不平等電界下における変圧器油の直流破壊電圧に 及ぼす円筒側壁の効果

正員 高嶋 武 (金沢大)
正員 花岡良一 (金沢工大)
正員 香林利幸 (金沢工大)
正員 作田忠裕 (金沢大)

The Effect of a Cylindrical Side Wall on DC Breakdown Voltage in Transformer Oil under Non-uniform Electric Field

Takeshi Takashima, Member, (Kanazawa University)

Ryoichi Hanaoka, Member, Toshiyuki Kohrin, Member, (Kanazawa Institute of Technology)

Tadahiro Sakuta, Member, (Kanazawa University)

The effect of a cylindrical side wall on the current-voltage (I - V) characteristic and the dc breakdown voltage were investigated using a positive needle-to-plane electrode geometry in transformer oil. Linear plots of V vs. $I^{1/2}$ were obtained for the geometries with and without the side wall. Conduction currents decreased by the presence of the side wall, and the slope of linear plots changed when V and I exceeded their critical values. The breakdown voltage increased for gaps with the side wall. These are discussed on the bases of the generation of turbulence flow and the space charge effect on the electric field strength at the needle tip.

キーワード: 変圧器油、針-平板電極系、円筒側壁、乱流、電流-電圧特性、絶縁破壊電圧

1. まえがき

変圧器、コンデンサ、開閉器など各種電力機器の電気絶縁構成に絶縁性液体と固体絶縁物を併用した複合系を用いる場合が非常に多い。これらの絶縁系の電気的特性は機器性能の信頼性を左右するため、その評価は絶縁媒体中で起こり得る基礎現象を十分に理解した上で成すことが要求される。このような工業的重要性から、複合絶縁系における放電現象は、これまでに多数の研究者によって検討されてきた。インパルス高電圧の印加に伴う現象として、液体/固体界面に発生する沿面放電現象を超高速度カメラで捕えた時間分解写真より詳細な検討が成されている^{(1)~(3)}。また、直流高電圧が印加された絶縁性液体の破壊現象は、電気伝導や部分放電などの前駆現象を伴うため、破壊過程はこれら双方から考察されている。電気伝導に関しては、荷電粒子生成機構^{(4)~(6)}、電気流体力学的 (EHD) 流動を考慮した解析^{(7)~(9)}などが成され、部分放電に関しては、放電パルス検出法の開発による破壊予測^{(10)~(12)}などが成されている。一般に、不平等電界下における絶縁油中の直流破壊電圧には極性効果が存在する^{(9), (13)}。すなわち、破壊電圧は一般的

には正極性の方が負極性より低いため、油入機器絶縁の設計は正極性の破壊現象を重要視して考える必要があると思われる。このような不平等電界下の絶縁破壊電圧を上昇させる一つの方法として隔壁の効果の研究され、隔壁の挿入位置や帯電電荷によるギャップ間電界分布の変化などから検討されている^{(14)~(16)}。この場合、隔壁はギャップ間の電極軸と垂直な位置 (例えば、針-平板電極系では平板電極と平行な位置) に挿入する場合がほとんどであり、電極軸と平行な位置に挿入した側壁の影響を詳細に検討した報告は比較的少ない⁽¹⁷⁾。

本論文は、前述の極性効果により低い破壊電圧を有する正極性破壊現象に着目して、その側壁効果を調べたものである。すなわち、変圧器油中に針-平板電極系を設置し、針電極に正の直流高電圧を印加した場合の電気伝導特性と破壊現象について、電極軸の周囲に挿入した円筒状の固体側壁の効果を詳細に検討した。その結果、側壁の挿入は、伝導電流を減少させ、破壊電圧を上昇させる効果のあることが分かった。この現象は、破壊に至るまでの伝導領域において生じるEHD流動が、側壁の存在によって乱流を引き起こしやすくなることと関連して定性的に考察された。

