

## 絶縁油の絶縁破壊電圧に対する水分量の影響

電力用変圧器では、伝熱媒体および誘電材料として、セルロースとともにオイルを利用しています。絶縁破壊電圧（絶縁耐力）は絶縁油の最も重要なパラメータの一つです。絶縁破壊電圧は、変圧器の使用開始時に計測され、運転期間中は一般に定期的なサンプリング法によってモニタリングされています。

絶縁破壊電圧は、水分、粒子、酸性度、圧力などいくつかの因子の影響を受けることが報告されています[3、4、5、6]。本研究は、代表的なオイル標本セットを用いて絶縁破壊電圧の水分依存性を調べ、オンライン水分計測の利点を述べることを目的としています。

### 材料と手法

本研究で使用した変圧器のオイル標本（表1）は、3種の鉱油、1種の合成エステルベースのオイル、および運転中の変圧器から採取した2種の鉱油標本です。さらに、絶縁油の経年劣化について2種の鉱油を使用し、酸化処理によってシミュレーションを行いました。ここでは、銅片を触媒として、150°Cのオイル容器に空気を混入しました。数日後、オイルの色が暗褐色に変化し、全酸価（TAN）値が約1.6に増大しました。

オイル標本の絶縁破壊電圧は、IEC 60156基準に従い、BA100絶縁破壊

分析器（b2 electronic社製）を使用して室温で計測しました。一連の計測（6回の絶縁破壊）は、それぞれの水分レベルで数回繰り返しました。ヴァイサラMMT330変換器のプローブを絶縁破壊分析器のテストセルに取り付けた装置で、飽和に対する相対的なオイルの水分レベル（オイル中の水分活性値）を計測します。この変換器には、水分子の量で静電容量が変化する静電容量式高分子センサが搭載されており、このセンサがオイルの水分活性値を計測します。

オイルの水分レベルを変化させるために、

オイルの絶縁破壊電圧を決定する方法についてはIEC 60156基準[1]に、また、変圧器メンテナンスの観点から結果を解釈する際のガイドラインについてはIEC 60422[2]の基準に記載されています。

例えば、170kVを超える新しい変圧器に対しては下限値として60kVが推奨されていますが、絶縁破壊電圧が50kVを下回る場合にはオイル交換が必要となります[2]。

表1 研究で使用したオイル標本

標本1	絶縁油 1、新品
標本2	絶縁油 1、酸化処理あり
標本3	絶縁油 2、新品
標本4	絶縁油 2、酸化処理あり
標本5	絶縁油 3、新品
標本6	合成エステルベースの絶縁油、新品
標本7	変圧器 1（2001年運転開始、標本は2011年9月に採取）
標本8	変圧器 2（1972年運転開始、1993年にオイル交換、標本は2011年9月に採取）

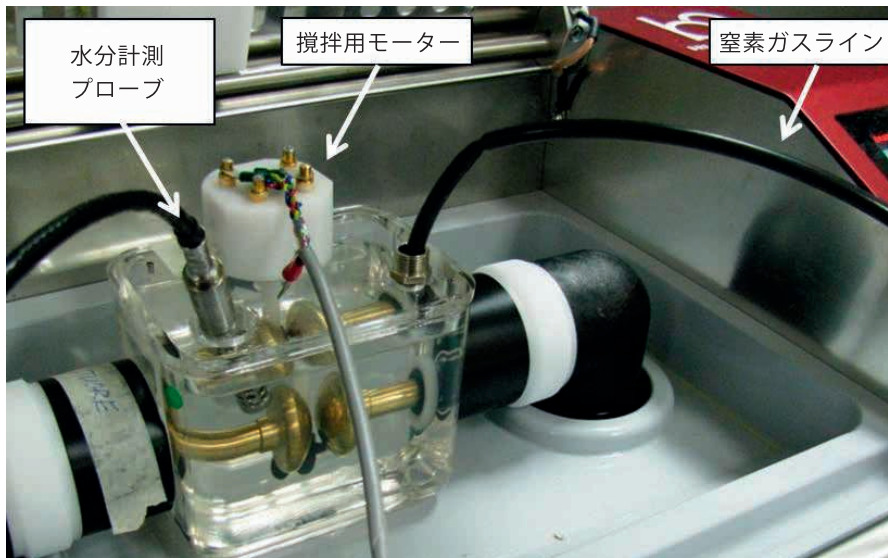


図1 水分計測用プローブと水分を含む窒素を送り込むガスラインを取り付けた絶縁破壊電圧分析用テストセル

飽和窒素フローをオイルの中に投入し、絶えずかき混ぜておきました。飽和セルを恒温槽に浸して窒素フローの水分を制御し、それによってオイル標本の水分量を制御しました。窒素フローは、一連の絶縁破壊電圧計測を開始する前に止めました。図1では、プローブとガス線を取り付けたテストセルを示しています。

