

高圧回転機コイル絶縁の耐電圧寿命

Voltage Endurance of Coil Insulation for High Voltage Rotary Machines

松下祐三* Yuhzoh Matsushita · 佐々木洋敏* Hirotooshi Sasaki · 前田孝夫** Takao Maeda

I. まえがき

高圧回転機コイル絶縁の主絶縁材には、古来、マイカが用いられている。それは、マイカが高圧回転機コイル絶縁で必要とする電氣的、熱的、化学的、機械的諸特性に対して、最もバランスのとれた絶縁材料とされているためであり、その優れた特性は、これまでの長年の実績で証明されている。しかし、マイカといえども長期の強い部分放電には侵されて破壊することもありうる⁽¹⁾。最近のマイカ絶縁は、合成樹脂の適用によって、かつての天然樹脂を用いていたものに比べて特性が格段に向上しているものの、大容量化、高電圧化、小形化に伴って使用電界は高まり、また、熱的・機械的条件などの間接的な条件も厳しくなっている。加えて、使用分野の拡大、多様化に伴って回転機の責務が更に重要になり、その信頼性についてもより高いものが要求されている。

絶縁の信頼性の評価や合理的な設計、製造を行うためには、当然のことながら、信頼性評価方法の確立が必要とされる。このため、絶縁の耐電圧寿命評価方法についての研究が各方面で盛んに行われており、近年、電圧劣化現象や機構の解明が進み、 $V-t$ 特性（耐電圧寿命特性）の規則性や特徴が明らかにされ^{(3),(4)}、また、信頼性工学の手法を取り入れることによって、著しい発展を遂げている⁽⁵⁾。

本稿では、高圧回転機コイル絶縁の耐電圧寿命評価方法に関する当社の研究の一端を紹介する。

まず $V-t$ 特性の規則性や特徴を述べ、併せて各種マイカ絶縁の $V-t$ 特性を紹介する。次いで、最近注目されている残存破壊電圧- t 特性^{(6),(7)}についての検討結果を紹介する。

II. $V-t$ 特性

1. $V-t$ 特性の表示式

$V-t$ 特性試験は、絶縁の耐電圧寿命を評価する方法として古くから行われている。その表示式としては、式(1)で代表される指数則と式(2)で代表される逆 n 乗則による種々の経験式が提案されている^{(3),(4)}。

$$t = K \cdot \exp(-nV) \dots\dots\dots(1)$$

$$t = K \cdot V^{-n} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

t : 寿命時間

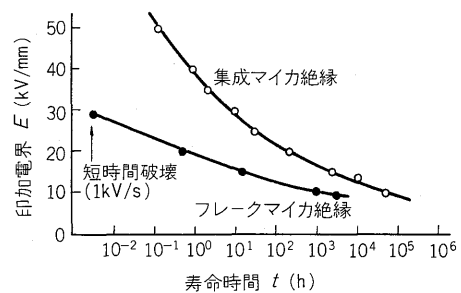
V : 印加電圧 (電界 E を用いてもよい)

n : 直線の傾きを表す定数 (絶縁構成や劣化要因によって決まる定数)

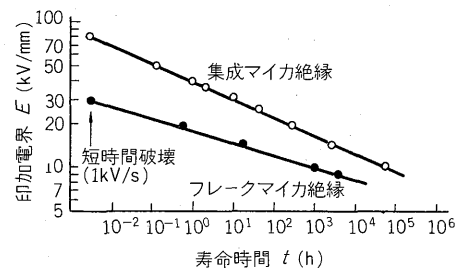
K : 定数

これらについて加速試験法の見地から比較すると、実測値との適合性や実用性などの点で、逆 n 乗則の方が優れている^{(3),(4)}。

第1図はその一例で、指数則表示では印加電界の範囲が広がると直線からずれるのに対し、逆 n 乗則では広い範囲にわたってきれいな直線関係が得られている。



(a) 指数則表示 [$t = K \cdot \exp(-nE)$]



(b) 逆 n 乗則表示 [$t = K \cdot E^{-n}$]

