油浸変圧器絶縁における低誘電率絶縁紙 適用の検討

正員 宮 尾 博 (日 立)

非会員 加 茂 洋 一 (日 立)

正員 鎌 田 譲 (日 立)

Experimental Evaluation of Low Permittivity Insulating Paper on Oil Filled Transformer Insulation

Hiroshi Miyao, Member, Youiti Kamo, Non-member, Yuzuru Kamata, Member (Hitachi, Ltd.)

The permittivity reduction of insulating paper is expected to improve a dielectric strength in oil-immersed large power transformers. Using several kinds of newly developed synthetic paper with low permittivity, insulation characteristics of them are investigated under lightning impulse and AC voltage conditions by making simple coil models. In the case of AC voltage, AC partial discharge inception voltages are improved by using low permittivity synthetic paper. However in the case of lightning impulse voltages, some of the low permittivity insulating paper show the characteristic that partial discharge inception voltages are not improved. According to the still camera observation of the lightning impulse test and SEM observation of the insulating paper surface, it is found that the half lapped part of insulating paper becomes weak points of the partial discharge inception and low permittivity insulation papers with long fibers on the surface or the edge of paper give lower partial discharge inception voltages. It is cleared that not only the permittivity value of paper, but also the surface condition of the paper has an important role to get good insulation performance effectively for low permittivity paper.

キーワード：低誘電率，絶縁紙，絶縁耐力，油，変圧器，部分放電，破壊電圧

1. ま え が き

油隙と油浸固体絶縁物(紙)の直列配置からなる，油浸変圧器絶縁については古くから研究されてきており，絶縁耐力を高める方法としては油中水分の低減あるいは，塵芥の除去など油自体を高耐圧化する方法，または絶縁紙中水分の低濃度管理などが研究されている^{(1)~(3)}。一方，構造面および材料面からの問題として，従来の鉱油とクラフト紙あるいはプレスボードを用いた油浸複合絶縁系では，油浸紙の誘電率が鉱油に比べ1.5倍以上高いため，交流あるいはインパルス電圧を印加した場合，絶縁耐力の低い鉱油に電界が集中し全体としての耐圧が向上できないという問題点があ

った。このような油隙への電界集中を緩和するには鉱油と紙の誘電率を近づけマッチングをとる誘電率整合の考え方が有効であるが⁽⁴⁾，高温油中での耐油性という厚い壁があり，油浸固体絶縁物に適切なものが得られないでいた。しかし，最近，低誘電率の絶縁紙として耐油性のあるケーブル用合成絶縁紙が開発され⁽⁴⁾，一部は本四架橋に沿ったOFケーブルに実用化されようとしている。また，プレスボードでは耐油性の合成繊維を用いた低誘電率のものが開発され，スパーサとして変圧器へ適用されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このように，油中に浸漬して使用する絶縁あるいは油を含浸して使用する絶縁に低誘電率化の動きが現れている。本論文では，低誘電率プレスボードを利用する油浸変圧器絶縁を更

に発展させる見地から、導体の被覆絶縁を油の比誘電率(2.2)に接近せしめる研究を行った。導体に被覆する油浸絶縁紙の比誘電率を2.5ないし2.6にすれば、低誘電率プレスボード(3.5)と組合せて絶縁耐力を更に向上できると期待される。ここでは第一段階としてテープ巻きの絶縁紙材料を幾つか選択し、この材料のみで構成されるモデルの交流、雷インパルスの部分放電開始電圧を主体に絶縁性能を検討した。

2. 低誘電率紙を用いる物理的意義

一般に、図1に示すような油浸複合絶縁系に電圧 V を印加した場合、油隙の静電界 E_2 は(1)式および(2)式で与えられる。

$$E_2 = \frac{V}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} d_1 + d_2} \quad \text{.....(1)}$$

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1 \quad \text{.....(2)}$$

V : 印加電圧, d_1 : 絶縁紙の厚さ, d_2 : 油隙長, ϵ_1 : 絶縁紙の比誘電率, ϵ_2 : 鉱油の比誘電率

図1. 油浸複合絶縁系のモデル

Fig. 1. Model of oil-immersed composite insulation system.

