新アラミド絶縁紙による変圧器巻線絶縁の高耐電圧化

正 員 遠 藤 馨 (日立製作所)

正 員 大 沼 紀 幸 (帝人)

正 員 上 野 善 人 (日立製作所)

非会員 植 村 竜 司 (帝人)

正 員 平 石 清 登 (日立製作所)

Improvement of Dielectric Strength on Transformer Winding using New Aramid Paper

Kaoru Endoo, Member, Yoshito Uwano, Member, Kiyoto Hiraishi, Member (Hitachi, Ltd.)

Toshiyuki Oonuma, Member, Ryuuji Uemura (Teijin, Ltd.)

Large power transformers using perfluorocarbon liquid have advantages of high dielectric strength, excellent cooling ability, and nonflammability.

To make the transformer more compact, it is very important to improve insulation material.

Recently, we succeeded to develop the new type of aramid insulation paper which has no fluff on its surface to avoid field concentration.

In this paper, outline of the developed paper and the experimental results of insulation strength on turn-to-turn and inter-coil models are described.

It was found that the developed new aramid paper makes insulation strength increase 1.2(turn-to-turn case) to 1.7(inter-coil case) times of the existing insulating paper.

キーワード：変圧器絶縁，アラミド紙，パーフロロカーボン液，毛羽なし紙，雷インパルス破壊，ターン間絶縁

1. 緒 言

不燃化を図った新しい都市型の超高圧大容量変圧器は既に方式の異なるいくつかの変圧器が開発され運転中である。SF₆ガスを封入し、パーフロロカーボン液を絶縁・冷却媒体とした液浸複合絶縁方式の変圧器（PFC変圧器と呼称）もその一つであり、高い絶縁強度と高性能冷却性があるパーフロロカーボン液の特長を活かして変圧器巻線のコンパクト化を達成している。しかし、今後の高電圧化、大容量化を進めるには市街地における輸送制限、変電所の省スペース化などの課題があり、巻線のコンパクト化のための高電界絶縁技術がますます重要になっている。

巻線絶縁寸法を短縮するには雷インパルス電圧侵入時の巻線電位分布の均一化を図るとともにターン間、コイル間の絶縁耐力を向上させる必要がある。雷インパルス電圧に対するコイル間絶縁の弱点部は

(1) スペースとコイル角部に形成されるウェッジ部（楔状液ギャップの電界集中）

(2) コイル表面の毛羽発生部分

である。楔状液ギャップの電界緩和は絶縁部材の低誘電率化によってある程度可能であるが、電線表面の毛羽の発生をなくすには電線被覆材となる絶縁紙の表面に繊維突起がないようにしなければならない。PFC変圧器では加圧することによって液の沸点を上げられるので、より高温での

使用が可能になる。そこで耐熱絶縁紙を被覆材とした電線を使用することによって耐熱グレードを上げている。従来の耐熱絶縁紙は表面に毛羽の起立があり、特にパーフロロカーボン液中ではその毛羽が雷インパルス破壊強度に大きく影響していた。それは起立した毛羽の部分に生じる電界集中が破壊に影響することによるものである。

本研究では、電界集中の原因になる毛羽をなくした毛羽なし絶縁紙を開発し、巻線を模擬した試料を用いてその絶縁特性の基礎的検討を行ったので報告する。

2. パーフロロカーボン液の絶縁破壊強度に及ぼす因子

図1にパーフロロカーボン液ギャップ破壊の課電時間特性を示す。

一般に、パーフロロカーボン液の交流破壊電圧は液中の不純物粒子によって大きく変わり、粒子数が多い場合は清浄な液の場合の20～30%にも低下する。¹⁾これは液体の動粘性係数が通常の変圧器油などに比べて小さいため課電状態での粒子の動きが活発となり、集積・橋絡過程が容易であることに起因している。一方、課電時間が短い雷インパルス電圧では粒子の集積・橋絡過程がなく、粒子数が多い場合でも破壊電圧はほとんど変わらない。²⁾

図1 PFC液ギャップ破壊のV-t特性に及ぼす液中粒子の影響

Fig.1. Influence of particles on V-t characteristics in PFC liquids.