## 結果と考察

図2では、オイル内水分の相対飽和度を変化させた場合の絶縁破壊電圧の計測結果を示しています。また、それぞれの点は6回の絶縁破壊の平均を示しています。各オイル標本の絶縁破壊電圧は、異なるオイル標本(60~88kV)間での違いを説明するためにそれぞれの乾性油の値で正規化されています。相対水分飽和度が20%未満の場合は、絶縁破壊電圧がほとんど変化していないと考えられます。相対水分飽和度が20%を超えると、絶縁破壊電圧が急激に低下しています。

この性質は、試験した全てのオイル標本で同様であると考えられ、新しい標本と酸化処理済み標本で類似した傾向を示すという意外な結果に対する解釈の1つとして、参考文献[4]では、絶縁破壊電圧に寄与するのがTANではなく低分子酸であるためとしています。

図2には、計測データに対応する近似曲線も描かれています。近似ではありますが、このような近似曲線を用いて、オイル内水分の変化が絶縁破壊電圧に与える影響を評価することができます。

上記の絶縁破壊電圧モデルでは、オイルの水分レベルがppmの水分含有量ではなく、相対飽和度で示されていることに注目してください。このことが重要なのは、水溶性、すなわち与えられた相対飽和度に対応するppm値がオイルによって大きく異なり、オイルの温度と使用年

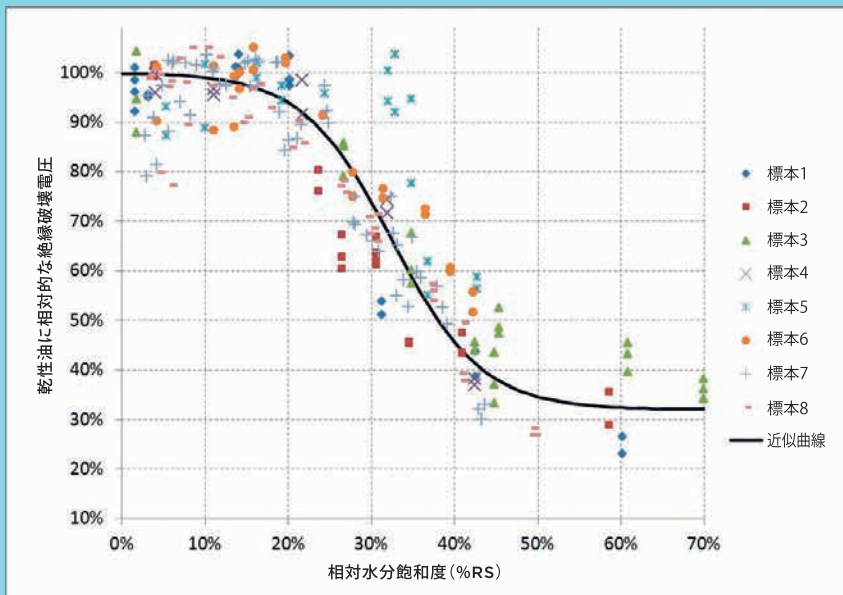


図2 絶縁破壊電圧の水分相対飽和度への依存性を計測した結果、およびそのデータに対応する近似曲線。それぞれの点は、IEC 60156基準に従って実行された6回の絶縁破壊電圧計測の平均を示す。

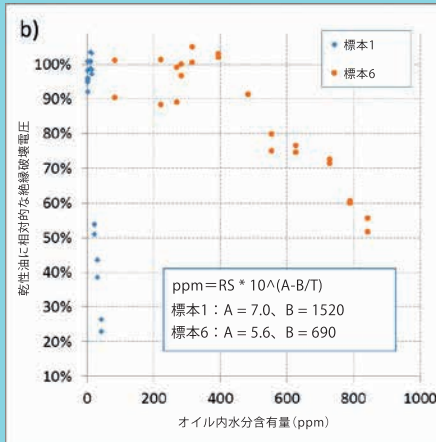
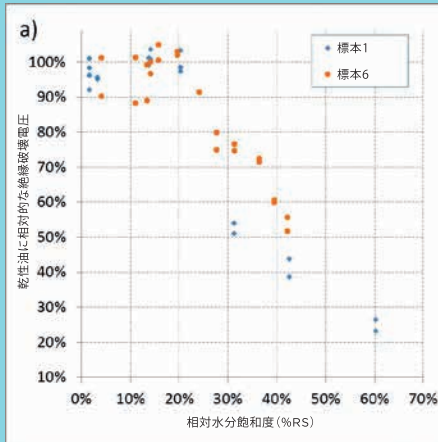


