

耐熱3層絶縁電線“TEX-F”の開発

Development of Heat-Resistant Triple-Insulated Winding Wire "TEX-F"

小林 勇*

Isamu Kobayashi

森 邦彦*

Kunihiko Mori

千田尚之*

Naoyuki Chida

東浦 厚*2

Atsushi Higashiura

石井 禎*2

Tadashi Ishii

田場 淳*3

Atsushi Taba

概要 スイッチング電源のトランスの更なる小型化と高性能化を可能とする高耐熱3層絶縁電線TEX-Fを開発した。耐熱クラスは従来のTEX-EがE種120℃に対し、TEX-FはF種155℃である。導体サイズ範囲、皮膜厚等は従来タイプのTEX-Eと同様で0.2 mm～1.0 mmの広いサイズ範囲と3層で100 μm（1層約33 μm）の薄肉絶縁での製造を可能とした。また安全規格もTEX-Eと同じくIEC60950に適合し、各国の認定も取得した。

更にTEX-FはTEX-Eにはない高周波V-t特性に優れているという特長を付与させた。これによりトランスに過電圧がかかった場合に発生するコロナ放電に対し、長時間耐えることができるのでトランスの信頼性を高めることができる。

1. はじめに

近年、電子・電気機器の小型化が進むに伴い、その電源部についても小型化の要求が大きくなっている。現在、機器の電源についてはスイッチング素子を用い、入力電圧を高周波化することでトランスの巻線数を減らしてトランスを小型化するスイッチング電源方式が主流となっている。

このスイッチング電源用3層絶縁電線として我々はTEX-Eを開発し、現在では世界中で広く使用されるようになった。しかし、最近では更なる小型化の要求に伴い、電源内での発熱量が大きくなり、より耐熱性の高い3層絶縁電線の要求が起きている。

また、実際のスイッチングトランスで用いられる高周波数帯における電線の電気特性についてはこれまで検討されていなかったため、今回、矩形高周波発生装置を用い、V-t特性を測定することを試み、合わせて本特性を大きく向上させることができる樹脂構成を見出した。

本報告ではこの高周波V-t特性を向上させた高耐熱3層絶縁電線TEX-Fの開発の経過を報告する。

2. IEC60950と3層絶縁電線

まず、スイッチングトランスが安全規格上、どのような制約を受け、その中で3層絶縁電線がどのようなところで使用されるのかについて説明する。

現在、スイッチング電源に関連する安全規格で最も重要なものとしてはIEC（国際電気標準会議: International Electrotechnical Commission）規格のIEC60950（情報処理機器の安全性: Safety of Information Technology Equipment）が挙げられる。

本規格がトランスに対して要求している項目として次のようなものが挙げられる。

- ① エナメル皮膜は絶縁物として考えない。
- ② 1次、2次巻線の間には0.4 mm以上の絶縁物を入れるか、IEC60950で規定される強化絶縁（reinforced insulation）を入れること。
- ③ 1次、2次巻線の間に入れる強化絶縁は3層以上の絶縁物で、かつ3層のうちの任意の2層で規定の耐電圧試験に合格するものでなければならない。（この場合は厚さの規定なし）
- ④ 1次、2次巻線の間には規定の沿面距離（creepage distance: 2つの導電部間又は導電部と機器の境界面との最短経路）を確保すること。

以上の規制により従来のエナメル線を使用したスイッチングトランスは図1のように1次、2次巻線間に3層の層間テープと沿面距離を確保するためのバリヤーが挿入された構造で小型化が阻害され、製造コストもかかるものとなっていた。

そこで考え出されたのが、電線自体に強化絶縁機能を持たせた、3層絶縁電線である。この3層絶縁電線もIEC60950に規定があり、この規定を満たすもののみ強化絶縁の認定を受けることができる。