パーフロロカーボン液の雷インパルス破壊特性では、液面圧力の効果大きいことが実験的に確認されている。³⁾これは加圧することによって電極面に付着している微小な気泡あるいは局部高電界部の気泡の形成が抑制されるためであろうと推定される。また、円板巻線のコイル間を模擬したモデルではコイルとスペーサによって形成される楔状液ギャップが電界集中部となり、破壊はこゝから進展する。しかしながら、液ギャップを橋絡するように絶縁紙表面に毛羽が発生していると、その部分に電界が集中し、液ギャップ破壊を誘発する。図2に従来のアラミド絶縁紙電線によるコイル間モデルの毛羽発生の様子と破壊状態を示す。破壊の出発点は毛羽発生部であり、絶縁耐力低下の一因になっている。

したがって、変圧器巻線の絶縁耐力を向上させるには、清浄な液体にすることのほかに絶縁紙表面の毛羽発生を最小限に抑制することが重要な課題であり、毛羽なし絶縁紙の開発を進めてきた。

3. 毛羽なしアラミド電気絶縁紙の開発

〈3.1〉 ニーズ 従来から耐熱性電気絶縁紙として、メタ型アラミド紙が市販されている。この紙は高温高压でカレンダー加工されたもので表面毛羽はほとんどない。しかし、電線メーカーおよび重電メーカーの製造工程において、特に成形するとき、紙表面に毛羽が出ることがある。この毛羽は前述のように、高電圧の条件下では電気絶縁特性を阻害することが判明してきた。

このため、素線巻きおよびコイル巻き工程で絶縁紙表面に毛羽の発生しないアラミド電気絶縁紙の開発ニーズがでてきた。(以下毛羽なし紙と略記する)

〈3.2〉 実験室での毛羽発生モデル試験 毛羽の有無を定量化するため、まずコイル巻後の従来の電線から紙をほぐして幅14mm、長さ500mm中の表面毛羽本数を調査した。その結果、毛羽の発生は100cm当たり平均724本であった。毛羽なし紙を開発するための前段階として、これと同程度の毛羽を実験室で発生させるための等価試験法を検討した。

(a) 毛羽発生の様子

(b) 絶縁破壊の位置

図2 PFC液中におけるコイル間モデルの毛羽発生の様子とインパルス破壊位置

Fig.2. Pictures of fluffes on inter-coil model using aramid paper immersed in PFC liquids and impulse discharge point.

図3に毛羽発生用の学振型摩耗試験器⁴⁾の構成と動作の概略を示す。接触面積を20mm×20mm、ストローク長を100mm、ストローク速度を1往復/秒、テスト紙幅を25mm一定として諸条件を調べた結果、摩擦体は金巾3号布、荷重は500g、摩擦回数は100回とし、摩擦後のテスト紙25cm当たりの毛羽本数で定量化する方法が最適であり、このモデル試験法を採用した。

〈3.3〉 アプローチ ここでは素材をアラミド系に限定する。アラミド紙はフィブリッド(パルプ)と繊維の混

図3 毛羽発生モデル試験器の概略図

Fig.3. An schematic figure of the experimental model instrument of abrasion.

抄紙であるが、毛羽の原因となるのは紙を構成している繊維に起因している。

毛羽なし紙へのアプローチは以下のようなものである。

低結晶化度繊維を使用してカレンダで熱圧加工するとフィルムライク紙ができる。しかし、発生毛羽は半分程度にしかならない。

発生毛羽長を短くして実質的に悪影響をなくすアイデアで繊維長1mmを使用した紙は発生毛羽本数は少ないが機械的強度が弱くなることが判った。

次に紙表面をカバーする方法を検討した。一つはアラミドポリマーの表面を15%濃度のジメチルアセトアミド溶媒でカバーする方法で毛羽なしを達成でき、機械的強度も従来の90%と良好であったが、溶媒が約4%残った。他の方法は、紙を2層構造にするもので、表面側は繊維を使用せずフィブリッドのみの層にすることにより毛羽も発生せず機械的強度も従来品と同等になることが判明した。この製造方法を以下に説明する。

