油中放電図形と沿面放電に対する 細溝の効果

武蔵工業大学

岸 田 治 夫

武蔵工業大学

佐 藤 禎

武蔵工業大学

鳥 山 四 男

1. ま え が き

絶縁油中にある固体絶縁物の表面で発生する沿面放電の性質は、主として写真乾板によるリヒテンベルグ図形と、混合粉体を用いる電荷図形(Dust figure)⁽¹⁾⁽²⁾により研究されてきたが、これらは気体中の沿面放電の場合に比べて手法上かなり難点がある。すなわち、リヒテンベルグ図形においては、現像を行なう前に暗箱中において乾板に粘着した絶縁油を洗い落さなければならぬし、図形から極性差を読みとるのも困難である。一方、電荷図法は放電電荷の分布の極性を粉体の色によって知りえるという利点はあるが、粉体を散布した後に絶縁板をガソリンなどで洗浄しなければ図形が得られず、図形を得る作業に相当熟練を要するという欠点がある。

ところが最近、電子写真技術の発達、特に電子複写機が急速に普及し、それに使用される液体現像液(トナ)も電荷に対する付着性、解像力が改良されてきた。著者らは、この現像液を利用し、簡単な操作で油中放電図形を得ることができたので、本論文では、この手法を用いて得られた残留電荷の図形により沿面放電の機構を説明し、さらに絶縁板上に細溝(slot)を設けると、沿面放電の進展を阻止する効果があることがわかったので、本論文においてこの効果に対する検討を行ない、問題の提起をする。

2. 原理および方法

放電図形は絶縁板上に電荷が残留するとき現われる。電荷の残留は絶縁板と液体絶縁物の比誘電率および絶縁抵抗により決定される。すなわち、絶縁板の比誘電率が絶縁油のそれより大であり、かつ絶縁板と絶縁油の絶縁抵抗がともに大きければ放電図形が得られる。

実験方法は絶縁油中に針対平板電極を配置し、両電極間に絶縁板(厚さ3mmのベークライト)をそう入して針電極側に標準インパルス電圧を印加した。絶縁油としては変圧器油(2号)を用い、ガラスフィルタ(G3)による真空ろ過処理のみを行なった。放電図形の現像方法の種類および過程は次のとおりである。

(1) 正電圧を印加した場合は負極性トナを用い、負電圧印加の場合には正極性トナを用いた。(以下、この現像法を順現像と呼ぶ)これに対して、印加電圧の極性と同極性のトナによる現像をも行なった。(以下、これを逆現像と呼ぶ)

(2) 電圧を印加した後、絶縁板を油中より取り出して放電面に現像液を滴下するか、あるいは現像液中に絶縁板を浸せきする。この場合の現像時間は約20秒である。

(3) 現像を行なったのち石油系溶剤で洗浄すると、板に付着した余分なトナが取り除かれ図形が現われる。これらの作業に暗室操作は全く不要である。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 残留電荷と極性 正図形と負図形の差異は、第1図および第2図より明らかなように、順現像をして得られた正図形においては負極性のトナが付着

The Discharge Figures in Insulating Oil and the Effect of a Slot on Surface Discharge in Oil. By H. KISHIDA, Member, T. SATO, Member & Y. TORIYAMA, Member (Department of Electrical Engineering, Musashi Institute of Technology).

岸田治夫: 正員, 武蔵工業大学電気工学科
佐藤 禎: 正員, 武蔵工業大学電気工学科
鳥山四男: 正員, 武蔵工業大学電気工学科

第 1 図 順現象による残留正電荷の図形
(正インパルス 60kV)

Fig. 1. Figure of positive residual charge by the forward development. (Positive impulse 60kV)

第 2 図 順現象による残留負電荷の図形
(負インパルス 60kV)

Fig. 2. Figure of negative residual charge by the forward development. (Negative impulse 60kV)

するので、正電荷が残留し、その放電路の幅は負図形より細いことがわかる。一方、負図形においては放電の幹 (Stem) の部分には正極性のトナが付着していない。

これに対して逆現象をすると、印加電圧が低い場合の正図形ではほとんど図形が現れないが、負図形においては放電路の中央に負極性のトナによる細い筋状の図形が現れる。これは順現象をした負図形の正トナが付着しなかった幹の部分に対応しているので、その部分には正電荷が残留していることがわかる。印加電圧が高い場合には、正負両放電ともに残留表面電荷による逆放電 (Back discharge) の図形が中心部に現れるのが、第 3 図および第 4 図において観察される。逆現象をした正図形において、逆放電の図形以外

第 3 図 逆現象による正電圧印加時の残留
負電荷の図形 (インパルス 100kV)

Fig. 3. Figure of negative residual charge by the reverse development on applying positive voltage. (Impulse 100kV)

第 4 図 逆現象による負電圧印加時の残留
正電荷の図形 (インパルス 100kV)

Fig. 4. Figure of positive residual charge by the reverse development on applying negative voltage. (Impulse 100kV)

