光診断による変圧器絶縁油の劣化度評価

非会員 澤田 賢良 正員 元治 崇 (関西電力)

正員 片桐 純一 正員 竹澤 由高 正員 伊藤 雄三 (日立製作所)

Deterioration Diagnosis of Insulating Oil for Power Transformers by Optical Analysis

Kenryo Sawada, Takamu Genji (The Kansai Electric Power Co., Inc.)

Jun'ichi Katagiri, Yoshitaka Takezawa, Yuzo Itoh (Hitachi, Ltd.)

We have developed a novel diagnosis of oil filled middle-sized power transformers by optical analysis. The color of insulating oil gradually turns to yellowish in the long term use. The coloring is caused by the increase of electronic transition absorption due to thermal oxidation of insulating oil.

We derived a relationship between the aging degree of deteriorated oil and the optical absorption loss. The aging degree of deteriorated insulating oil can be estimated using the diagnostic master curve, which is obtained with an accelerated heating experiment. Furthermore, the optical absorption loss was correlated with the average value of polymerization degree of the insulating paper. Therefore, this optical technique is theoretically applicable to diagnosis for power transformers.

キーワード：診断、光素子、絶縁油、中型変圧器、熱劣化、光吸収損失

1. まえがき

中型変圧器の絶縁油の劣化診断方法は、現地で一旦採油した後、持ち帰り油中ガス分析および絶縁油試験によって実施しており、リアルタイムの判定は行われていないのが現状である。そこで筆者らは、変圧器から絶縁油を採油することなく、リアルタイムで劣化判定を行う方法として、光を用いた診断法の可能性について検討している⁽¹⁾。この方法は、絶縁油の劣化度合に応じて光の吸収スペクトルに変化が現れることを利用したものである。現在行われている油中ガス分析では、絶縁紙へのガスの吸着平衡が採油時の温度によって変化することからその都度補正が必要であるが、光診断は温度の影響を受けないのが特徴である。

光を用いた診断法としては、絶縁油の熱劣化に伴う色相変化を色度分光計を用いて評価した報告⁽²⁾があるが、色度とは見かけの色合いを可視光全域の分光スペクトルで評価するパラメータなので、材料の物性変化を定量的に評価するにはあまり適していない。筆者らは、診断パラメータとして単位長さ当たりの光吸収損失を採用している。このパラメータは、熱劣化による材料の化学構造変化に伴って増大し、特定波長での評価が可能である^{(3)・(4)}。

本論文では、実現場で使用されている中型変圧器絶縁油と、熱加速試験により模擬的に作った加熱劣化油の光吸収損失を測定し、光吸収損失と絶縁油の劣化度合との相関関

係を調べた。さらに、寿命診断用のマスターカーブを作成し、油入変圧器の寿命を支配する絶縁紙強度と密接な関係がある絶縁紙の平均重合度との関係について検討した結果について述べる。

2. 劣化検出パラメータの検討

診断パラメータと絶縁油、絶縁紙の劣化度との関係を調査するため、実器および加速劣化させた加熱劣化油や絶縁紙を用い、吸光度スペクトルおよび光吸収損失と平均重合度、油性能、油中溶解ガスとの関係を以下の方法で測定した。

<2.1> 吸光度スペクトルの測定

測定装置には自記分光光度計(U-4000型：日立製)を用い、10mm角の石英セルに約4mlの絶縁油を入れ、熱劣化に伴ってスペクトルが顕著に変化する波長域である可視から近赤外(400~1000nm)間の吸光度スペクトルを測定した。

実器の中型変圧器絶縁油は5~19年使用した定格容量200~1000kVAの合計18台から採油した。

<2.2> 光吸収損失の算出

吸光度を単位長さ当たりの光吸収損失値に換算して、後

述するようにある波長間の損失差を算出した。ここで、光路長 t (m) の試料の光吸収損失 α (dB/m) は、自記分光光度計を用いて測定した吸光度 A_λ から、(1) 式によって算出できる。

$$\begin{aligned}\alpha_\lambda (\text{dB/m}) &= 10 \cdot A_\lambda / t \\ &= -10 / t \cdot \log (I / I_0) \quad \cdots (1)\end{aligned}$$