得られた結果は、電力機器の有効な絶縁設計に一つの指標を与えるものと思われるのでここに報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。口径 $1\text{ }\mu\text{m}$ のガラスフィルターを用いてろ過された変圧器油 (JIS C-2320, 1種2号) が、シールドされたガラス製の試験容器に満たされた。変圧器油はできるだけ水分を除去するため、吸湿剤を導入したデシケータ内に2日間、吸湿保存したものを使用した。従って、供試変圧器油の体積抵抗率 ρ_v や比誘電率 ϵ_s は、標準規格値の $\rho_v = 10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 、 $\epsilon_s = 2.2$ (60Hz) をほぼ維持するものと見なされる。針-平板電極系が実験に使用された。針電極は直径0.5mmの白金線から成り、針端の曲率半径は約 $25\text{ }\mu\text{m}$ に統一した。平板電極は、直径45mmのステンレススチール製円盤 (Rogowski 型) から成り、その表面は鏡面状に研磨されている。また、ギャップ長 d は4mmに設定した。電極軸周囲の固体側壁が電気伝導特性と破壊電圧に及ぼす影響を調べる目的で、硬質塩化ビニルパイプが針電極に対して同軸状となる位置の平板上に密着して固定された。この円筒側壁の最大内径は28.0mm、及び最大高さは50.0mmであり、その範囲内のサイズ (内径 D 、及び高さ H) を持つ種々の側壁を用いて特性を調べた。一般に、硬質塩化ビニルは高電圧機器の電気絶縁材料としては用いられていないが、その体積抵抗率 ρ_v は約 $10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ を有し、変圧器油のそれより約1桁大きい。この側壁が針先端近傍の電界強度に及ぼす影響を調べる為に、 $D=12\text{mm}$ 、 $H=40\text{mm}$ 、および厚さ2mmの側壁モデルを用いて、差分法による数値計算を行った結果、電界強度は側壁の存在によって約8%減少することが分かった。このモデルの D は本実験で用いた最小値以下であるので、側壁による電界強度の減少率は8%以下であると言える。すなわち、針電極付近の電界強度は、固体側壁の存在によって殆ど影響されないものと判断される。

図1. 実験装置の概略図

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.

これらの電極系が試験容器内の変圧器油中に浸された後、正の直流高電圧が針電極に印加された。電圧 V をゆっくりと上昇 (約 1 kV/min.) したときにギャップ間を流れる伝導電流 I は、平板電極側に接続された高感度直流電圧電流計 (東亜電波工業製、PM-18R) により測定され、ギャップ間が全路破壊に至った時の電圧 V_B を破壊電圧として記録した。なお、針電極は一回の破壊ごとに交換し、同じ条件の下で約15回の測定を繰り返して行い、これらの実験データの平均値をもって特性をプロットすることとした。全ての特性に対して、伝導電流と破壊電圧のばらつきは、それぞれ $\pm 4\%$ と $\pm 10\%$ の範囲内であった。

伝導電流を測定している際に、円筒側壁の内部には非常に激しいEHD流動が肉眼でも確認された。そこで、ギャップ間に生じられる流動の流速を電流の測定と並行して測定した。流速測定には Laser Doppler 流速計 (LDV) が使用された。LDVの構成と測定方法は前報^{(9), (13)}と同様であり、トレーサ粒子の密度を極力小さくした。この場合、側壁にはレーザービームを通過させるための小さな穴 (約 $1\text{mm}\phi$) が開けられるが、これが流動パターンや伝導特性などに大きな影響を与えるとは考えにくい。なお、高い印加電圧の下で生じる流動は、ほとんど乱流状態となることがシュリーレン法による流動パターンの観測⁽⁹⁾から確認された。ここで得られる流速のデータは、LDVの原理から電極軸方向の速度成分を表すことになる。

3. 実験結果および考察

<3.1> 電気伝導特性とEHD流動 絶縁性液体に直流不平等高電界が印加された場合の破壊前駆現象として、電気伝導とそれに伴うEHD流動が常に生じる。従って、これらは破壊現象のメカニズムに密接な影響を及ぼすことが予想されるため、前駆現象をよく理解する必要がある。

(1) 側壁の無い場合 (変圧器油のみの場合)

