. Revised thermal history discriminant chart.

(平成6年12月22日受付、平成7年4月7日再受付)

文 献

- (1) 電気学会通信教育会：電気設備の診断技術，188~204，(1988-11) オーム社
- (2) 穂積直裕・片山洋一・神山一郎・森田邦博・秀島良治・城間富正：「変圧器コイルの寿命診断に関する研究-3 ~10MVA級変圧器の油中ガス分析による劣化推定法-」，電力中央研究所報告W92508，(平成5年9月)
- (3) 高橋 毅・門 裕之・穂積直裕・泉 邦和・堀 勲・永谷尚紀：「油入変圧器の絶縁異常診断法の検討」，電力中央研究所報告W92020，(平成5年10月)

須崎 嘉樹 (非会員) 1962年2月17日生まれ。84年3月姫路工業大学電気工学科卒業。同年関西電力㈱入社。主として架空配電関係の研究に従事。現在、同社総合技術研究所副主任研究員。

中村 脩 (正員) 1945年11月7日生まれ。70年3月京都大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年関西電力㈱入社。主として配電関係の研究に従事。現在、同社総合技術研究所流通設備研究室主幹。

河内二三夫 (正員) 1950年3月27日生まれ。68年3月京都市立洛陽工業高校化学工学科卒業。69年㈱関西テック入社。主として油入変圧器など電気設備の診断法、同分析システムの開発・実用化研究、診断法へのAI適用研究に従事。現在、同社化学研究部主任研究員。日本化学会、人工知能学会会員。

西村 武 (非会員) 1935年5月27日生まれ。54年3月大阪市立都島工業高校電気科卒業。同年㈱ダイヘン入社。主として配電用変圧器の設計、開発に従事。現在、同社配電機器事業部技術部副主査。

山岡 正佳 (非会員) 1964年6月23日生まれ。87年3月日本文理大学工業化学科卒業。同年㈱関西テック入社。主として油入変圧器など電気設備の診断法の開発研究に従事。現在、同社石油営業部。

栗山 忠士 (非会員) 1963年5月9日生まれ。87年3月三重大学電気工学科卒業。同年㈱ダイヘン入社。主として配電用変圧器の設計、開発に従事。現在、同社配電機器事業部技術部に勤務。