A_λ : 波長 λ における吸光度
 I_0 : レファレンス透過光強度
 I : 被測定材料の透過光強度

〈2.3〉 加速劣化試験

図1に示した内容積約500mlのステンレス製容器中には中型変圧器の材料構成を模擬するため、絶縁油 (JIS 1種2号油) 400ml、耐熱絶縁紙 (厚さ0.25mm) 45g、エナメル線 (ポリビニルホルマール線 1.3mm ϕ) 30gを封入し4種類の加速劣化温度条件 (130, 150, 165, 180 $^{\circ}\text{C}$) で加熱した。加速時間は各温度に対して概ね、3, 6, 10, 20, 30, 45日とした。なお、耐熱絶縁紙の代わりに、クラフト紙とプレスボードを用いた比較試験も実施した。

図1 加速劣化試験容器

Fig 1. Receptacle of accelerated test.

〈2.4〉 平均重合度測定

絶縁紙の平均重合度は脱油、漂白した後、銅エチレンジアミン溶液粘度法によって測定した。

〈2.5〉 絶縁油試験

日本工業規格 JIS C2101 に規定されている方法、品質特性を基に絶縁油の判定基準を設定し、試験を行い絶縁油の良否、異常の有無を判定した。

〈2.6〉 油中ガス分析

絶縁油中に溶解しているガスをガストリッピング法で抽出、ガスクロマトグラフで測定し、種類と量とから変圧器の内部異常の有無とその診断を行った。

3. 寿命予測理論

寿命予測は Dakin の考え方⁽⁵⁾ に基づき、熱劣化による材料の諸特性 P の変化は、すべて材料の化学構造の変化量 x に起因すると仮定した。即ち P は、

$$P = f(x) \quad \cdots (2)$$

となる。化学構造の変化が化学反応速度論に従うと仮定すれば、時間 t に対して、(3) 式の関係が成り立つ。

$$dx/dt = a \cdot \exp(-\Delta E/RT) \cdot g(x) \quad \cdots (3)$$

ここで、 a は頻度因子、 ΔE は反応の活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は劣化の絶対温度、 $g(x)$ は熱劣化反応を表す関数である。

$t=0$ のとき $x=0$ 、 $t=t$ のとき $x=x$ として、(3) 式を t で積分すると、

$$\begin{aligned}\int_0^x \{1/g(x)\} dx &= \\ a \cdot \int_0^t \exp(-\Delta E/RT) dt &\cdots (4)\end{aligned}$$

が得られる。(4) 式の右辺の積分項は、時間の単位を有するので換算時間 (劣化度) と呼ばれる。

$$\int_0^t \exp(-\Delta E/RT) dt \equiv \theta \quad \cdots (5)$$

(4)、(5) 式から θ は x の関数であり、(2) 式から任意の特性 P も x の関数なので、 P を測定すれば θ を求めることができる。従って、様々な温度条件で熱劣化を行って特性値がある値まで低下したとき、 θ もまたある一定値となる。言い換えれば、異なる温度条件下で劣化が生じて、 θ が等しければ同じ劣化程度であることを意味する。次に、材料の寿命点 t_0 での換算時間を θ_0 とすれば、時間 t での実測から求めた換算時間 θ との差 $\Delta \theta$ が余寿命に相当し、(6) 式で表される。

$$\Delta \theta = \theta_0 - \theta = \int_t^{t_0} \exp(-\Delta E/RT) dt \quad \cdots (6)$$

(6) 式より、時間 t 以降の温度条件が定まれば、余寿命の時間 Δt を求めることができる。

活性化エネルギー ΔE は、加速劣化試験結果よりアレニウスプロットから算出した。この ΔE を (5) 式に代入して、加熱時間 t を換算時間 θ に変換後、再プロットして、診断マスターカーブを作成した。

4. 絶縁油の新品と実器劣化油の比較分析

一般的に変圧器用絶縁油は精製鉱油が使用されている。

この絶縁油の機能は、絶縁紙の空隙部をうめて絶縁性を向上させる他、対流による放熱効果もある。運転中の変圧

器は油温が上昇し、経年とともに熱劣化を生じ有機酸や水分が生成され、絶縁油の色相も淡黄色透明状態から黄色化する。そこで今回、経年絶縁油の色相の変化を定量化するため、透過型の分光光度計で吸光度スペクトルを測定し、経年劣化との関係を検討することとした。