図2. 紙と油の構成比率と油隙の電界の関係
Fig. 2. Relationship between electric field strength in oil and oil/paper ratio.

ここで、 E_1 : 油含浸した絶縁紙中の電界すなわち、油隙の静電界 E_2 は油浸絶縁紙の比誘電率 ϵ_1 と鉱油の比誘電率 ϵ_2 の比により変わり、油浸絶縁紙中の電界 E_1 より大きくなったり小さくなったりする。変圧器で使われる油浸絶縁紙では ϵ_1 が3.0~3.5であるのに対し、鉱油の ϵ_2 は2.2であり、 E_2 は E_1 の約1.5倍の高い値になる。ところが、油浸絶縁紙の絶縁破壊電界の大きさは油よりもはるかに高いのが一般的である。そこで複合絶縁系の合理的組合せとしては $\epsilon_1 < \epsilon_2$ とすることが望ましいが、鉱油を用いる限り2.2より低い誘電率を有する油浸絶縁紙が存在しないため、できる限り $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$ に近づけることが現実的である。このように、油と油浸絶縁紙の誘電率をできるだけマッチングさせることが系全体の絶縁耐力を向上するための基本的原理である。

しかし、油と油浸絶縁紙の構成比率(電極間に占める各々の絶縁の幾何学的な構成比率)により誘電率低減の効果が変わるので注意しなければならない。この様子を(1)式を基にして図2に示す。図より、油浸絶縁紙の占積率 S が大きいほど、また誘電率比 ϵ_1/ϵ_2 を1に近づけるに従い、油隙の電界 E_2 が低下することがわかる。すなわち、誘電率低減効果を十分に活用するためには、油浸絶縁紙の占積率が大きい絶縁構造部に適用することが重要である。

3. 実験方法

〈3・1〉 試料 変圧器絶縁では、コイル素線間の微小な油隙に電界が集中するため絶縁耐力の限界がこの油隙の電界で決まっていた。本実験ではこのような油隙を模擬するため、図3のような電極構成モデルとした。モデルでは構成を簡単にするため、導体および被覆絶縁が円柱状のリード線形状のつき合せモデルとした。入手した絶縁紙は、絶縁物の表面状態として凹凸のある厳しい条件を想定して絶縁紙テープが互いに半分重なるように(半掛け)巻回し、被覆厚が2.5 mmになるようにした。絶縁紙としては表1に示すように通常変圧器で用いられているクラフト紙 a のほかに耐油性を重視して選定した3種類の低誘電率合成紙を用いた。それぞれ b はフッ素樹脂系フィルムのクラフト紙とのラミネート紙、 c はポリプロピレン系繊維と、セルロース繊維との混抄紙、 d はポリアミド系繊維よりなる合成紙である。試験時には、油隙長 g を $g=0$ mmと $g=1.0$ mmの2とおりに変えた。これは実際の変圧器内での絶縁構成における、くさび状油隙と通常油隙を各々模擬している。絶縁被覆を施したモデルは、100°Cで真空加熱乾燥後、変圧器油

図 3 モデルの構成
Fig. 3. Model configuration.

表 1 実験に用いた絶縁紙
Table 1. Insulation paper used in the experiment.

紙の名称 項目	a クラフト紙	b	c	d
厚さ(μm)	55	100	120	50
比誘電率 (油浸紙)	3.5	2.5	2.7	2.6

(JIS 1種4号油)を真空含浸し、試験まで油中水分15 ppm 以下の変圧器油中に保管した。

〈3・2〉 印加電圧 印加電圧は、50 Hz の AC 電圧と正極性1.2/50 μs の雷インパルス電圧である。AC 電圧は予想される部分放電開始電圧の約50%の電圧から10 kV ステップで部分放電開始まで1分間ステップアップで昇圧した。部分放電の観測にはERA-3型部分放電検出器とVTR モニタを用い、放電パルスと試料の近くに置いたVTR カメラからの放電光の有無により部分放電開始を確認した。また雷インパルス電圧では、予想される部分放電開始電圧の約50%の電圧から約30 kV ステップで昇圧し、試料が破壊するまで印加した。雷インパルス部分放電の測定には残留電荷法⁽⁹⁾を用いた。また同時に、焦点距離1,000 mm の望遠レンズを装着した静止カメラにより部分放電光を拡大撮影し、部分放電の発生とその発生部位を確認した。