始めに絶縁性液体の電気伝導特性とEHD流動との関連について述べる。変圧器油中の針-平板電極系における電気伝導特性には、 $V \propto I^{1/2}$ の関係が存在することはよく知られている^{(4)-(6), (8), (9), (13), (18)}。針電極に負の直流高電圧が印加された場合において、電圧と電流がある値に達した後、電圧の上昇と共に上記の線形関係の傾きがわずかに変化する。すなわち、電圧の上昇に対する電流の増加割合が減少する。これは、荷電粒子の流れによって生じられるEHD流動が層流から乱流に移行し、流体力学的抵抗が増加することによるものとして考察されている⁽⁹⁾。一方、針電極に正の直流高電圧が印加された場合には、線形関係の傾きに変化する現象は見られない。これは、正針の方が負針よりも破壊電圧 V_B が低い (例えば、 $d=4\text{mm}$ の V_B について、正針は負針の約0.4倍である) ため、線形関係の傾きに変化する前に破壊現象が起こってしまうからである。この場合、破壊前の伝導領域における流動は層流であるが、もし何ら

図2. V と $I^{1/2}$ の関係

Fig.2 Relationships between V and $I^{1/2}$.

かの原因（以下の（2）で示す側壁の設置はその一例である）で乱流が引き起こされるなら、線形関係の傾きは負極性の場合と同様に変化することが予想される。

（2）電極軸周囲に側壁が存在する場合

図2(a)、(b)は、針電極周囲に円筒側壁を持つ系において、針電極に正電圧を印加した場合の V と $I^{1/2}$ の関係を示す。同図の特性には、側壁の有無に関わらず V と $I^{1/2}$ の線形関係が存在する。しかし、側壁を持つ場合の特性は、電圧値と電流値がある値に達したとき直線の傾きが変化し、その後は電圧の上昇に対する電流の増加割合が減少する。また、図(a)では側壁の高さ H が高くなる程、及び図(b)では側壁の直径 D が小さくなる程、一定電圧値に対する電流値は減少している。更に、本実験で使用した側壁サイズに対して、直線の傾きが変化する点（図中の一点鎖線）における入力 I ($V - V_0$)（ここで、 V_0 は直線を外挿したときの切片に相当

する電圧である）を調べると、各特性共に約2.0mWであり、ほぼ一定値となる。これは、一定の入力が液体に加わったとき、流動が層流から乱流に移行することを示している。

以上に示されるように側壁が存在すると、電圧値と電流値がある値以上で直線の傾きが変化する。すなわち、層流から乱流への移行が容易になる。これは、次のように説明される。針—平板電極系の針電極に正の電圧が印加された場合の電流は、針先端の高電界領域における不純物分子、または液体分子の電界電離によって生じた正イオンに基づくものと考えられる。正イオンはギャップ間の電界からクーロン力を受けて平板方向に流れ、その際、液体分子にエネルギーを与えつつ進行する。従って、針から平板方向へ向かう液体の流動が生じる。平板に到達した流れは放射状に分かれ平板沿いに進行した後、三次元の回転流となる。本研究の場合、電極軸からある距離に平板と直交して側壁が存在するため、平板沿いに進行した流れは側壁に到達し、直角に方向転換を強いられた後、側壁に沿って進行する。Reynolds 数の小さな速度範囲ではこれらの流れは層流であるが、側壁と平板との直交点は流れの”淀み点”となり速度は零である。また、壁面の流速は零であり、壁の表面付近の狭い領域には速度勾配の大きい流れの境界層領域が存在する。そのため、流れの方向に摩擦応力が働き、流体力学的抵抗が増加し、流速は低下する。更に電圧を上昇し、

図3. 淀み点付近に発生する渦の代表例
(Φ : 流れ関数、実線は流線を表す)

Fig.3 Typical example of eddy generated near stagnation point.

