

変圧器の寿命診断手法に関する研究

中国電機製造株式会社 開発部 山路 昭久
 (H18/11までエネルギー総合研究所 流通設備担当)
 エネルギー総合研究所 流通設備担当 藤江 栄治



1 はじめに

長期間運転してきた配電用変圧器の更新要否について、これまで当社では、諸条件を考慮するもの、使用年数が重要な判断指標となってきた。合理性を欠くものではないにしても、使用年数だけで、変圧器の物理的な劣化の程度がわかるわけではない。実際、研究材料に使用した、更新により廃棄した変圧器の中には、まだ使えると考えられるものがあつた。

そもそも変圧器の寿命とはどんな状態を指すのか、信頼性を保ちつつ、どれだけ長期間使用できるのか、といった課題に対して、研究は以前から進められている。電力用油入変圧器に関しては、電気協同研究54-5「油入変圧器の保守管理」において研究成果が整理されており、各種の診断手法が提唱されている。

これまで、これらの手法をもとに、廃滅する変圧器からの実測データを用いて、当社での変圧器更新判断に最適な方法の模索を行ってきた。ある程度データが蓄積でき、一定の結論を得たため概要を紹介する。

2 油入変圧器の劣化の考え方

変圧器の劣化に関する一般的な考え方について、前述した文献⁽¹⁾で紹介されている内容について要旨を示す。

2.1 油入変圧器の寿命

変圧器に使用されている材料の中で、経年劣化が認められているものは絶縁油、絶縁紙およびプレスボードなどの紙材料である。このうち、絶縁油については、絶縁性能が低下した場合、新油への交換を行うことができるが、巻線絶縁紙やプレスボードについては、容易には交換できない。なお紙材料の劣化で問題となるのは、絶縁性能ではなく、機械的な引張強さである。プレスボードは、温度上昇の程度が絶縁紙より小さく、更に劣化による特性低下への影響も小さい。

このようなことから、変圧器の寿命を決定するのは、巻線絶縁紙の引張強さの低下となる。その限界値はつぎのような考え方で決まる。

変圧器の負荷側で短絡事故が起きたとき、事故電流によって変圧器巻線には電磁機械力が生じる。巻線絶縁紙の引張強さが経年劣化により低下し、この機械力に耐えきれない場合、絶縁紙が破れて変圧器内部事故に波及する。この限界値はリスクの評価具合で諸説あるが、おおむね新紙の50~60%程度である。

2.2 平均重合度

変圧器に使用されていた巻線絶縁紙の引張強さを正確

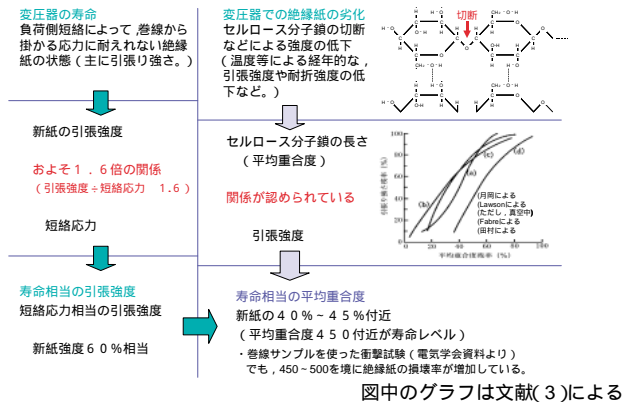


図1 変圧器の寿命の考え方

に測定することは、絶縁紙の巻きぐせや折れなどが影響して実際には難しい。このため、絶縁紙の引張強さと密接な関係のある「平均重合度」が絶縁紙劣化評価の基本的な尺度となる。

平均重合度とは、紙材料の主要構成物質であるセルロース分子のつながり数の平均値である。劣化するとセルロース分子は切断されて短くなり、同時に引張強さも低下する。

引張強さが60%に低下するとき、平均重合度は40~45%（絶対値では初期値を1,000として400~450）に低下する。したがって変圧器の寿命は、巻線絶縁紙の平均重合度が450に低下した時点となる⁽²⁾。こういった事象の関連を図1に示す。

図2に当社の廃滅変圧器から採取した巻線絶縁紙の平均重合度を示す。経年が進んで重合度が低下する様子が見えるが、高経年の変圧器でも重合度がそれほど低下していないものもある。（重合度に範囲があるのは、巻線絶縁紙を複数箇所から採取しているため）