第1図 $V-t$ 特性の表示式

Fig. 1. Expressions of $V-t$ characteristics

2. 逆 n 乗則とワイブル分布の関係

前述の逆 n 乗則はまた絶縁破壊の確率から導き出すことができる。すなわち、電圧 V 、時間 t の二つの確率変数を持つ破壊確率は、次式の拡張ワイブル分布で表すことができる。

$$F(V, t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{V}{V_0} \right)^{m_v} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^{m_t} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

$F(V, t)$: 電圧 V 、時間 t における累積破壊確率

m_v : 電圧 V に関するワイブル形状パラメータ

m_t : 時間 t に関するワイブル形状パラメータ

* 中央研究所 第二部 ** 中央研究所 第一部

V_0, t_0 : 定数

式(3)において、累積破壊確率 $F(V, t)$ が一定値の場合の V と t の関係は次式となる。

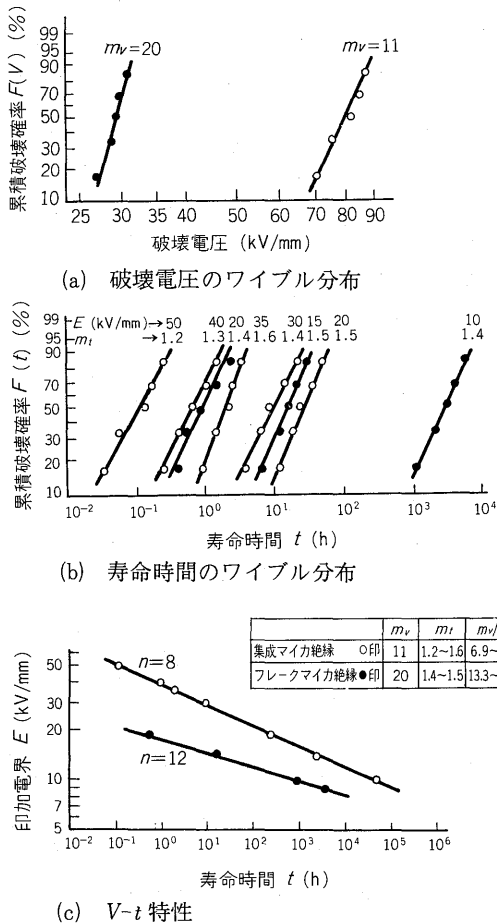
$$V^m \cdot t^{m_t} = K \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を変形して、

$$t = K \cdot V^{-m/m_t} \dots\dots\dots(5)$$

ここで $m_v/m_t = n$ と置くと前述した式(2)となる。

第2図にこの関係が成立する例を示した。測定点数が少ないくらいはあるが、破壊電圧及び寿命時間のワイブル分布から求めた n 値は $V-t$ 特性の n 値とほぼ合致している。



第2図 ワイブル分布と $V-t$ 特性の関係
Fig. 2. Relation between Weibull distribution and $V-t$ characteristics

3. 逆 n 乗則における n の値

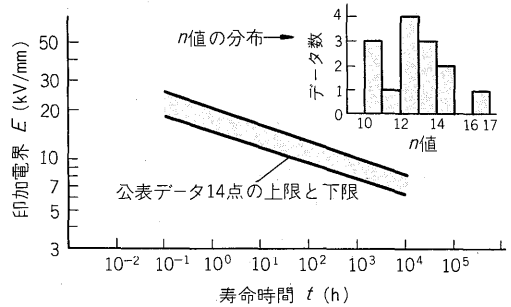
逆 n 乗則における n の値、すなわち $V-t$ 特性の傾きは、絶縁の種類及び劣化要因の種類によって決まるもので、一般に「劣化→破壊」の損傷プロセスが部分放電劣化の場合には小さく(3前後)、トリッキング劣化の場合には大きい(10前後)。

1) フレークマイカ絶縁の n 値

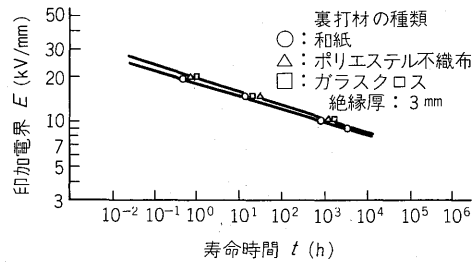
第3図は、フレークマイカ絶縁コイルの $V-t$ 特性について、公表されたデータを整理したものである(絶縁はすべてエポキシ真空含浸方式によるものであり、絶縁厚