(Φ : stream function, Solid lines: streamlines)

速度が徐々に上昇すると、淀み点付近に渦が発生する。この渦は系全体を乱流に導く芽となる。淀み点付近の渦を明確に可視化することは非常に困難であるが、渦の有無を数値計算から立証することができる。計算の手法は基本的に既報⁽⁸⁾と同様であり、Navier-Stokesの方程式と連続の式から風上差分法を用いて流線を導出する方法であるが、この場合の計算は渦を明確化するために、差分メッシュの間隔を出来るだけ小さく選ぶ必要がある。本計算ではメッシュ間隔を0.02mmとした。図3は淀み点付近に発生する渦の代表例 ($D=13.5\text{mm}$ 、 $H=10.5\text{mm}$ の側壁の場合) を示す。このような渦の発生に関して、河村⁽¹⁹⁾、Ghiaら⁽²⁰⁾もまた、同様な数値計算法を用いて渦の存在を明らかにしている。彼らは立方体中の二次元定常流を扱い、上側の面上に一定の流速を与え、他の三面以上では流速0を条件として計算し、立方体角の淀み点付近に渦が発生することを示した。

淀み点付近に渦が一旦発生すると、その運動は流体運動の不安定性によって、より小さな渦に壊され色々なスケールの運動が生み出されるが、渦の持つ運動エネルギーは流体力学の運動法則によって保存される。渦層はエネルギー

図4. U と $I/(V-V_0)$ の関係

Fig.4 Relationship between U and $I/(V-V_0)$.

のカスケード的伝達機構に従って、多くの細かい渦に分裂する。この機構は永続的に起こり、渦領域はどんどん拡張されて大小さまざまな渦が領域全体におよぶ。Kolmogoroffの仮説^{(21)~(23)}によると、小さな渦は多くのカスケード的分裂を経て作られるので、その統計的性質、例えば高波数領域におけるエネルギースペクトルは乱流の種類によらず普遍的である。このように系全体に及んだ乱流状態では、流体力学的抵抗が益々増加し、巨視的な流速は更に低下する傾向を示すこととなる。

図4は本実験から得られた流速 U の測定結果を示す。同図の U は、 V が10~22kVの範囲において電極軸上のギャップ中間位置(平板から2mmの位置)で測定された値であり、コンダクタンスの次元を持つ電流と電圧の比 $G(=I/(V-V_0))$ に対してプロットされた。側壁が存在する場合の流速は、いずれも G が約 $8 \times 10^{-12} \text{ A/V}$ 以上の範囲で飽和傾向を示している。すなわち、この範囲では乱流が発生し流速の上昇を抑制するため、側壁のない場合と比べて流速は低下する。側壁が存在する場合には、流速の低下と連結して一定電圧に対する電流値が減少する(図2)ことから、液体のコンダクタンスは見掛け上減少したこととなる。

<3.2> 絶縁破壊電圧 針-平板電極系の絶縁破壊現象は、針端の高電界領域において液体の低密度領域(液体と気体の混在した状態)が形成され、その中で生じる部分放電が破壊の引き金となる場合が多い。部分放電の発生は針端の電界強度に依存する。針電極に正の電圧が印加された場合の電気伝導が、電界電離に基づく正イオンによるとすれば、針端の電界強度はギャップ間の正電荷による空間電荷効果によって低下する。これは、Kerr効果を利用した電界測定から確かめられている⁽²⁴⁾。本研究において、前述したように、側壁の存在は流速を低減させる効果を持つ。これに加えて、乱流の発生はその効果を更に助長する。これはまた、ギャップ間の空間電荷密度を増加させ、針端の電界強度に及ぼす空間電荷効果を強めることとなる。その結果、針端電界強度は低下し、針端の部分放電開始電圧は上昇する。これが、破壊電圧の上昇を導くものと考えられる。ところで、実験遂行時に行った肉眼による観測結果によれば、側壁の有無に関わらず部分放電は針端で発生し、ギャップ間の全路破壊は部分放電が発生した後、電圧を約

図5. H と ΔV_B の関係

Fig.5 Relationship between H and ΔV_B .