4. 実験結果

〈4・1〉 AC 絶縁特性 一般に AC 電圧の場合、いったん部分放電が発生すると単発の放電で停止することはまれであり、持続性の放電となりそのまま破壊に至ることが多いため、部分放電開始電圧は絶縁耐力を評価するうえで重要な指標となる。今回の実験に用いたモデルの場合も持続性の放電となり、一度部分放電

図 4 各種絶縁紙における AC 部分放電開始電圧 (油隙長=0 mm)

Fig. 4. AC partial discharge inception voltages of each insulation paper (oil gap = 0 mm).

が生じると瞬時に電源を遮断しない場合は、そのままモデル全体の絶縁破壊に至り部分放電開始電圧と絶縁破壊電圧とは等しかった。そこで、実験結果の検討は部分放電特性の結果にのみ実施した。図4に各種油浸絶縁紙の $g=0$ mm の場合の部分放電開始電圧を比較示す。図5は同様に油隙長 $g=1.0$ mm の場合を比較したものである。図中の○印は部分放電開始電圧の実測値であり、それを囲む枠はばらつきを表し、平均値は枠内の横線で示してある。また、斜線枠の部分は各種油浸絶縁紙のモデル試料に対し、計算機による電界分布の計算を行い、油浸絶縁紙は破壊せずに油隙が破壊の発端になると考え、図中に示した位置の油隙の相対電界を求め、クラフト紙を用いた場合と各々の低誘電率油浸絶縁紙を用いた場合の相対電界の比から、クラフト紙を用いた場合の油隙の破壊電界を基準にして、各々の低誘電率油浸絶縁紙のモデルの破壊電圧分布はどのようになるべきかを計算して表している。これらの結果を要約すれば以下のようなのである。

(1) 油隙長 $g=0$ mm の場合には各低誘電率油浸絶縁紙の部分放電開始電圧は従来紙であるクラフト紙の結果より20%以上高く、クラフト紙の結果を基準

図 5 各種絶縁紙における AC 部分放電開始電圧 (油隙長=1.0 mm)

Fig. 5. AC partial discharge inception voltages of each insulation paper (oil gap=1.0 mm).

にして各油浸絶縁紙の誘電率をもとに電界計算から求めた値とほぼ等しい。

(2) 油隙長 $g=1.0$ mm の場合も、いずれの低誘電率油浸絶縁紙とも油隙長 $g=0$ mm の場合と同様であり、クラフト紙を基準とした計算値とほぼ等しい。

このことから AC 電圧においては、いずれの低誘電率油浸絶縁紙を用いても、またくさび状油隙あるいは通常油隙いずれの部位でも、ほぼ誘電率を考慮した計算どおりの耐圧改善が期待できることがわかった。

〈4・2〉 雷インパルス絶縁特性 一般に雷インパルス電圧印加時には、部分放電開始後、更に数ステップ高い電圧で破壊する場合が多く、部分放電開始電圧と共に破壊電圧も絶縁耐力を評価する重要な指標となる。図 6 および図 7 に各々油隙長 $g=0$ mm および油隙長 $g=1.0$ mm の場合の各種油浸絶縁紙の部分放電開始電圧と破壊電圧を比較した結果を示す。なお、図中の○印とその枠および斜線部は AC 電圧の場合と同じく部分放電開始電圧の実測値と計算値を表す。また×印とその枠は破壊電圧の実測値とそのばらつきを表す。参考のために写真観測より得られた油隙長 $g=0$ mm のモデルの部分放電の模式図を図 8 に示す。いずれの場合も部分放電は油隙の最深部より開始してい

図 6 各種絶縁紙における雷インパルス部分放電開始電圧と破壊電圧 (油隙長=0 mm)
Fig. 6. Lightning impulse partial discharge inception voltages and breakdown voltages of each insulation paper (oil gap=0 mm).