4.1 吸光度スペクトルの測定

図2に新油と経年劣化油（5，10，15，19年使用油）の吸光度スペクトルを示す。スペクトルは短波長側ほど吸光度が増大し、長波長側では変化がないことから、この変化は絶縁油の熱酸化劣化に基づく電子遷移吸収の増大であると考えられる。電子遷移吸収とは、分子中の電子が励起状態になるときに起こる吸収で、波長が短いほど指数関数的に大きくなる吸収である。

測定したスペクトルから、波長800 nm以上の領域では、新油のスペクトル①と劣化油のスペクトル②～⑤ではほとんど変化がなく、短波長の800 nm以下の領域では、使用年数が長い絶縁油ほど吸光度が増大している。なお、920 nmのピークは、絶縁油の分子中のC-H結合が赤外領域に有する基準吸収の4次の高調波（4倍音）、750 nmのピークは同じくC-H結合の5次の高調波（5倍音）を示している。これらの強度は変圧器間での差はほとんどなく、劣化度に関係しないピークと言える。

図2 実器絶縁油の吸光度スペクトルの変化
Fig 2. Time dependence of optical absorbance spectra of insulating oil.

なお、有機化合物の構造解析として一般に用いられているフーリエ変換型赤外吸収スペクトル（FT-IR）の測定結果では、酸化劣化反応で生成するカルボニル基のピークは現れず、スペクトルの差は劣化の前後で全く観測されなかった。FT-IRでは数%以上構造変化があれば検知できるので、酸化劣化反応によるカルボニル基の生成量は数%未満と考えられる。カルボニル基の生成量は微量でも、可視域での黄色化は顕著に進んでいる。この原因としては、カルボニル基が炭素～炭素二重結合と共役しているため、

微量でも可視域で強い吸収を伴うためと推定される⁽⁶⁾。

4.2 光吸収損失の算出

スペクトルの形状変化だけでは劣化診断を定量的に行うことができないので、特定波長における光吸収損失を算出し定量化に使用できる波長を選定した。劣化に伴って顕著に変化する650 nm以下の領域と、ほとんど変化しない800 nm以上の領域から50 nmおきにそれぞれ2波長ずつを選び検討した。なお、550 nm以下の領域は劣化が進行すると検出器がオーバーレンジになる可能性があるため除外した。

図3には波長600，650，800，850 nmにおける光吸収損失と絶縁油使用年数との関係を示す。波長800 nmおよび850 nmは、使用年数に関係なくほぼ一定である。波長600 nmおよび650 nmではバラツキが大きい、使用年数とともに単調増加傾向が見られる。吸光度スペクトル変化からも明らかに、変化量は600 nmの方が大きくなっている。

図3 実器絶縁油の光吸収損失の経年変化
Fig 3. Time dependence of optical absorption loss of insulating oil.

図4に波長600～800 nm間の光吸収損失差（スペクトルの傾きに相当）を示す。図3のバラツキよりも損失差で表した図4の方がバラツキは小さくなっている。この理由は、分光光度計セルの表面反射の影響等が、損失の差を取るによりキャンセルされたためと考えられる。なお、定格容量200～300 kVAの器種は使用年数が同じでも、容量の大きな他の変圧器より光吸収損失差が大きい値を示した。この原因は前記小容量変圧器の負荷率が他の変圧器よりも大きかったためと考えられる。この件については、今後検討していく。以上の検討結果から、2波長間の光吸収損失差は劣化度と相関があると推定され、実器絶縁油の光による診断については、透過方式の光診断による絶縁油劣化度の定量化から可能であると考えられる。

図4 実器絶縁油の光吸収損失差の経年変化
Fig. 4. Time dependence of optical absorption loss of insulating oil.

5. モデル試料を用いた加速試験による診断項目の確認

次に、図1のモデル試料を用いて、恒温槽で単純に温度を変化させ熱劣化の加速試験を行い、絶縁油診断用のマスターカーブを作成した。加速劣化温度は130, 150, 165, 180℃の4条件とした。

〈5・1〉吸光度スペクトルの測定

図5に150℃空气中における加速劣化試験による絶縁油の熱劣化に伴う吸光度スペクトル変化を示した。吸光度スペクトルは加速日数とともに短波長側から増大した。加速初期では、可視光全域にわたり吸収が無く透明であった

図5 加熱劣化油の吸光度スペクトルの経時変化
(150℃加熱耐熱絶縁紙使用)

Fig. 5. Change of absorbance spectra of insulating oil aged at 150°C.