2～3 kV上昇したとき常にかかることが確認された。部分放電の発生は、針端の電界強度に左右されるものであり、破壊電圧値を決定づけるものではない。

図5は、側壁の高さに対する破壊電圧上昇率 ΔV_B を示す。ここで、破壊電圧上昇率とは、側壁を持つ場合の破壊電圧が、側壁の無い場合の何%に相当するかを示す。同図において、 ΔV_B は側壁の直径 D が小さいほど大きくなる。これは、半径が大きい側壁に比べて小さい側壁の内部で、針端の電界強度に及ぼす空間電荷効果が大きいことを示している。また、側壁の高さ H がほぼ20mm以上において、 ΔV_B は飽和傾向を示している。これは、側壁内部の乱流現象に伴って、針端の電界強度に及ぼす空間電荷効果が、高さ20mm以下の範囲の側壁内部領域に限定されることを示している。

4. まとめ

変圧器油中に針-平板電極系を設置し、電極軸周囲に挿入した円筒状の固体側壁が電気伝導特性と破壊電圧に及ぼす影響を研究した。本論文では特に、破壊電圧値の低い正極性の針について調べた。得られた結果は以下のように要約される。

(1) 伝導電流 I と印加電圧 V の関係は、挿入した側壁の有無に関わらず、 $V \propto I^{1/2}$ の関係が存在する。しかし、側壁を持たない場合の特性以外は全て、ある電圧値と電流値に達したとき直線の傾きが変化し、その後は電圧の上昇とともに電流の増加割合が減少する。また、側壁の高さが高く、直径が小さくなる程、一定電圧値に対する電流値は減少する。

(2) 上記の伝導特性における直線傾きの変化は、EHD流動が層流から乱流に移行するためと考えられる。側壁の挿入は乱流を引き起こしやすくし、これによって流体力学的抵抗が上昇するため、流速は低下することが分かった。

(3) 側壁の挿入によって破壊電圧は上昇する。側壁の挿入による乱流の発生、及びこれによる流速の低下は、針端の電界強度に及ぼす空間電荷効果を強め、針端電界強度を低下させるため、破壊電圧は上昇するものと考えられる。

終わりに、本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受けて行われたことを記し謝意を表す。

(平成10年4月23日受付、平成10年9月11日再受付)

文 献

- (1) 中尾、伊藤、岡、山形、酒井、田頭: "緩波頭インパルス電圧印加時の油中沿面放電の進展", 電学論A, 110巻、12号、pp. 874-880 (平成2年)
- (2) H. Okubo, M. Ikeda, M. Honda and S. Yanabu: "Creepage Discharge Propagation in Transformer Oil with Impulse Voltages", 4th ISH, 24.04 (1983)
- (3) S. Ohgaki and Y. Tsunoda: "Study of Positive Streamer Growth under Surface Discharge Configuration in Liquid Paraffin", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. EI-19, No. 6, pp. 594-601 (1984)
- (4) B. Halpern and R. Gomer: "Field Emission in Liquids", J. Chem. Phys., Vol. 51, No. 3, pp. 1031-1047 (1969)
- (5) B. Halpern and R. Gomer: "Field Ionization in Liquids", J. Chem. Phys., Vol. 51, No. 3, pp. 1048-1056 (1969)
- (6) W. F. Schmidt and W. Schnabel: "Electron Injection into Dielectric Liquids by Field Emission", Ber. Bunsen-Ges. Physik, Chemie, Vol. 75, pp. 654-658 (1971)
- (7) P. Atten and M. Haidara: "Electrical Conduction and EHD Motion of Dielectric Liquids in a Blade-Plane Electrode Assembly", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 20, No. 2, pp. 187-198 (1985)
- (8) T. Takashima, R. Hanaoka, R. Ishibashi and A. Ohtsubo: "I-V Characteristics and Liquid Motion in Needle-to-Plane and Razor Blade-to-Plane Configurations in Transformer Oil and Liquid Nitrogen", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 23, No. 4, pp. 645-658 (1988)
- (9) R. Hanaoka, R. Ishibashi and M. Kasama: "Relationships of Current and Voltage in Transformer Oil Accompanied with EHD Motion under Negative DC Stresses", Trans. IEE of Japan, 113-A, No. 2, pp. 113-120 (1993)
- (10) R. Meunier and G. H. Vaillancourt: "Propagation Behaviour of Acoustic Partial Discharge Signals in Oil-Filled Transformers", Proceedings of 12th ICDL, pp. 401-404 (1996)
- (11) R. Bartnikas and I. d'Ombra: "A Method for Determining the Dissipation Factor Value from Corona intensity and Pulse Count", IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-82, p. 366 (1963)
- (12) M. Pompili, C. Mazzetti and R. Bartnikas: "Simultaneous Measurements of PD in Oil using Conventional Narrow Band and Ultra Wide Band Detection Systems", Proceedings of 12th ICDL, pp. 185-188 (1996)
- (13) R. Hanaoka, R. Ishibashi and M. Kasama: "Positive Breakdown Mechanism in Transformer Oil Subjected to a Non-Uniform DC Field", Trans. IEE of Japan, Vol. 113-A, No. 7, pp. 518-525 (1993)
- (14) A. Beroual & A. Zouaghi: "Barrier Effect on the Pre-breakdown and Breakdown Phenomena in Long Oil Gaps", Proceedings of 12th ICDL, pp. 300-303 (1996)
- (15) U. Gafvert, L. Wallfridsson & A. Jaksts: "Angularly Resolved Field Mapping in Transformer Oil", Proceedings of 3th ICPADM, p. 298 (1991)
- (16) I. Argirakis, T. Zinoulis, W. G. Chadband and D. W. Auckland: "A Study of the Interaction of the Negative Liquid Discharge with a Solid Insulating Sheet", Proceedings of 12th ICDL, pp. 292-295 (1996)