に負電荷の存在が認められるが、これは電子が油分子に付着して負イオンが形成されることを示している。

固体表面で生ずる沿面放電は正針、負針ともに電子の衝突電離により開始されるが、正針の場合は電離により生じた電子は針電極の方向に進み、正イオンは放電の跡に正表面電荷を形成し、これが放電先端の電界を大にする。負針の場合、電子は針と反対方向に進み、残された正電荷は先端の電界を弱めるが、針付近の電界を強化するので針からの電子の放出が助長され、放電が維持される。この機構は気中放電について確かめられているが、⁽³⁾ 油中放電についてはまだ確かな実験結果が得られていないので、類推の域を脱しない。

〈3・2〉 本手法の特徴 液体現像液による油中放

電図形の方法を従来用いてきた混合粉体による方法と比較すると、長所としては、

(1) 現像作業が簡単である。

(2) トナが微粒子のため解像力のすぐれた図形が得られる。

短所としては、

(3) 正、負現像液がともに黒色のため、色による極性の識別が不可能である。

(4) 正負現像液を混合すると帯電が消失するので、放電により生じる正および負電荷の分布を同時に求めることができない。

4. 細溝の効果

従来より油中沿面放電の問題として、絶縁物表面における部分放電の進展性およびそれによる劣化に関する研究や、フラッシュオーバー特性を向上させるくふうが試みられている。たとえば、沿面フラッシュオーバー電圧を高める方法として、沿面距離を長くするためストリーマの進む方向に直角にバリヤを設置することが考えられている。⁽⁴⁾

沿面ストリーマが進展する場合は、正負放電ともに先端では電子の衝突電離が行なわれていると考えられるので、著者らは絶縁物表面に細いみぞがあると、そこを通過する電子のエネルギーが変化し、それによってフラッシュオーバー電圧の上昇をもたらすことができると期待した。

ストリーマ状放電が伸びている状態で、針電極からその先端までの電圧降下を無視し、ストリーマ先端の電界を考えてみる。しかし、ストリーマ先端の形状を正確にとらえることができず、その点での電界強度を求めることが困難なので、先端での電界とくに絶縁板と垂直方向に働く成分を巨視的にみて二つの成分に分けてみる。(第5図参照)

(1) 絶縁油と絶縁板との誘電率の差による力

この力は、絶縁油の誘電率を ϵ_1 、絶縁板の誘電率を ϵ_2 、電子の電荷を e 、電子が絶縁板表面から距離 a だけ離れた絶縁油中にあるとすれば、

$$F = -\frac{1}{4\pi} \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_1 (2a)^2} e^2$$

第5図 放電先端における垂直方向の力

Fig. 5. The forces perpendicular to the insulator at the tip of discharge.

で示される。⁽⁵⁾ したがって、通常の絶縁油、絶縁板の組合せでは $\epsilon_2 > \epsilon_1$ であるから、正および負放電において電子を板に引きつけるように作用する。

(2) 幾何学的電界による力 この力は正針の場合は電子を上方に反発するように作用し、負針の場合には電子を下方に引きつけるように作用する。

したがって、正針の場合は(1)項と(2)項の力は反対方向に作用し、負針の場合は(1)項と(2)項の力はともに電子を板に吸引するように作用する。

以上のことから針に負電圧を印加した場合、沿面放電は板に引きつけられつつ進展するが、正放電の場合はこの力は負の場合より弱いと考えられるので、細溝の効果に関して極性差のあることが予想される。

〈4・1〉 実験方法および結果 上記のことを確かめるため、第6図に示すように絶縁板表面に細溝を設けて沿面放電の進展の様子を放電図形を用いて調べた。絶縁板は前述の実験で用いたものと同じ厚さ(3mm)のベークライトで、細溝の幅は1, 2および5mm、深さはすべて1mmとした。針電極はみぞから5mmの位置に配置した。正および負放電を順現象した例を第7図(a), (b)に示した。

図形の形状は正負ともみぞのない平板の場合とおおよそ同じであるが、負図形においては放電の幹の部分はみぞに対し平行に伸びやすい傾向がみられる。(第7図(b))

正放電の場合は、みぞに対し直角方向のストリーマの伸びの長さ(放電図形の最大径)についてはほとんど影響がなく、みぞの縁(Edge)の効果もほとんど認められない。しかし、みぞの幅を大にすると印加電圧が低い場合には多少影響がある。⁽⁶⁾

負放電の場合は、沿面ストリーマの進展に対する影響だけでなく、みぞの縁の効果もある。ストリーマが縁に達すると正の場合のようにみぞを渡らないで、みぞと平行な方向に進展する。

〈4・2〉 結果の検討 細溝の影響は正負放電において著しい極性効果があり、負放電に対する効果が大きいので、ここでは負放電の場合について考察する。

第6図 細溝のある試料板

Fig. 6. The sample plate having a slot.

(a) 正極性放電 (70 kV)

(b) 負極性放電 (70 kV)

第 7 図 細溝に対する沿面放電の極性効果
Fig. 7. The polarity effect of surface discharge on a slot.