図3 相対水分飽和度(a)とppm水分含有量(b)に対する絶縁破壊電圧の依存性の比較。オイル標本1は典型的な鉱油で、オイル標本6は非常に水溶性の高い合成エステルベースのオイル。それぞれのオイル標本の溶解度係数は挿入図に示す。

相対水分飽和度が20%未満の場合は、絶縁破壊電圧がほとんど変化しないことが分かります。20%を超えると急激に低下します。

数にも影響を受けるためです[7]。図3では、大きく異なる水溶性をもつ2種のオイル標本に対する相対飽和度とppmの違いを示しています。両標本のppm計算に必要な2つの溶解度係数は、参考文献[8]に従って電量滴定と温度差から算出しました。図3の比較によると、絶縁破壊電圧に関しては、ppmよりも飽和度に相対的な水分の計測の方が有益です。このことは参考文献[3、4]でも報告されています。

通常の変圧器の定期メンテナンスでは、オイル標本を試験室での分析用として例えば2年ごとに採取してモニタリングしています。しかし、セルロース分解のよう

な緩慢な水分量変化過程に加え、変圧器の負荷や周囲温度の変化によって絶縁油の水分レベルがかなり短期変動することが報告されています[9]。相対水分飽和度の変化は、オイルと絶縁セルロースの間の水分移動や水溶性の温度依存によって起こることもあります。上記の絶縁破壊電圧の結果によると、絶縁破壊電圧は変圧器の運転中に変動することが分かります。このことは参考文献[10]でも指摘されています。絶縁破壊電圧の水分量に伴う短期変動が分かれば、変圧器の運転やメンテナンスに活用することができます。このことは、相対水分飽和度のオンライン計測で達成可能です。

### 結論

絶縁油の絶縁破壊電圧に対する水分量の影響を新しいオイルと酸化処理済みオイルの両方を含む8セットの標本で調べました。水分量を相対飽和度で表すと、試験した全てのオイルで非常に類似した結果が得られました。水分飽和度が20%未満の場合、絶縁破壊電圧は高い

ままですが、20%以上では水分の相対飽和度が増大すると大きく低下します。絶縁破壊電圧を水分変化から推定するために、データに一致する近似曲線を作成しました。これは、オンライン水分計測では特に有効と考えられ、絶縁破壊電圧の短期変動の検出やトレンドの信頼できるモニタリングを可能にし、さらに不適切なオイル採取に起因する計測誤差をなくすることができます。

## 参考文献

- [1] IEC 60156 International Standard, Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method, Second edition, International Electrotechnical Commission, 1995
- [2] IEC 60422 International Standard, Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance, Third edition, International Electrotechnical Commission, 2005
- [3] CIGRE 349, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, CIGRE working group A2.30, 2008
- [4] M. Koch, M. Fischer, S. Tenbohlen, The breakdown voltage of insulation oil under the influences of humidity, acidity, particles and pressure, International Conference APTADM, 2007, Wroclaw, Poland
- [5] P. J. Griffin, Water in transformers – so what!, National Grid Conference on Condition Monitoring in High Voltage Substations, Dorling, 1995
- [6] E. Gockenbach, H. Borsi, Performance and new application of ester liquids, Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids, 2002, Graz, Austria
- [7] T. Gradnik, M. Koncan-Gradnik, N. Petric, N. Muc, Experimental evaluation of water content determination in transformer oil by moisture sensor, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2011, Trondheim, Norway
- [8] Vaisala MMT330 User Guide, retrieved from [www.vaisala.com](http://www.vaisala.com)
- [9] C. Feely, Transformer moisture monitoring and dehydration – Powercor experience, TechCon Asia-Pacific, 2006, Sydney, Australia
- [10] B. Buerschaper, O. Kleboth-Lugova and T. Leibfried, The electrical strength of transformer oil in a transformerboard-oil system during moisture non-equilibrium

**VAISALA**

[www.vaisala.co.jp](http://www.vaisala.co.jp)

詳細は以下よりお問い合わせください。  
[www.vaisala.co.jp/contact](http://www.vaisala.co.jp/contact)

Ref. B211282JA-A ©Vaisala 2014

本カタログに掲載される情報は、ヴァイサラと協力会社の著作権法、各種条約及びその他の法律で保護されています。私的使用その他法律によって明示的に認められる範囲を超えて、これらの情報を使用（複製、送信、頒布、保管等を含む）をすることは、事前に当社の文書による許諾がないかぎり、禁止します。仕様は予告なく変更されることがあります。