3層絶縁電線を使用するとトランスの構造を図2のようにすることができる。つまり、1次、2次巻線間の層間テープが

* 巻線事業部 技術部 開発課

*2 環境・エネルギー研究所 高分子材料技術センター

*3 自動車部品事業部 開発推進部

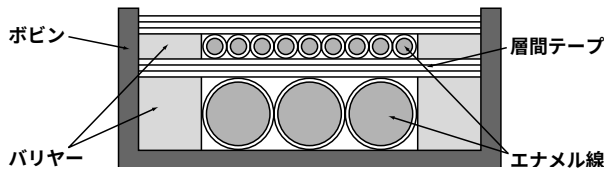


図1 従来のトランスの構造
Construction of conventional transformer

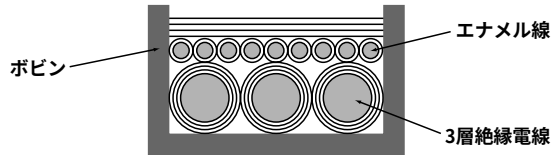


図2 3層絶縁電線を使用したトランスの構造
Construction of transformer using triple insulation wire

不要となり、更に導体全体が強化絶縁に覆われるので沿面距離が発生しなくなるのでバリヤーの挿入が不要となる。このことによりトランスの小型化が可能となり、更に層間テープの巻き付けやバリヤーの挿入の工数を削減することが可能となるのである。

当社はこのような考えに基づき、3層絶縁電線TEX-Eを開発し、世界各国で広く供給するに至った。

3. TEX-Fの開発

ところが最近では一部機種で更なる小型化の要求が強まってきている。それに伴い、発熱量が大きくなったり、放熱しにくい構造になったりすることで、機器内部の温度もTEX-Eの対応できるE種120℃からB種130℃、F種155℃へと上昇する事例が出るようになってきた。

3.1 開発目標

そこで我々は高耐熱タイプの3層絶縁電線TEX-Fを開発することとした。その高耐熱3層絶縁電線TEX-Fであるが、開発目標としてはTEX-Eの特長を踏襲し、そのうえで耐熱性を上げるようにすることとし、以下の目標を設定した。

- ① 各国の安全規格認定を取得すること。
- ② 標準絶縁厚100 μm で安全規格要求の耐電圧値(3 kV・1分)を満足すること。
- ③ 標準皮膜厚100 μm でコイル加工に耐えうる巻線性を有すること。
- ④ 耐熱性F種155℃以上を有すること。

3.2 製造方法

製造方法についてはTEX-Eの開発時に電線製造方法の候補としてテープ巻、エナメル焼付、粉体塗装、押出の4種類を比較検討した。今回の高耐熱タイプにおいても選定基準は同じであるが比較結果を表1に示す。

まずエナメル焼付であるが前述のように安全規格IEC60950でエナメル皮膜は絶縁物として考えないという規定で安全規格上不適となる。またエナメル焼付と粉体塗装は技術的に開発目標の100 μm で3 kV・1分の耐電圧特性を長手方向に安定して得ることが困難であると判断される。

そこで選択肢としてはテープ巻若しくは押出ということにな

表1 高耐熱3層絶縁電線TEX-Fの製造方法の比較
Comparison of manufacturing processes of TEX-F

製造方法 特性	重要度	テープ巻	エナメル 焼付	粉体塗装	押出
安全規格	◎	○	×	△	○
耐電圧	○	○	△	×	○
巻線性	○	×	◎	△	○
製造コスト	○	×	△	○	○
総合評価		×	×	×	◎

るが、電気特性的には両者大きな差はないものと判断される。しかしながら巻線性の面ではテープ巻はテープのラップ箇所における凹凸や曲げ加工時のラップの浮きなどが懸念される。更に製造コスト面ではテープ巻は製造線速において限界があり、高線速製造には不向きである。特に細いサイズになると巻き付けピッチを短くする必要があるため、更にコストが上がってしまうことになる。