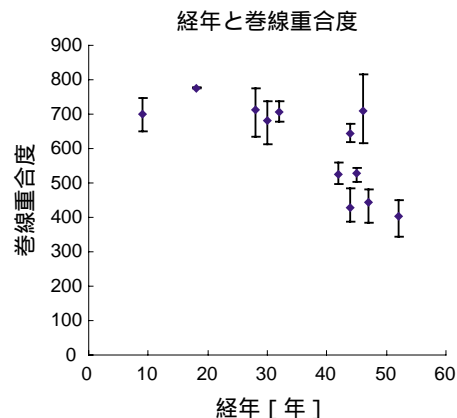


図2 経年と巻線絶縁紙平均重合度

3 寿命診断手法の概要

まだ廃滅すると決めていない変圧器について、巻線絶縁紙の劣化度合いを知るのに、巻線絶縁紙そのものを採取して調べることはできない。

いまとられている方法は大きく2とおりある。ひとつは絶縁紙が劣化する段階で生成され、油中に溶け出した成分の量から劣化度合いを推定する方法である。分析に必要な絶縁油は少量であり、変圧器を停電させる必要はない。診断コストがきわめて小さい点が大きな特徴である。

もうひとつは、リード線などに巻かれている絶縁紙で、採取してもその後の運転に影響しない絶縁紙を採取して調べる方法である。費用も手間も大きくなるため、変圧器のメンテナンス工事にあわせて実施するなどの工夫が必要である。

これらの手法について概要を表1に示す。採否欄は、検討対象としたか否かの結論を示す。

4 診断手法の評価

4.1 油中成分による診断

油中のCO₂+CO濃度、フルフラール濃度をとりあげ、実用的な劣化診断が可能か調べた。

方法は廃滅予定の変圧器を用い、運転中に採取した絶縁油から得た前記濃度と、廃滅後に巻線絶縁紙を採取して得た巻線平均重合度を比較した。結果を図3、図4に示す。

なお、絶縁油中の前記濃度は、絶縁油保守経歴による補正のほか、変圧器内の紙の総量と絶縁油量の割合で補正してある。(紙の量の割合が多ければ、同じ劣化度合いでも油中で検出される劣化成分は濃くなる)

このように劣化診断には製造者のデータが不可欠である。検討に用いた廃滅変圧器のほとんどは中国電機製造(株)製であり、今回示すデータはすべて同社に委託して得た。

表1 寿命診断手法の概要と得失

手 法	概 要 / 得 失	採否	
油中成分	CO ₂ +CO量	油中のCO ₂ +CO体積濃度を測定。 データ入手に手間が不要。 絶縁油中のガス分析はすでに定期保守の項目となっている。 絶縁油に関する工事履歴をもとに濃度を補正する必要がある。 脱気工事で大幅に変化するため、長期間運転した変圧器のほとんどで濃度補正が必須。	
	フルフラール量	絶縁油中のフルフラール重量濃度を測定する。(フルフラールは液体) 診断コスト小。 絶縁油に関する工事履歴をもとに濃度を補正する必要がある。 ただし絶縁油交換しなければ濃度変化はないため、濃度補正が必要となる変圧器の割合は少ない。	
	アセトン量	絶縁油中のアセトン重量濃度を測定する。(アセトンは液体) 診断コスト小。 絶縁油に関する工事履歴をもとに濃度を補正する必要がある。補正が必要な場合は少ないものと考えるが、補正方法はこれから模索することになる。	×
紙の採取	ラインリード絶縁紙平均重合度	低圧側リード線接続部分の絶縁紙を採取し、平均重合度を得る。 採取作業が比較的小規模。 採取部位が上部で、抜油量が少。 改造工事で、新設時からのリード線絶縁紙はなくなる例が多い。 得られた値に補正を行うことなしである程度の精度が期待できる。 変圧器内部の最高温度部との巻線絶縁紙と環境が近いため。	
	タップリード絶縁紙	タップリード線接続部分の絶縁紙を採取して平均重合度を得る。 採取作業の規模が大。 採取部位が変圧器の中間部で大量抜油が必要。 改造工事で、新設時からのリード線絶縁紙はなくなる例が多い。 得られた値の補正が必須。 変圧器の最高温度部から離れているため、得られた平均重合度は最高温度部の巻線絶縁紙よりも小さくなる。	
	プレスボード	プレスボードを一部分採取して平均重合度を得る。 得られた値の補正が必須。 最高温度部の巻線絶縁紙とくらべ、絶縁油中の環境、紙質とも相違する。	×
他	変圧器負荷データ	運転開始時から蓄積した、負荷データのみで絶縁紙重合度を推定する。 理論的に可能だが、基礎研究段階	×