第 8 図 印加電圧と放電図形の伸びの関係
(負極性インパルス)

Fig. 8. Relation between applied voltage and extent of discharge figure. (Negative impulse)

第 8 図は細溝を設けた試料板と同じ厚さの板を用いて、みぞをつけない場合の印加電圧と図形の最大径の関係を示している。細溝がある試料板では負放電の進展はみぞで阻止されるが、みぞと平行なストリーマの伸びが大となり、放電の広がり面積はみぞがない場合とほぼ等しくなる。したがって、みぞと平行方向におけるフラッシュオーバー電圧が低下することになる。

絶縁板表面にみぞがあると電界のひずみが著しく、かつ静電界の計算をしても、この場合は細溝の効果を電界強度によって評価することは困難である。みぞ自

第 9 図 負放電に対する細溝の効果

Fig. 9. Effect of slot on the negative discharge.

体のもつ沿面フラッシュオーバー上の効果を示したものが第 9 図である。これよりみぞの幅の効果がわかる。

次に細溝の効果を沿面距離の面から検討するため、第 10 図(a)に示すような試料を用い、その上段の面に針電極を配置してインパルス電圧を印加した。正放電は沿面距離に関係なくストリーマが進展して段をおりるが、負放電は沿面距離の影響を受ける。平板上の放電図形において、その大きさが、ちょうど第 10 図(a)の上側の板の面積に相当する電圧を考えておく。しかるに、第 10 図(a)の場合、その値よりも相当高い印加電圧を加えても、図形が上段のバックライト板から下段まで進展することがない。たとえば、沿面距離が 10 mm のとき放電が下段の面まで伸びる臨界電圧は 66.6 kV であり、これを第 8 図の電圧-伸び特性より算定すると 31.6 kV だけ過電圧がかけられたことになり、印加電圧にして約 50% 増の効果があつた。負極性ストリーマの進展が停止する例を第 11 図に示す。

さらに、ストリーマの先端がみぞの縁に達したときに、みぞの壁面の傾斜角の影響があることが予想されるので、第 10 図(b)のような試料を用いて実験した結果、傾斜角が小さいときは放電は壁面を下がって進展するが、90 度に近づくと壁面を下がることできない。(第 12 図) 正放電の場合はやはりこの効果はなく、いずれにしても放電は先まで進展する。

(a) 段のある試料板
(a) The sample plate having a stair.
(b) 傾斜面のある試料板
(b) The sample plate having inclines.

第 10 図

Fig. 10.

第 11 図 負放電に対する進展阻止効果(80kV)
Fig. 11. Bloking effect on negative discharge.

第 12 図 負放電に対する縁の角度の影響(80kV)
Fig. 12. Influence of the angle of edge
on negative discharge.

以上の現象について要約すれば次のようである。

正極性沿面放電においては、電子の衝突電離により生じた正電荷は空間電荷として作用して先端の電界を強化するので、細溝の縁端部にストリーマが到達し、その方向が変化しても先端の電界強度はほとんど変化しないと考えられる。したがって、細溝の効果はほとんどなく油中放電が進む。これに対して負極性放電の

場合は、電子の衝突電離によって生じた正電荷は先端の電界を弱める作用をする。したがって、絶縁物の材料および幾何学的配列によって定まる巨視的な電界が放電先端においても大きな効果をもつ。ゆえに、細溝の部分で放電の方向が変化して、その方向における電界が小になれば電子による衝突電離が生じなくなり、放電の進展が停止すると考えられる。

5. あとがき

油中沿面放電の様相を調べる新しい手法として、電子写真の液体现像液を用いる放電図形の方法を紹介し、この手法を用いて、油中沿面放電は極性によりその機構が非常に異なることを述べた。

さらに絶縁板表面に細溝がある場合、特に負放電の進展に対し定性的に考えられた阻止効果があることを示した。すなわち、印加電圧およびみぞの形状により多少の差はあるが、電圧に換算して欲しい印加電圧の 50% 増にあたる効果があった。

本論文に述べられた以外の効果については、今後さらに検討していく予定である。

終わりに、本研究に対し有益なご助言をいただいた本学の堺 孝夫教授に感謝するとともに、実験に協力された本学学生の川崎 剛(現、日本電信電話公社)、中野滋章(現、日本鋼管)、益子典道(現、日平産業)の三君に対し謝意を表する。

(昭和 46 年 8 月 21 日受付、同 47 年 1 月 8 日再受付)

文 献

- (1) Y. Toriyama: Phys. Rev. **37**, 5, 619 (1931)
- (2) Y. Toriyama: Dust Figure of Surface Discharge and its Application (1961) Kinokuniya, Japan
- (3) たとえば、小山・室岡: 昭46電気学会全大 105
- (4) 井関・倉橋・松浦・仲神: 昭42電気四学会連大 138
- (5) 竹山: 電磁気現象理論 (昭 31) 丸善
- (6) 岸田・佐藤・鳥山: 昭46電気学会全大 112