た。図の結果を要約すると次のようになる。

(1) 比誘電率 2.5 の b 紙は、油隙長 $g=0$ mm の場合には、部分放電開始電圧、破壊電圧共に平均値がクラフト紙より 20% 以上改善する。また油隙長 $g=1.0$ mm の場合にも、部分放電開始電圧は平均値で 20% 以上改善する。更に破壊電圧も部分放電開始後直ちに全体の絶縁破壊に至ったがクラフト紙より高い。

(2) 比誘電率 2.7 の c 紙は、クラフト紙の結果に対して油隙長 $g=0$ mm の場合には部分放電開始電圧の平均値の改善は小さい。また、破壊電圧では最低値は改善するが最高値は向上しない。一方、油隙長 $g=1.0$ mm の場合には、部分放電開始電圧の最低値は改善するが最高値は改善しない。また破壊電圧は改善しない。

(3) 比誘電率 2.6 の d 紙は、クラフト紙の結果に対して油隙長 $g=0$ mm の場合には部分放電開始電圧はほぼ計算どおりであり、平均値および最高値は 20% 以上改善するが最低値は向上が小さい。また、絶縁破壊は部分放電開始後直ちに生じ、破壊電圧では最低値は改善しないが最高値は改善する。一方、油隙長 $g=1.0$ mm の場合には、部分放電開始電圧は最低値以外は向上しない。また絶縁破壊は部分放電開始後直ちに生じ、破壊電圧ではいずれの値もクラフト紙より

図 7 各種絶縁紙における雷インパルス部分放電開始電圧と破壊電圧 (油隙長=1.0 mm)
Fig.7. Lightning impulse partial discharge inception voltages and breakdown voltages of each insulation paper (oil gap=1.0 mm).

図 8 油隙長=0 mm の場合の部分放電模式図

Fig. 8. Model pattern of partial discharge in the case of oil gap=0 mm.

低い。

以上より雷インパルス電圧に対しては、雷インパルス部分放電開始電圧が低誘電率紙を用いても必ずしも計算どおり向上しない場合があることがわかった。

5. 結果の検討

〈5・1〉 部分放電の起点 前述したように、雷インパルス電圧課電時に低誘電率油浸絶縁紙を用いても、誘電率を低減した計算どおりの性能が発揮されない場合がある。この原因を明らかにするため、まず各

表 2 部分放電の発生確率 (雷インパルス電圧)
Table 2. Partial discharge generation probability (Lightning impulse voltage).

紙の名称	クラフト紙	b 紙	c 紙
(A) (沿端部)	60 %	68 %	61 %
(B) (平坦部)	40 %	32 %	39 %

種油浸絶縁紙の雷インパルス電圧課電時の部分放電の起点についてミクロな観点から調べた。部分放電の起点を調べるために焦点距離が1,000 mmの望遠レンズを用い、部分放電の様子を静止カメラで撮影し観察した。油隙長=1.0 mmの場合には、ほとんどの場合が部分放電開始後直ちに破壊したため、発光が強すぎ起点が判明せず、油隙長 $g=0$ mm の場合のみ検討した。なお、AC 電圧の場合には部分放電開始後直ちに電源を遮断したが、連続放電のために破壊の起点は特定できなかった。表 2 に雷インパルス電圧課電時の部分放電の起点を観察した結果を示す。2本の突合せ試料のテープの端部を沿端部 (A 部) とし、その他の部分を平坦部 (B 部) としてどちらで雷インパルス部分放電が生じたかを写真で判定し分類した。なお、d 紙は油隙長 $g=0$ mm の場合でも雷インパルス部分放電開始後直ちに破壊したため判定不能であった。図 9 に A 部で発生した雷インパルス部分放電の代表例を示す。表 2 と図 9 より次のことがわかった。