さは約3~4mmである)。 n 値及び寿命時間ともに、後述する集成マイカ絶縁に比べてばらつきが少ない。 n の平均値は約12で、損傷プロセスがトリッキング的であることを示している。

樹脂含浸方式の絶縁に用いるマイカテープの裏打材には、和紙、ガラスクロス、ポリエステル不織布が用いられている。第4図はこれらの影響を調べたものであるが、同図に見られるように裏打材の種類による差はない。



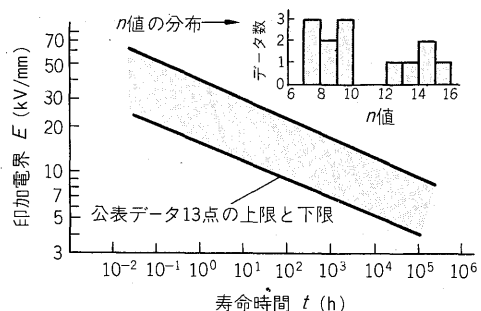
第3図 フレークマイカ絶縁コイルの $V-t$ 特性
Fig. 3. $V-t$ characteristics of flake mica insulating coils



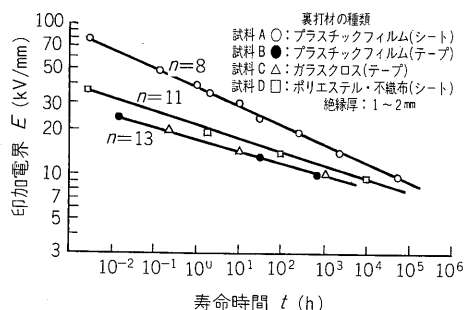
第4図 フレークマイカ絶縁コイルの $V-t$ 特性
Fig. 4. $V-t$ characteristics of flake mica insulating coils

2) 集成マイカ絶縁の n 値

第5図は、集成マイカ絶縁コイルの $V-t$ 特性について公表されたデータを整理したものである(絶縁はエポキシ樹脂真空含浸方式によるものとプリプレグ方式によるものであり、絶縁厚さは2mm前後である)。 n 値及び寿命時間ともに、前述のフレークマイカ絶縁コイルに比べてばらついている。この原因は、以下に述べるように裏打材や製造条件の影響によるものである。



第5図 集成マイカ絶縁コイルの $V-t$ 特性
Fig. 5. $V-t$ characteristics of mica paper insulating coils



第6図 集成マイカ絶縁コイルのV-t特性
Fig. 6. V-t characteristics of mica paper insulating coils

第6図に裏打材及び製造条件が異なる4種類のプリプレグ方式集成マイカ絶縁コイルのV-t特性を示した。

試料Aの絶縁は、裏打材がプラスチックフィルムの集成マイカプリプレグシートを巻き付け、高度のプレス成形を行ったものである。

- (1) 絶縁層が極めて緻密である。
- (2) シート巻きのためテープ巻きのラップ部のような弱点がない。
- (3) 裏打材が高耐圧である。

このため、非常に高い絶縁耐力を有している。弱点がないのでトリイニング的な劣化の急速な進展はない。しかし、全くのボイドレスではないので部分放電劣化が徐々に進展する。第6図のV-t特性はこのような劣化のパターンを表している。

試料Bの絶縁は、材料構成は試料Aと同じであるが、テープ巻きで、プレス成形も簡単に行ったものである。このため、短時間の絶縁耐力はAコイルに比べてかなり低い。これは、ラップ部の弱点を縫って放電路が容易に進むためである。V-t特性のn値は13で、損傷プロセスがトリイニング的であることを示している。

試料Cの絶縁は、裏打材がガラスクロス集成マイカプリプレグテープを用いたものである。この試料は、試料Bと全く同等の特性を示している。放電路は、フレークマイカ絶縁の場合と同様に、マイカテープに沿って伸びながら弱点部を探して貫層方向に進んでいる。