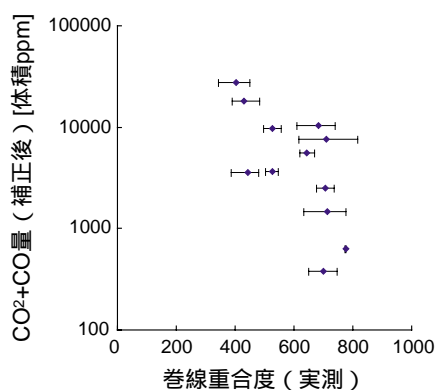


図3 CO₂ + CO濃度と巻線重合度

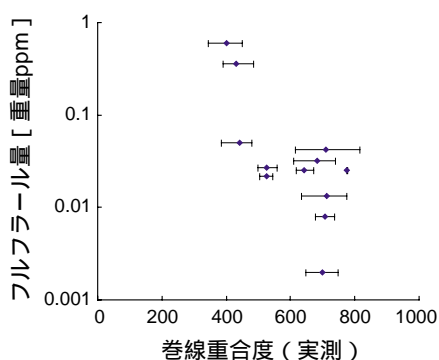


図4 フルフラール濃度と巻線重合度

絶縁紙は、採取位置を変えて、4～6箇所から採取した。図中、巻線絶縁紙の重合度のばらつきは、最小（最悪）、平均、最大（最良）の結果を示す。

i. 評価

文献⁽¹⁾では、CO₂ + CO濃度0.2ml/g、フルフラール濃度0.0015mg/gが、平均重合度450相当であり、要注意レベルとなっている。単位を考慮するとそれぞれCO₂ + CO濃度10,000ppm（体積）、フルフラール濃度0.075ppm（重量）となり、本データでも同様の結果を確認できた。

しかし図のように、濃度域によっては、重合度が最大で200程度もばらついている。本診断では、油中成分濃度から巻線重合度を推定することが目的であるが、どのように近似線を持ってきても前後100程度の誤差を覚悟しなければならない。今後のデータ蓄積と、再評価が必要である。

ii. 油中成分の濃度補正

複数の変圧器を比較したとき、補正後のCO₂ + CO濃度、フルフラール濃度の大小の順番は同じはずである。取得したデータはほぼそうだったが、前後しているデー

タもあった。これは濃度補正がうまくいかなかったことを示している。

フルフラールについては、油交換の経歴があるのは全12例中2例であり、その他は保守経歴による補正は行っていない。さらに油交換をしても、フルフラールは絶縁紙にとどまる割合が多く（たとえば85%⁽¹⁾）、補正割合は小さい。