以上の結果、今回の高耐熱3層絶縁電線TEX-Fの開発においても押出法による製造検討を進めることとした。

3.3 絶縁樹脂

TEX-Eの絶縁樹脂は変性ポリエステルとポリアミドを選定したが、今回は耐熱温度130℃以上なのでいずれの樹脂も不適となる。そこで今回は市販の耐熱樹脂の押出実験を行い、次の項目について考慮して比較検討を行った。

- ・電線特性（電気特性、耐熱性、可とう性、外観、その他）
- ・押出加工性（作業性、高速押出性、その他）

- ・樹脂コスト

今回検討した耐熱樹脂

- ・耐熱ポリエステル系
- ・スルホン系
- ・耐熱ポリアミド系
- ・フッ素樹脂系

それぞれの樹脂の各特性をまとめたものを表2に示す。

まず、耐熱ポリエステル系樹脂であるが2種類検討した結果、一つは耐熱性不足、もう一つは電線の可とう性不良という結果になった。

つぎにスルホン系であるが3種類検討した。いずれも樹脂粘度が高く、細いサイズの製造が懸念される。また樹脂コストがやや高価なことが問題点としてあげられる。しかし、押出温度が高いものの作業性はほぼ問題なく、1種類を除いて高速押出も十分可能なレベルであった。そしてこの中でもスルホン系Cが電線に加工したときの外観にも優れることを確認した。

つぎに耐熱ポリアミドであるが1種類検討したが、樹脂粘度がかなり高く、高速押出性に問題があることを確認した。

最後にフッ素樹脂であるが、電気特性等の電線特性上は問題ないが、作業性はフッ素系分解ガスの発生、高速押出性は外観の悪化発生、樹脂コストもかなり高価なため、電線コスト的に問題があることを確認した。

以上の結果、我々はスルホン系Cを最終的に耐熱3層絶縁電線TEX-Fの絶縁樹脂として選択することとした。

ここでTEX-Eとスルホン系Cで製造した3層絶縁電線TEX-F

表2 TEX-Fの絶縁樹脂の選択
Selection of insulation resin for TEX-F

特性	樹脂	耐熱ポリエステル系A	耐熱ポリエステル系B	スルホン系A	スルホン系B	スルホン系C	耐熱ポリアミド	フッ素樹脂
電気特性		○	○	○	△	○	○	○
耐熱性		×	△	○	○	○	△	○
可とう性		○	×	○	○	○	○	○
外観		○	○	△	○	○	○	○
作業性		○	○	○	△	○	△	×
高速押出性		○	○	△	×	△	×	×
押出温度		280℃	350℃	370℃	400℃	370℃	340℃	300℃
樹脂コスト		○	○	△	△	△	△	×
総合評価		×	×	△	×	○	×	×

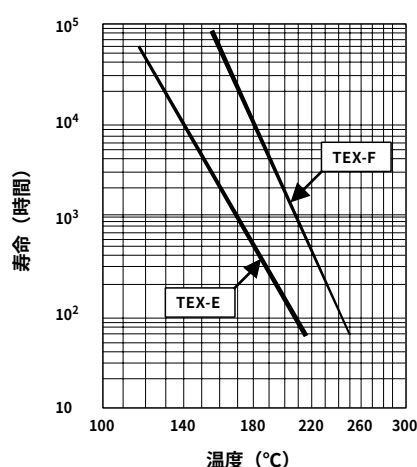


図3 TEX-EとTEX-Fの耐熱寿命
Temperature index of TEX-E and TEX-F

の耐熱性（IEC60172による）を比較したグラフを図3に示す。

このようにTEX-Fの耐熱寿命（20000時間換算値）はF種155℃以上あることが確認できた。

4. 高周波特性の向上

これまでTEX-Eについて、その使用箇所であるスイッチング電源内での条件、特に高周波数下における電線特性については検討がされていなかった。そこでTEX-E及び今回開発したTEX-Fについて、矩形高周波電圧発生装置（写真1）による部分放電発生電圧及びV-t特性の測定を行った。