試料Bと試料CのV-t特性は、フレークマイカ絶縁の特性とほぼ同じである。

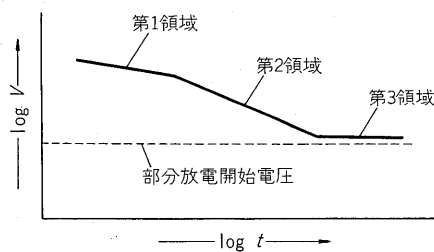
試料Dの絶縁は、シート巻きで、高度のプレス成形という点は試料Aと同じであるが、裏打材にポリエステル不織布を用いている。第6図における試料Aと試料Dの特性差は、この裏打材の影響によるものである。

以上、各種集成マイカ絶縁のV-t特性の相異を示したが、第6図から分かるように、裏打材や製造条件の影響は、高電界において著しく、低電界では少なくなっている。これは、高電界では沿層方向の放電の伸びが大きい

への放電はなくなってボイド放電だけが存在するようになり、そこでは耐コロナ性の優れたマイカの影響が強くなるためである。

4. V-t特性のパターン

印加電圧の範囲が広がり劣化機構が変わるとn値が変わり、V-t特性は1本の直線では表せなくなり、2本か3本の折れ線で近似されるパターンとなる。そのパターンは絶縁の構成や放電の様相によって幾つかに分類して考えることができるが、⁽³⁾基本的には第7図に示すような3本の折れ線で表される。



第7図 V-t特性のパターン
Fig. 7. A pattern of V-t characteristics

同図において、第1の領域は、電界や放電の集中度合が強くてトリイニング的な劣化を起こす領域である。この領域ではn値が大きい。また寿命時間のばらつきが大きく、ワイブル解析による劣化故障のパターンは偶発形(ワイブル形状パラメータ $m=1$)となる。

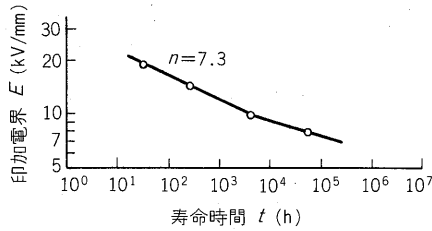
第2の領域は、ストリーマ的な強い放電は発生せず、部分放電劣化が主体となる領域である。この領域ではn値が小さくなる、また寿命のばらつきは比較的少なく、劣化故障のパターンは摩耗形 ($m>1$)となる。

第3の領域は、部分放電開始電界よりあまり高くない電界領域で、この領域では放電が弱く、発生頻度も少なく、かつ発生が不規則になるため劣化の進行が極めて遅くなる。そのため、寿命時間のばらつきが大きくなり、劣化故障のパターンは偶発形となる。またn値は大きくなる。

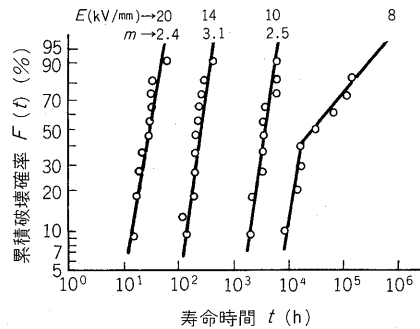
印加電界が部分放電開始電界より低い場合には、放電が発生しないので電圧劣化は全く起こらない。したがって、部分放電開始電界以下でのV-t直線は時間軸に平行になる。

マイカ絶縁では、その優れた耐コロナ性のため、第2領域が出現しない場合が多い。また第3領域が出現するにも非常に時間を要する。

第8図は、第3領域の兆候がみられたもののV-t特性と寿命時間のワイブルプロットである。第8図(b)に示すように、印加電界8kV/mmの場合に寿命時間が著しく長くなるものがでていますが、これは第3領域にかかっているためであろうと推察される。このような第3領域に入



(a) V-t 特性



(b) 寿命時間のワイブル分布

第8図 低電界におけるV-t特性の変化
Fig. 8. Variation of V-t characteristics at lower electrical field