一方、CO₂ + CO濃度の補正については、脱気作業の頻度が多いうえ、補正する場合も、実測値の数百分の補正量となる例がある。

濃度補正のとき生じる誤差について考えると、フルフラール分析の方が有利といえる。

4.2 リード絶縁紙採取による診断

廃滅した変圧器のラインリードおよびタップリード接続部の絶縁紙を採取し、平均重合度を調べ、その変圧器の巻線絶縁紙の平均重合度と比較した。結果を図5、図6に示す。

両データとも、巻線絶縁紙の重合度と非常によい相関が認められる。

ラインリードの平均重合度は、まったく補正を行っておらず、採取作業に手間がかかるが、診断方法としては、補正時の誤差混入のおそれがなく、望ましい方法といえる。

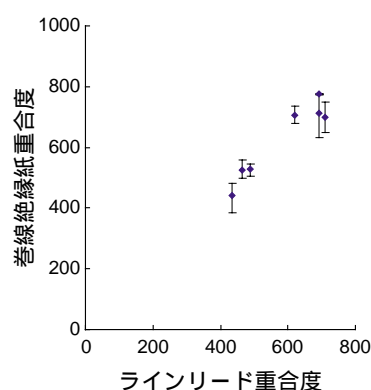


図5 ラインリード絶縁紙重合度と巻線重合度

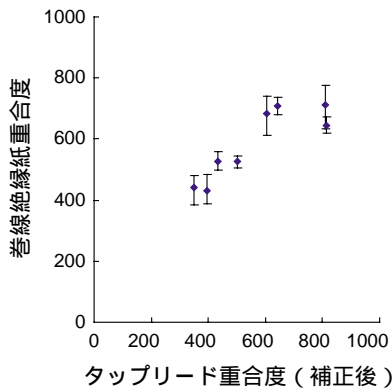


図6 タップリード絶縁紙重合度と巻線重合度

タップリード採取によるデータは、紙面の都合で省略するが、ある程度手間をかけた補正を行っている。補正に要するデータ項目が多く、誤差が混じりやすいほか、データ準備が煩雑である。ラインリードの絶縁紙が採取できれば、必ずしもタップリードの絶縁紙にこだわる必要はないものとする。

ところで、廃滅変圧器からリード線絶縁紙を採取しようとしたところ、新設時の絶縁紙がない、あるいは絶縁紙がない、という例が複数あった。理由は過去に行った改造、製作当初のリード線絶縁材料の違い(布巻電線等)によるものである。絶縁紙採取の可否は事前の調査が重要である。

なお、今後診断を行う多くの変圧器の二次リード線絶縁紙は、何本もの平角銅線にそれぞれ巻かれてあり、絶縁紙採取の際、努力すれば旧紙を一部残すことができる。リード線の重合度測定は、通常は変圧器の一生に1回程度と考えられるが、もし時期をおいて複数回測定ができれば、劣化進展速度を示す、極めて貴重なデータとなる。

4.3 実運用での診断手順

コストと精度のバランスを考えて、実運用では、コストの小さい油中成分分析と、精度の得られるリード線絶縁紙採取の結果を組み合わせる判断することが現実的である。

リード線絶縁紙採取による分析は、単独で行うにはコストが過大であるが、何十年もの使用期間中に1回程度は、大規模保守作業などの適当な機会があるものとする。

表2 実運用での診断手順イメージ

	方法	概要
1	油中成分分析 ・定期的実施	<ul style="list-style-type: none"> ・ある程度(例:30年)の経年変圧器を対象 ・ただちに更新を検討する必要がある変圧器を抽出することが可能。相関が弱いといっても、高濃度域(たとえばCO₂+CO濃度10,000ppm附近)であれば、絶縁紙の劣化進展は確実。
2	ラインリード絶縁紙分析 ・大規模メンテナンス時に実施	<ul style="list-style-type: none"> ・実測したラインリード絶縁紙の平均重合度は、そのときの巻線絶縁紙の平均重合度と同じものと割り切る。油中成分との相関データが飛躍的に増え、油中分析の精度向上にもつながる。(廃滅変圧器だけではデータ数が増えない。)
3	油中成分分析(リード絶縁紙採取後) ・定期的実施	<ul style="list-style-type: none"> ・方法1で使用した相関式を平行移動させ、方法2の時点の油中濃度と巻線重合度が正しくなるようにする。その後はこの相関式で、油中成分から巻線重合度を推定していく。

5 さいごに

これまで取得したデータで一応の結論をまとめたが、データ数は決して十分とは言えず、精度の向上を目指して継続したデータ蓄積が必要である。

しかし研究という取組みでは、データ蓄積は少しずつしか進まない。工夫は必要であるが、実運用に移し、試行しながら精度向上を目指してはどうかと考える。少なくとも、変圧器の劣化診断は、そういった検討ができるレベルには達したものとする。

今回の評価に採用したデータだけでも過去9年分であるが、さらにそれ以前の土台となる取組み期間がある。携わった諸先輩と、委託先の中国電機製造各位には、個別にご紹介できないのを申し訳なく感じている。またお手数をおかけした社外、社内関係各位に厚く感謝する。

参考文献

- (1) 電気協同研究 第54巻 第5号(その1) 油入変圧器の保守管理 1999.2
- (2) JEM 1463 変圧器用絶縁紙の平均重合度評価基準 1993
- (3) 石油学会編 電気絶縁油ハンドブック、講談社 1987