〈3.4〉 構造および製造法 例え、坪量⁽⁵⁾を40g/m²にした紙を作るのに、20g/m²のフィブリッドのみの紙と、繊維とフィブリッドから成る20g/m²の混抄紙を別々に抄紙してカレンダで2枚の紙を熱圧加工して一体化する方法、および抄紙工程で2層を抄合せして1枚の2層構造の紙をカレンダで熱圧加工する二つの方法を比較検討した結果、後者の方が生産性が良いことから、この方法を採用した。

まず、メタアラミドフィブリッド100%の20g/m²の紙をA抄紙機で抄紙し、メタアラミドフィブリッドとメタアラミド繊維の混合物の20g/m²の紙をB抄紙機で抄紙し、2枚の湿紙を毛布上で一体化し、プレスで脱水し、ヤンキードライヤと多頭ドライヤ⁽⁶⁾で乾燥して巻き取る。次に、カレンダ工程で乾燥、熱圧加工する。

〈3.5〉 特徴 表1に毛羽なし紙の物性を従来のものと比較して示す。また、図4に毛羽発生モデル試験器での摩擦後の紙表面の光学顕微鏡写真を示す。毛羽なし紙は文字通り毛羽は0本である。なお、この毛羽なし紙でも紙の裏面および端面には毛羽は存在するが、テープ紙として素線巻きおよびコイル巻きして変圧器内で高電圧を印加しても絶縁特性上問題ないことが確認されている。

表1 毛羽なし紙の物性

Table 1. Characteristics of the fluff-less paper.

特 性	単 位	毛羽なし紙	従来品
坪 量 ⁽⁵⁾	g/m ²	42	41
厚 さ	μm	51	57
嵩 密 度 ⁽⁷⁾	g/cm ³	0.76	0.72
引張強度(MD/CD)	kg/mm ²	7.9/3.8	8.0/3.5
引張率(MD/CD)	%	10.0/8.4	13.0/7.4
比 誘 電 率	-	1.93	1.90
絶縁破壊強度	kV/mm	35	16
発生毛羽	#/25cm ²	0	132

図4 摩擦後の発生毛羽

Fig.4. Fluffes after abrasion.

4. 耐電圧実験方法

〈4.1〉 モデルの形状と種類 図5に本実験に用いたモデルの構造を示す。ターン間モデル(a)は幅広の面を対向させ被覆厚さの効果を調べた。コイル間モデル(b)では電線の狭い幅の面を対向させ、上側電線を印加側、下側電線を接地側にした。中間部120mmを直線とし、端部は緩やかに曲げ、縁端部で破壊しないようにした。スペーサの寸法は幅40mm、長さ30mm、厚さ2.5mmである。

電線の被覆厚さtは0.5mmと1.0mmであり、50μm絶縁紙をハーフラップで各々5回および10回巻いた。絶縁試験までの工程はモデルを乾燥後、試験タンクにセットし真空引き、真空注液、大気圧含浸、除塵処理、液循環停止、30分間放置後に試験を行った。

〈4.2〉 実験装置および電圧印加方法 図6に本実験装置の概略を示す。雷インパルス電圧発生器から波形調整用直列抵抗を介してモデルに電圧を印加した。試験タンクには、0.2MPaのSF₆ガスを封入し、PFC液量をできるだけ少なくするため、ストップスペーサで試験タンク(容積90ℓ)を仕切った。印加電圧波形は正極性1.0/45μsである。電圧印加の方法は、予想破壊電圧の50%より10~15kVステップで上昇し、破壊するまで繰り返した。また、試験タンクの観察窓に静止カメラを取付け、部分放電の発生位置あるいは破壊経路の観測を行った。インパルス部分放電の測定は、接地側抵抗から部分放電パルス電流を検出する方法で行った。

5. 実験結果及び考察

〈5.1〉 ターン間実験

図7にターン間モデルにおける電線被覆厚さと部分放電開始、破壊電圧との関係を示す。破壊電圧は被覆厚さにはほぼ比例して高くなるのに対し、部分放電開始電圧は厚さが薄い場合に破壊電圧に近い値になる。

(a) ターン間モデル

(b) コイル間モデル

図5 モデルの構造

Fig.5. Structure of turn-to-turn model(a) and inter-coil model(b).