る電圧は、絶縁の空隙の存在状態と耐コロナ性によって決まるものであり、マイカ絶縁の場合には、その耐コロナ性が優れていることから、部分放電開始電圧よりかなり高い電圧で、第3領域に入ると考えられる。

III. 残存破壊電圧-t特性

前述のV-t特性は、一定電圧を長期間印加したとき、その電圧で破壊するまでの時間を求めるものである。これに対して、残存破壊電圧-t特性は、一定電圧を長期間印加したときの、破壊電圧の経時変化を求めるものである。ところで、実機における絶縁破壊は、運転電圧での劣化によって絶縁耐力が異常電圧を下回ったときに起こる。この意味で、残存破壊電圧-t特性は実際的であるといえる。また、V-t特性試験では試料が破壊するまで課電しなければならないのに対し、残存破壊電圧-t特性試験では、それより短い課電時間で寿命の推定が可能である⁽⁷⁾。

この残存破壊電圧-t特性は、V-t特性が逆n乗則に従うとして、累積損傷モデルを用いた次式が導かれている^{(6),(7)}。

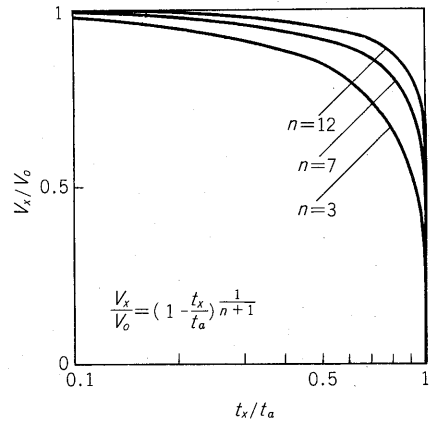
$$V_x = V_0 \left(1 - \frac{t_x}{t_a} \right)^{\frac{1}{n+1}} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

- V_x: 課電時間t_xで求めた残存破壊電圧
- V₀: 課電前の初期破壊電圧
- t_a: 長期課電したときの寿命時間
- n: V-t特性 (t = K · V⁻ⁿ)におけるn値

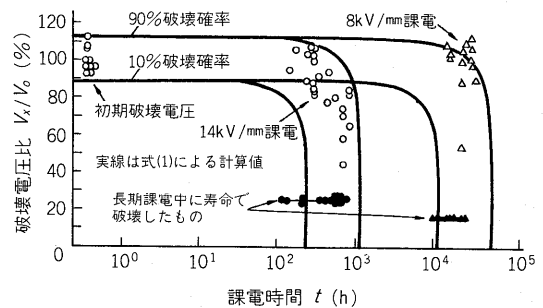
式(6)の残存破壊電圧-t特性は、n値によりその傾向が異なる。その様子を第9図に示す。

プリプレグ方式の集成マイカ絶縁コイルの残存破壊電



第9図 n値と残存破壊電圧-t特性
Fig. 9. Remaining BDV-t characteristics and n values

圧-t特性の一例を第10図に示す。残存破壊電圧は、課電時間の経過とともに次第に低下する特性とはならず、課電寿命における寿命に至る少し前まで初期の破壊値と同程度の値を有しており、課電寿命の直前になって著しい低下を示す。



第10図 集成マイカ絶縁の残存破壊電圧-t特性
Fig. 10. Remaining BDV-t characteristics of mica paper insulation coils

この供試コイルは、第8図に示したV-t特性の供試コイルと同種のものである。第8図のV-t特性のn値(7.3)を用い、また、初期の破壊電圧V₀及び課電寿命t_aの破壊確率10%あるいは90%の値を用い、式(6)によって、ばらつきを考慮した残存破壊電圧-t特性を求めた結果を第10図に併記した。実測値は計算値の10%と90%破壊確率の範囲に大体入っている。これより実測された残存破壊電圧-t特性は、式(6)の理論式にほぼ従うと判断される。なお、8kV/mm印加の場合、計算曲線から実測値が若干はずれたものも見られるが、これは、II章4で述べたように、この供試コイルは8kV/mmで第3領域(部分放電が弱く、また不規則なため寿命が極度に長くなる領域)に入るため、第8図(b)のワイブル分布の8kV/mmのデータで、長時間側に折れ曲がった部分と対応するものであると推察される。