(1) 沿端部と平坦部の雷インパルス部分放電の発生比率は、ほぼ 2 対 1 で沿端部が多い。

(2) 沿端部の面積は平坦部の面積に比べてはるかに小さく、部分放電の単位面積当たりの発生確率は面積の小さい沿端部が非常に大きい。すなわち、沿端部は部分放電の発生に対してより大きな弱点となる。

一般に油隙の破壊は、雷インパルス電圧のように課電時間が短い場合には試料の表面状態の影響を受けや

(a) *b* 紙 (雷インパルス +404 kV) (b) *c* 紙 (雷インパルス +404 kV)

図 9 雷インパルス部分放電発生場所の写真観測

Fig. 9. Photograph observation of partial discharge generated spot under lightning impulse voltages.

すく、AC 電圧のように課電時間が長い場合には表面状態よりも油中の塵芥の影響を受けやすいといわれている^{(10)~(13)}。雷インパルス部分放電の起点を調べた結果でも、紙の表面状態が平坦部よりも粗い切断面が表面に出る沿端部のほうが部分放電の発生確率が高いことから、今回の実験でも試料表面状態の影響を強く受けたことが考えられる。

〈5・2〉 走査型電子顕微鏡による試料表面の観察

各種絶縁紙の表面状態がどのように異なるかを走査型電子顕微鏡により調べた。紙の表面および素線モデルの突合せ部の様子を調べた結果を各々図 10、図 11 に示す。図より次のことがわかる。

- (1) クラフト紙、*b* 紙、*c* 紙の表面状態はよく似ており比較的滑らかである。
- (2) *d* 紙は表面の毛羽立ちが目立ち、100 μm 前後の繊維が多数飛出ている。
- (3) *b* 紙の切断面は毛羽立ちが少なく、また大きさも小さいが、クラフト紙、*c* 紙、*d* 紙の毛羽立ちは大きい。
- (4) 毛羽立ちの小さい順に並べると次のようになる。

① *b* 紙 < ② クラフト紙 < ③ *c* 紙 < ④ *d* 紙

今回の表面状態の観察結果と AC および雷インパルス部分放電の実験結果を比較すると次のことがいえる。

(i) AC 電圧、雷インパルス電圧共に誘電率低減の効果が、かつ部分放電開始電圧が 20% 以上改善可能な合成絶縁紙としては、試料表面および端部断

図 10 絶縁紙（テープ）表面および端部の SEM 観測

Fig. 10. SEM observations of surface and edge of insulating paper.

図 11 試料突合せ部の SEM 観測

Fig. 11. SEM observations of contact part of specimens.

面部で毛羽立ちが少ない *b* 紙があげられる。

(ii) AC 電圧では、試料表面の毛羽立ちの部分放電開始電圧への影響は小さく誘電率の変化分だけ油隙の電界が低減され、耐圧の改善が期待できる。この原因は AC 電圧の場合には課電時間が長いため、塵芥の動きによる集積などの破壊への影響のほうが大きく、毛羽立ちの影響がマスクされたことが考えられる。

(iii) 雷インパルス電圧の場合には、部分放電開始電圧は、試料表面状態の影響を受け、紙表面および端部に 100 μm 以上の毛羽立ちが多い *c* 紙、*d* 紙では、

低誘電率紙であっても部分放電開始電圧の向上割合が小さくなる。

以上の検討結果より変圧器巻線部に低誘電率絶縁紙を用いて高耐圧化を行う場合には、ただ単に巻線の絶縁被覆に用いる絶縁紙の低誘電率化だけでは不十分であり、絶縁紙の毛羽立ちといった表面および端部の状態に十分な注意をはらう必要があることがわかった。