図6 実験装置の構成

Fig.6. Configuration of experimental apparatus.

図8はターン間モデル（被覆厚さ1.0mm）の部分放電の発生の様子を示したものである。168～180kVでは部分放電の発生箇所は1箇所程度であり、196～205kVでは2箇所程度、225～229kVでは対向面の大部分で発生している。一般にターン間絶縁では固体（被覆絶縁）の破壊強度が液体より高いため、破壊電圧より低い電圧で部分放電が発生する。電線の被覆絶縁間に形成されるウェッジ部の微小な液ギャップは電界集中が大きいため、部分放電の出発点となる。この部分に繊維毛羽が存在すると電界集中はさらに大きくなり、後述の図10に示すように、ターン間部分放電開始電圧は127～143kVであり、毛羽なしの場合（154～194kV）より低い電圧で部分放電が発生する。したがって、被覆表面を毛羽なしにすることによって部分放電開始電圧を高くすることができる。

図7 ターン間モデルの雷インパルス破壊特性

Fig.7. Breakdown characteristics of lightning impulse voltage on turn-to-turn models.

〈5.2〉 コイル間実験

図9に2.5mm厚さのプレスボードをスペーサとした代表的なコイル間モデルの部分放電発生の様子を示す。雷インパルス電圧は120kV程度から10～15kVステップで上昇し、220kV、259kVで写真で見られるような部分放電が発生し、272kVで電線の被覆絶縁を貫通する破壊が生じた。部分放電は楔状の微小液ギャップが起点となっており、電線の被覆絶縁表面を多数のストリーマが円周全域を囲むように進展している。被覆厚さ1.0mmのアラミド絶縁紙電線のターン間絶縁破壊電圧は、図7に示したように、もともと240kV程度であり、それ以下の電圧では強烈な部分放電が発生しても容易に破壊は起こらない。部分放電の痕跡は電線被覆の表面に黒い筋状になって残り、何らかの絶縁劣化は生じているものと思われるが、短時間間隔での雷インパルス電圧印加ではむしろ発生部分での残留電荷による電界緩和作用の効果が大きく、絶縁劣化の影響は小さいと思われる。それは220kVでの部分放電発生位置と259kVでの発生位置が異なり、同じ位置で部分放電が発生しないことから裏付けられる。

〈5.3〉 従来絶縁紙電線と毛羽なし電線との破壊

電圧の比較 図10は従来絶縁紙電線によるターン間、コイル間モデルの破壊強度と今回開発した新しい絶縁紙電線の場合とを比較したものである。毛羽なし絶縁紙電線はターン間モデルにおいて部分放電開始電圧（最低値）が1.2倍、また、プレスボードをスペーサとしたコイル間絶縁では1.7倍高い値を示している。それは、図中に（■）印で示したように、毛羽発生部で液ギャップ破壊が生じているためであり、このような異常破壊をなくすことによって大幅に破壊電圧を上昇させることができる。一般に、プレスボードをスペーサとしたコイル間モデルの場合、毛

図8 毛羽なし電線ターン間モデルの破壊過程

Fig.8. Pictures of discharge on turn-to-turn model using fluff-less paper.

羽のない状態ではスペーサの楔状液ギャップが破壊の発端になる。

毛羽の直径を $20\mu\text{m}$ 、比誘電率を4.5、コイル間液ギャップを 2.5mm にし、毛羽の長さを $0\sim 2.5\text{mm}$ にしたときの毛羽先端部の電界を調べた。電界解析の図形を図11上部に示しているが、被覆導体間のマクロな電界を二次元解析によって求め、その電界分布をもとにして、先端が半球の円柱状毛羽と仮定して三次元解析をした。図11下図に毛羽の長さ l と毛羽先端部分の電界集中係数 K （（毛羽先端部分の局部電界） $\div$ （平均電界））との関係を示す。毛羽の長さ l が 2.0mm のときの毛羽先端部分の電界集中は1.67であり、毛羽がないとき（ $K \approx 1.0$ ）より1.67倍電界が高くなる。したがっ

図9 毛羽なし紙のコイル間モデルにおける部分放電発生の様子

Fig.9. Pictures of partial discharge on inter-coil model using fluff-less paper.