表3にポリウレタンエナメル線（UEW）、TEX-E、TEX-Fの矩形高周波部分放電開始電圧の測定結果を示す。これは10 kHzの周波数下における部分放電開始電圧であるが、TEX-Fの部分放電開始電圧はTEX-Eより若干低くなることが確認できる。これは理論的に部分放電開始電圧が絶縁距離に比例し、樹脂の比誘電率に反比例することから、スルホン系Cの比誘電率が3.5とTEX-Eの絶縁皮膜である変性ポリエステル/ポリアミドの3.3より若干大きいことによると考えられる。

つぎに表4に矩形高周波V-tの測定結果を示す。表4によるとTEX-Eはコロナ放電が起こる高電圧領域においては比較的短時間で破壊が起こることが確認された。また、今回開発した



写真1 高周波V-t測定装置
High frequency V-t measurement device

表3 UEW, TEX-E, TEX-Fの部分放電開始電圧
Comparison of partial discharge inception voltage between UEW, TEX-E, and TEX-F

サンプル	1-UEW / 1-UEW	TEX-E / TEX-E	TEX-F / TEX-F
部分放電開始電圧 (kV) 10 kHz パルス幅8 μs	1.66	3.34	3.20

表4 TEX-E、TEX-Fの高周波V-t特性
High frequency V-t characteristic of TEX-E, TEX-F

サンプル	TEX-E / TEX-E	TEX-F / TEX-F
測定条件		
高周波V-t (分) 20 kHz, 10 μs 3.0 kV	100	430
高周波V-t (分) 20 kHz, 10 μs 3.5 kV	5	63

TEX-FについてはTEX-Eより良くなることが確認された。

ここでこの高周波V-t特性を向上させる手段として、皮膜に無機フィラーを添加させる方法が有効であることが分かっているので、このTEX-Fの絶縁皮膜にも無機フィラーを添加する

ことを検討した。無機フィラーについてはスルホン系Cとの相溶性に優れ、添加による電気特性や可とう性の低下が小さい無機フィラーを採用した。

この無機フィラーの添加による高周波V-t特性の変化を図4に示す。このように無機フィラーの添加により高周波V-t特性が大きく向上していることが確認できる。

この高周波V-t特性の現象については次のように推定できる。

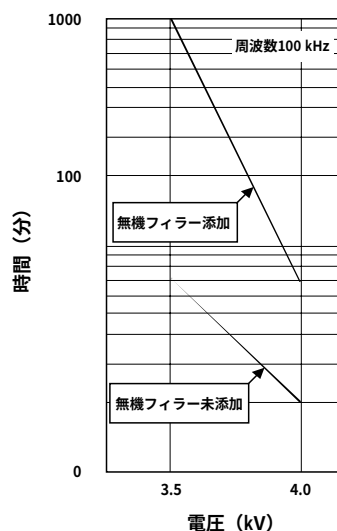


図4 無機フィラー添加によるTEX-Fの高周波V-t特性の向上
Improvement of high frequency V-t characteristic of TEX-F by addition of inorganic filler

表5 TEX-FとTEX-Eの特性比較

Comparison of characteristics of TEX-F and TEX-E

項目	TEX-E	TEX-F
導体径 (mm)	0.400	0.400
仕上外径 (mm)	0.600	0.600
皮膜厚 (mm)	0.100	0.100
絶縁破壊電圧 (kV)	23.4	28.6
半田付け性〔420℃〕 (秒)	3.0	半田付け不可
スパークテスト 〔3 kV〕 (個/30 m)	0, 0, 0	0, 0, 0
上昇軟化 (°C)	231	260
一方向摩耗 (N)	19.31	20.87
往復摩耗 (回)	285	1000<
静摩擦係数	0.125	0.250
耐溶剤性キシレン	3H	H
耐スチレンモノマー	3H	NG
Annex U.2.1	○	○
Annex U.2.2	○	○
Annex U.2.3 E種	○	○
Annex U.2.3 B種	△	○
Annex U.2.3 F種	×	○
Annex U.2.4	○	○
Modified Annex C E種	○	○
Modified Annex C B種	×	○
Modified Annex C F種	×	○