- (17) N. N. Bunni and P. B. McGrath: "Computer Analysis and Observation of Streamer Growth at a Dielectric Interface", IEEE Trans. Dielect. and Elect. Insul., Vol. 3, No. 1, pp. 136-143 (1996)
- (18) H. Yamashita and H. Amano: "The Effect of Space Charge on dc Conduction and Light Emission in Dielectric Liquids under Nonuniform Field", IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 20, pp. 159-165 (1985)
- (19) 河村、岩津: "高レイノルズ数流れの直接数値シミュレーション、「乱流現象の解明と制御」", 理論系4班合同研究会報告集, pp. 25-34 (1984)
- (20) U. Ghia, K. N. Ghia and C. T. Shin: "High-resolutions for Incompressible Flow using the Navier-Stokes Equations and a multigrid method", J. Comput. Phys., Vol. 48, pp. 387-411 (1982)
- (21) A. Kolmogoroff: "The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds", C. R. Acad. Sci. U.R.S.S., Vol. 30, pp. 301-305 (1941)
- (22) A. Kolmogoroff: "Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence", C. R. Acad. Sci. U.R.S.S., Vol. 32, pp. 16-18 (1941)
- (23) W. D. McComb: The Physics of Fluid Turbulence, Clarendon Press, Oxford, 70 (1990)
- (24) M. Zahn and R. Hanaoka: "Kerr Electro-Optic Field Mapping Measurements using Point-Plane Electrodes", Supplement a la Revue "Le Vide: science, technique et applications", No. 275, Mars, pp. 360-372 (1995)

高嶋 武

(正員) 1937年4月10日生まれ。1961年3月金沢大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。1963年9月金沢大学工学部電気工学科助手、同講師、助教授を経て、1985年4月同電気・情報工学科教授、現在に至る。主として、電界計算法、絶縁液体、接地に関する研究に従事。工学博士。

電気設備学会、IEEE会員。

花岡 良一

(正員) 1950年1月12日生まれ。1980年3月金沢大学大学院工学研究科修士課程修了。1988年4月金沢工業大学電気工学科講師、89年同助教授、96年同教授、現在に至る。主として、液体誘電体中の電気伝導と絶縁破壊、沿面放電現象、及び電界計算法に関する研究に従事。1993年9月～94年8月米国MIT客員研究員。工学博士。応用物理学学会会員、IEEE会員。

香林 利幸

(正員) 1971年2月1日生まれ。1993年3月金沢工業大学電気工学科卒業。98年4月同大学大学院工学研究科博士課程修了。主として、液体誘電体中の電気伝導と沿面放電現象に関する研究に従事。工学博士。静電気学会会員。

作田 忠裕

(正員) 1950年1月3日生まれ。1980年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月同大学工学部助手。1988年4月金沢大学工学部電気・情報工学科助教授、94年1月同教授、現在に至る。主として、高気圧熱プラズマアークの診断、応用の研究に従事。工学博士。応用物理学学会、IEEE会員。