て、このモデルではスペーサ部分の楔状液ギャップよりも毛羽の起立あるいはブリッジによって生ずる液ギャップ部の電界集中の影響の方が大きいために異常な破壊経路になったものと思われ、コイル間絶縁において毛羽は絶縁耐力低下の大きな因子であるということが明らかである。

6. 結 言

さらにコンパクトなPFC変圧器を開発するため、巻線の高電界化が可能な毛羽なし絶縁紙を開発した。新しい絶縁紙を適用した電線で巻線のターン間、およびコイル間の絶縁試験を行い、以下のようなことを明らかにした。

- (1) 変圧器のターン間を模擬したモデルの雷インパルス部分放電は楔状液ギャップで発生し、電圧の上昇とともに発生箇所が多くなる。
- (2) ターン間絶縁の破壊電圧は被覆厚さにほぼ比例して高くなり、部分放電開始電圧は被覆厚さが薄い場合に破壊電

(平成5年12月10日受付)

文 献

- (1) 小林, 高木, 遠藤, 川嶋:「パーフロロカーボン液の絶縁特性」, 平成2年電気学会全大, S.2-6
- (2) 遠藤, 白根, 木村:「パーフロロカーボン液の開閉インパルス破壊特性」, 平成4年電気学会全大, No.857
- (3) 高木ほか6名:「パーフロロカーボン液中の複合絶縁系の絶縁特性」, 平成元年電気学会全大, No.787
- (4) 日本工業規格 JIS L0823「染色堅ろう度試験用摩擦試験機」, 摩擦試験機II型
- (5) 日本工業規格 JIS P0001「紙・パルプ用語」番号7061
- (6) 村井, 中西:「製紙工学」, 工学図書(株)版, P385, P396
- (7) 電気学会 電気専門用語集 No.16「絶縁材料」 番号2.2.01

遠 藤 馨 (正員)

昭和13年10月19日生。昭和32年3月福島県立喜多方商工高校卒業。同年(株)日立製作所入社。以来, 日立研究所にて変圧器の絶縁に関する研究に従事。現在, 日立研究所システム4部技師。

上 野 善 人 (正員)

昭和26年12月22日生。昭和49年3月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。以来, 同社国分工場にて変圧器の設計に従事。現在, 国分工場変圧器設計部主任技師。

平 石 清 登 (正員)

昭和13年8月25日生。昭和37年3月東京工業大学卒業。同年(株)日立製作所入社。以来, 同社国分工場にて大形変圧器の開発, 設計に従事。現在, 国分工場副技師長。

大 沼 紀 幸 (正員)

昭和15年11月27日生。昭和38年3月東京農工大学工学部繊維工学科卒業。同年帝人(株)入社。昭和60年より電気絶縁材料の開発に従事。現在, コーネックス加工品事業部主席研究員。

植 村 竜 司 (正員)

昭和34年4月17日生。昭和58年3月京都工芸繊維大学繊維工学科卒業。同年帝人(株)入社。以後, 電気絶縁材料の開発に従事。現在, 繊維第一技術開発部研究員。

図10 毛羽なし絶縁紙モデルの部分放電開始電圧および破壊電圧の向上効果

Fig.10. Effect of improvement of partial discharge inception voltage and breakdown voltage by fluffless paper.

図11 PFC液中における繊維毛羽先端部の電界集中

Fig.11. Concentrated electrical field at the tip of fluff on the inter-coil model in PFC liquids.

圧に近い値になる。

(3) 従来の毛羽のある絶縁紙を用いたコイル間モデルではスペーサ部分からの破壊ではなく, 毛羽発生部分から低電圧で破壊が生じている。毛羽なし紙を適用したモデルではこのような異常破壊はなくなる。

(4) 毛羽なし紙の適用によってターン間絶縁の破壊電圧は1.2倍, コイル間は1.7倍向上する。