が、劣化に伴って、波長の短い青～緑の光が吸収されるようになり絶縁油は黄色化した。

この挙動は、その他の3種類の加速劣化温度でも同様の傾向を示し、温度が高いほどスペクトル変化が大きくなった。実器絶縁油のスペクトル変化と同様に、920nmに存在するC-H結合の高調波吸収のピークが劣化度に関わらず全く変化していないことから、この変化は絶縁油の熱酸化劣化に基づく電子遷移吸収の増大が支配的であると考えられる。

〈5・2〉光吸収損失の測定

前記のスペクトル変化では定量的な劣化診断が行えないため、実器の絶縁油と同様に、波長600～800nm間の光吸収損失差をパラメータとしてその経時変化を図6に示す。(a)の耐熱絶縁紙を用いた加熱劣化油の光吸収損失

(a) 耐熱絶縁紙使用

(b) クラフト紙、プレスボード使用

図6 加熱劣化油の光吸収損失差の経時変化
Fig. 6. Time dependence of optical absorption loss of insulating oil with heat acceleration.

差は各加速劣化温度とも、加速日数に対してほぼ直線的に増大している。比較として実施した (b) のクラフト紙とプレスボード共存下の加熱劣化油は、(a) の変化とは異なり、絶縁紙の劣化の影響を受けていると考えられる。

ここで、前述の実器経年劣化品の絶縁油の光吸収損失差は使用年数が20～30年の絶縁油でも、現状の使用状況下では25 dB/m (図6中の点線) 程度であり、このモデル劣化試験の高温・長期間ほど劣化していない。

〈5・3〉診断マスターカーブの作成

図6を用い劣化の絶対温度Tの逆数に対して、一定の光吸収損失値に達するまでの時間tの対数をプロット(アレニウスプロット)し、その傾き ($\Delta E/R$) から活性化エネルギー ΔE を算出すると 5.8×10^4 (J/mol) となった。この ΔE 値と(5)式によって加速時間tを換算時間 θ に変換すると図7に示した4種類の異なる加速温度条件の特性を、1つの特性として表した寿命診断マスターカーブが得られる。

変圧器の寿命点を油中ガス分析や絶縁紙の平均重合度測定結果などから総合的に特定した後、図7を用いることにより、絶縁油の光吸収損失値から機器の余寿命を(6)式を用いて原理的には予測することができる。

図7 寿命診断マスターカーブ (耐熱絶縁紙使用)

Fig 7. Master curve of diagnosis.

〈5・4〉光吸収損失と各種診断項目との関係

現在実施している変圧器の劣化診断で測定し判定する特性と、光吸収損失差との関係を相関係数により検討した。

油中ガス分析では十種類程度の発生ガス量を、また、絶縁油試験では主に4種類の項目について測定している。

ここでは、実器絶縁油と加熱劣化油を用い、上記診断項目とそれぞれの光吸収損失差を測定し、相関関係を調査した。表1に測定した診断項目と光吸収損失差との相関係数を示す。絶縁油試験では、実器絶縁油の全酸価との相関係数が0.706となっており、光吸収損失差を測定することによって絶縁油の酸化劣化を検知可能と考える。なお、

加熱劣化油で相関係数が低くなったのは加速温度が高すぎて急激な劣化となったためと推測される。その他の絶縁油試験項目では損失差との相関係数が低く、損失差では直接的な診断は難しいと考えられる。

油中ガス分析では、分子にC=C構造を有する一部のガスは相関係数が少し高い値を示している。このガス単体の電子遷移吸収は紫外域にあり、また熱酸化による共役構造体への変化もないため、直接的に観測はしていない。他のガスは相関があまりなく診断はできないと判断できる。これは対象ガスの特性吸収波長が、本報告で使用している波長域よりも長波長側に存在することによるものである。

表1 光吸収損失差との相関係数

Table 1. Coefficient of correlation to optical absorption loss.