・絶縁皮膜の耐熱性の高いスルホン系Cのほうが高周波V-tの値が良い。

→これは高周波電圧がかかることで流れようとする電流が表皮効果により導体表面に集中し、これにより電線の抵抗値が上がり、線自体の温度が高温になるためと思われる。

・無機フィラーを添加することで高周波V-tが向上する。

→これは放電した電子が絶縁皮膜にアタックし、絶縁皮膜を削っていくためと推定される。

5. 特性

TEX-Fと従来タイプのTEX-Eについての主な特性の比較を表5に示す。表5のようにTEX-FはTEX-Eに対し、絶縁破壊電圧、耐摩耗性について優れていることが確認できる。また、安全規格上、必要となるIEC60950のAnnex U及びmodified Annex CについてはF種条件でも合格することが確認できた。しかしながら半田付け性は耐熱樹脂のため直接の半田付けは不可能で、皮膜剥離を前提としている。また、スルホン系Cの短所として一部の樹脂・溶剤に対し、クラックが入ることがあり、特にスチレン系の樹脂には適さないことが確認されている。

表6にTEX-Fと市販ワニスとの適合性を調べた結果を示す。表6のようにスチレン系樹脂を使用している含浸ワニスに対するTEX-Fのワニス適合性は良くないことが確認できる。それに対し、水溶性溶剤やガソリンを使用している含浸ワニスに対しては実用上問題の出るような特性の低下は認められない。いずれにしてもTEX-Fに含浸ワニスを使用する場合は適合性の確認が必要と考えられる。

6. 安全規格取得

TEX-Fは表7のとおり、各国の安全規格の認定を取得することに成功した。なお認定温度はULはA種105℃、その他はF種155℃である。ULについてはA種105℃を超える温度で使用する場合は電線のほかにポピン材料や絶縁テープ、含浸ワニス等を含めた絶縁システム (UL1446) による認定が別に必要となる。また、動作電圧 (working voltage) についてはVDEが700 V、その他は1000 Vとなっている。

表6 TEX-Fと含浸ワニスの適合性

Compatibility between TEX-F and impregnating varnishes

主絶縁材料	溶剤	絶縁破壊電圧の残率 (%)			
		加熱なし	130℃ ×7日	155℃ ×7日	180℃ ×7日
オリジナル	—	100	107	101	104
ポリエステル系	水	105	95	92	99
アルキド系	ガソリン	110	106	112	78
アルキド系	キシレン	80	90	90	90
不飽和ポリエステル/スチレン	なし	37	30	24	13

表7 TEX-Fの安全規格取得状況
List of safety codes that certificate TEX-F

認定機関	国名	取得規格
UL	アメリカ	UL1950
CSA	カナダ	IEC60950 IEC60065 CSA C22.2 No.1 950
VDE	ドイツ	IEC60950 EN60950 IEC60065 DIN VDE 0860 HD 195 S6
TUV	ドイツ	IEC60950 DIN EN 60950 VDE 0805 IEC60065 DIN EN 60065 VDE 0860
BSI	イギリス	IEC60950 BS EN60950 IEC60065 BS EN60065
NEMKO	ノルウェー	IEC60950 IEC60065

7. おわりに

高耐熱（F種: 155℃）3層絶縁電線TEX-Fの開発し、各国の安全規格の認定取得に成功した。本開発のTEX-Fにおいては更に高周波V-t特性を改良することにも成功し、トランスの安全性を向上させることができるものと考えられる。

今後の課題として、ポピン材料、絶縁テープなどを含めた絶縁システム（UL1446）の取得、耐溶剤性、半田付け性を改良した新電線の開発を行っていく予定である。