毛羽立ちの大きさが耐圧に影響する原因としては、繊維先端での電界集中が考えられる。すなわち、油浸絶縁紙の低誘電率化の効果はバルクで効き、油隙の電界強度を低減するが、油浸絶縁紙の表面または沿端部に毛羽立ちがあると構成繊維単独の比誘電率による繊維先端における電界集中が考えられる。今回実験した合成絶縁紙中にはいずれもセルロース繊維またはポリアミド繊維が含まれており、それらの繊維は油浸紙バルクよりも誘電率が高いため繊維先端での電界集中は大きくなる。例えば、セルロース繊維は、乾燥状態で比誘電率は6.6、またポリアミド繊維は5.0以上であり、吸湿すると更に大きくなる。すなわち、油浸絶縁紙⁽⁹⁾の低誘電率化により油隙のマクロな電界強度は低下するが、大きな高誘電率繊維の毛羽立ちが多数存在するとその繊維先端で局所的な電界集中を生じ、破壊の起点になりマクロな油隙の破壊電界強度を低下させることになる。そのため、油浸絶縁紙の低誘電率化による破壊電圧改善効果を低下させると考えられる。以上は定性的な説明であり詳しいメカニズムについては今後の検討課題である。

6. ま と め

以上、油浸変圧器絶縁に対する低誘電率紙の適用を検討した結果、次のようなことがわかった。

(1) AC電圧では油浸絶縁紙の種類によらず、また試料表面状態に影響されずに、低誘電率化に伴い部分放電開始電圧が改善されること。

(2) 雷インパルス電圧では、低誘電率油浸絶縁紙を用いても部分放電開始電圧が改善されない場合があり、また沿端部が部分放電開始の弱点となる確率が高いこと。

(3) 試料表面のSEM観測によれば、雷インパルス部分放電開始電圧が改善されない低誘電率油浸絶縁紙は、表面および沿端部の毛羽立ちが大きい種類であること。

最後に、本研究を進めるにあたり御指導いただいた名古屋大学名誉教授 家田正之先生に感謝いたします。(平成3年9月26日受付、同4年1月27日再受付)

文 献

- (1) 電気協同研究, 30, No. 3 (昭50)
- (2) 石井・上田:「絶縁油の交流破壊電圧に及ぼす水分の影響」, 電学論 A, 92, 154 (昭57-3)
- (3) 池田・本多・村野:「流動油の絶縁破壊特性」, 同上 B, 99, 635 (昭54-10)
- (4) 電力中央研究所 調査報告:EHV/UHV 合成紙絶縁ケーブル技術の現状と研究展望, No.178037 (昭54)
- (5) R. J. Taylor: "Effect of permittivity matching on the flashover of solid liquid interfaces", *Proc. IEEE*, 124, No. 10 (1977)
- (6) DOE Report: "Advanced concepts for transformers press-board dielectric constant and mechanical strength", DOE/EV/29307-1 (1982)
- (7) 鎌田・前島・大江・藤田・古川・遠藤・野寺・月岡・兵頭・石塚:「新しい低誘電率プレスボードを用いた超高压大容量変圧器絶縁の開発」, 電学論 B, 110, 753 (平2-9)
- (8) Y. Kamata & K. Endou: "Lightning Impulse Volt-time Characteristics in Transformer Insulation", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, No. C73028-8, 1973, N. Y.
- (9) 電気絶縁材料工業会編:電気電子絶縁材料, 第4章
- (10) H. S. Endicott, K. H. Weber: *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 76, 393 (1957)
- (11) 「液体中の伝導と破壊」電気学会技術報告 (II 部), No. 242, 50 (昭62)
- (12) 池田・本多・村野:「流動油の絶縁破壊特性」, 電学論 B, 99, 635 (昭54)

宮 尾 博 (正員)

昭和24年8月21日生。49年名古屋大学大学院修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所において、主として、電力用変圧器および回転機の研究開発に従事、現在に至る。

加 茂 洋 一 (非会員)

昭和37年6月19日生。56年3月新潟県立中条工業高校電気学科卒業。同年(株)日立製作所入社。日立研究所において、電力用変圧器の絶縁研究に従事。平成2年より中条工場にて変圧器の開発に従事、現在に至る。

鎌 田 譲 (正員)

昭和12年10月7日生。35年3月秋田大学鉱山学部鉱山電機学科卒業。同年(株)日立製作所入社。日立研究所において、電力機器の高電圧絶縁の研究に従事、現在に至る。