診断項目	実器絶縁油	加熱劣化油
絶縁油試験		
全酸価	0.706	0.527
絶縁破壊電圧	— (一定値)	-0.087
体積抵抗率	-0.319	-0.528
水分	-0.544	0.756
油中ガス分析		
メタン	-0.155	0.487
エタン	-0.521	0.549
エチレン	0.590	0.676
プロパン	-0.504	0.351
プロピレン	0.071	0.650
イソブタン	検出されず	検出されず
アセチレン	検出されず	検出されず
水素	-0.622	0.060
一酸化炭素	0.487	0.259
二酸化炭素	0.681	0.632
酸素	0.682	0.280
窒素	0.044	-0.534

次に、図6で示したように機器に使用されている絶縁紙の種類により絶縁油の光吸収損失変化に相違が確認されたことから、この特性は絶縁油自身の劣化以外に、絶縁紙の劣化の影響も含めて測定していると考えられる。そこで油入変圧器の寿命を支配する絶縁紙強度と密接な関係にある平均重合度と、加速劣化油の光吸収損失差との関係を調べた。

図8に示したように、絶縁油 (加速劣化油) の光吸収損失差と絶縁紙 (耐熱絶縁紙) の平均重合度とは相関係数が-0.76となり、実験室的には両者に相関が見られるのがわかった。

以上のことから、絶縁油の光吸収損失差も油入変圧器絶縁紙の劣化診断に適用可能と考えられる。

図8 絶縁紙の平均重合度と絶縁油の光吸収損失差との関係

Fig 8. Relation between degree of polymerization of insulating paper and optical absorption loss of insulating oil.

6. まとめ

以上の試験結果から得られた結論をまとめると、次のとおりである。

- (1) 変圧器絶縁油の新しい劣化診断方法として、単色2光源を用いた透過光方式診断技術を提案し、加速劣化試験から2波長間の光吸収損失差をパラメータとする診断マスターカーブを作成した。このマスターカーブを用いれば寿命診断への応用が可能である。
- (2) 変圧器の寿命を支配する絶縁紙の平均重合度と、絶縁油の2波長間の光吸収損失差は相関を有しており、絶縁紙の残存寿命を定量化するパラメータとして光吸収損失差が有効であることが解った。

今後は、絶縁物物性の劣化指標と電気的絶縁性能との関係の明確化および実器でのデータ照合を進めるとともに、変圧器への光センサーの設置方法の確立、さらに絶縁紙の直接診断の確立等を含めて検討を進めていく。

(平成11年2月24日受付, 同11年9月2日再受付)

文 献

- (1) 澤田、不動、元治、竹澤、片桐、伊藤：平成9年電気学会全国大会、[5], 602-605(1997)。
- (2) 三井、矢成：電気学会論文誌A, 107[12], 563(1987)
- (3) Y. Takezawa, S. Akasaka, T. Koyama, H. Miya, M. Shimodera : *Polym. Eng. Sci.*, 35[17], 1375-1380(1995)。

- (4) 竹澤、伊藤、下寺、宮：電気学会論文誌A, 117[8], 846-851(1997)。
- (5) T. W. Dakin : *AIEE Trans.*, 67, 113-122(1948)。
- (6) Y. Takezawa, S. Tanno, N. Taketani, S. Ohara, H. Asano : *J. Appl. Polym. Sci.*, 42[10], 2811-2817(1991)。

澤田 賢良 (非会員) 1965年10月22日生。1986年3月

高知工業高等専門学校電気工学科卒業。同年関西電力㈱入社。1991年～同社総合技術研究所勤務。主として、変圧器関係の改良・劣化診断の研究に従事。

元治 崇 (正員) 1951年1月30日生。1975年3月岡

山大学大学院工学研究科終了。同年関西電力㈱入社。1985年～同社総合技術研究所勤務。主として、配電線雷害対策・配電自動化に関する業務に従事。現在、同所流通設備研究室主幹。

片桐 純一 (正員) 1949年6月28日生。1968年3月山形

県立山形工業高校工業化学科卒業。同年(株)日立製作所日立研究所入所。主として、有機絶縁材料の開発、物性に関する研究に従事。

竹澤 由高 (正員) 1963年3月25日生。1987年3月慶應

義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所日立研究所入所。主として、電気絶縁材料等の有機材料の熱劣化と光物性との研究に従事。現在、同所材料第一研究部主任研究員。1994年電気学会論文発表賞、1998年電気学会論文賞受賞。工学博士。

伊藤 雄三 (正員) 1956年5月17日生。1986年3月大阪

大学大学院理学研究科博士課程中退。同年(株)日立製作所日立研究所入所。1992年まで有機非線形光学材料の研究に従事。1993年より1年間米国ペン大にて共同研究。企画室を経て、現在は絶縁材料の研究に従事。材料第一研究部絶縁材料グループリーダー、主任研究員。1998年電気学会論文賞受賞。理学博士。