マイカ絶縁の残存破壊電圧-t特性の一例を紹介したが、この方法は電圧劣化と熱劣化や機械的劣化などの複合

劣化試験に有用であり、現在これらの試験を行っている。

IV. あとがき

高圧回転機コイル絶縁の耐電圧寿命に関し、 $V-t$ 特性及び残存破壊電圧- t 特性の規則性や特徴について述べた。また、種々のマイカ絶縁コイルの耐電圧寿命特性を紹介した。 $V-t$ 特性、残存破壊電圧- t 特性は、経験則の域を出ないが、実用的にはもちろん有用なものである。今後更にデータを蓄積し、評価の精度の向上、試験の効率向上を図り、それによって、更に信頼性の高い絶縁システムの開発、合理的な絶縁設計を行って行く所存である。

参考文献

(1) 井関・倉橋：固体複合絶縁の構成と考え方，昭51年電気四学会連合大会 No. 103

(2) 井関：絶縁劣化と絶縁寿命，電学誌 **95**，No. 5（昭50）
 (3) 井関ほか：絶縁の電圧劣化に関する考察，昭46年電気四学会連合大会 No. 219
 (4) 井関ほか：絶縁の $V-t$ 特性における表示式，昭48年電気学会全国大会 No. 275
 (5) 金子：絶縁の信頼性と寿命推定，電学誌 **95**，No. 5（昭50）
 (6) J. Artbauer：Elektrische Dauerfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit, ETZ-A Bd. 91, H, 6（1970）
 (7) 津久井：回転機絶縁における課電劣化寿命の早期推定法，電気学会論文誌 **94-A** No. 12（昭49）
 (8) L. Simoni：A New Approach to the Voltage-Endurance Test on Electrical Insulation, IEEE Trans. **EI-8**，No. 3（1973）
 (9) 前田ほか：マイカ絶縁の長期課電試験における残存破壊電圧特性，昭52年電気学会全国大会 No. 330

発明の紹介

電磁ブレーキ

（特許 第 848903 号）

この発明は、電磁石の励磁を断ったとき制動がかかる無励磁作動形の電磁ブレーキに関する。

従来のこの種電磁ブレーキでは、ばねによって制動力を得ているので、ブレーキライニングが摩耗すると制動力が変化し、しばしば制動部をギャップ調整する必要があるほか、保守作業に手間が掛かる欠点があった。

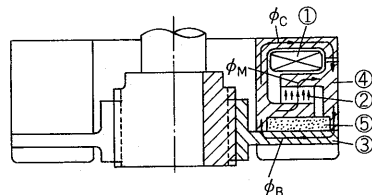
この発明は、永久磁石によって制動力を得るようにして、このような欠点を除き、保守の簡単な電磁ブレーキを提供するものである。

この発明では、図示のように電磁石コイル①を励磁したとき生じる磁束 Φ_C と永久磁石②で発生される磁束 Φ_M とが、制動円板③を互いに反対方向に通じ、かつ永久磁石を通る磁束 Φ_C が永久磁石の磁束 Φ_M と同一方向となるように、各磁束の極性及びヨーク④の形状が定められている。このため、電磁石コイルが励磁された状態では、制動円板を通る磁束 Φ_B は、 Φ_C と Φ_M が互いに打ち消し合って零となり、制動円板には制動力が生

じない。電磁石コイルが無励磁になると、制動円板には永久磁石による磁束 Φ_M だけが通るので、これによって制動力が生じる。

この発明によれば、制動力は制動円板とライニング⑤との間のギャップを通る磁束によって生じるので、ライニングの全部が摩耗してしまうまでギャップ調整が不要となり、保守が簡単となる利点がある。

なお、永久磁石を通る電磁石による磁束 Φ_C は永久磁石の磁束 Φ_M と同一方向に選ばれているので、永久磁石が電磁石によって減磁されることもない。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。