UDC 621.313.1.045.5.043.2: 620.199.5
621.315.611.011.5: 621.3.017.143

論 文

48-A 55

高電圧巻線の加速熱劣化と $\tan \delta$ 極大現象

日立製作所 松 延 謙 次
日立製作所 兼 子 慶 市
日立製作所 磯 部 昭 二

1. ま え が き

発電機用高電圧巻線の熱的劣化は、ヒートサイクル⁽²⁾や電氣的劣化⁽¹⁾とともに重要な絶縁劣化の要因である。一般に高電圧巻線のような複合絶縁物が熱劣化をうけると含浸樹脂などの有機物が熱分解し、絶縁強度が低下する。最近、大形回転機においても高分子絶縁材料の発達により、絶縁の最高許容温度を 155°C (F 種)とし、機器の容量アップも行なわれるようになってきた。また一方において、新しい高分子材料のすぐれた性質を利用して機器寿命を考えた合理的絶縁設計を行なうための研究も進められている。

しかしながら、高電圧巻線の熱劣化については、あまり系統的研究は行なわれていない。これらの観点から高電圧巻線の熱劣化機構を解明し、巻線の電氣的性能との関連性を明らかにすることは、絶縁設計上また運転機器の絶縁劣化の判定上、重要である。

本報では高電圧巻線に加速熱劣化を与えた場合の誘電正接、静電容量、形状変化など種々の物理量の時間的变化を追跡し、これらの劣化現象が熱分解物の生成と拡散のバランスにより、系統的に説明できることを明らかにしたものである。

また、相対寿命の温度依存性については反応速度論がよくあてはまることを示唆した。本報の結果は、加速熱劣化試験および現場の絶縁診断に有効な資料を提供するものと信ずる。

Thermally Accelerated Life Test and its $\tan \delta$ Swinging of High Voltage Stator Windings. By K. MATSUNOBU, Member, (Hitachi Works of Hitachi, Ltd.), K. KANEKO, Member, (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.) & S. ISOBE, Member (Hitachi Works of Hitachi, Ltd.).

松延謙次: 正員, 日立製作所日立工場, 回転機絶縁担当
兼子慶市: 正員, 日立製作所日立研究所, 電気絶縁担当
磯部昭二: 正員, 日立製作所日立工場, 回転機絶縁担当

2. 相対的絶縁寿命の決め方

絶縁寿命に関しては経験的に各種の実験式や 10 度半減則などが用いられてきたが, Dakin 氏⁽³⁾が反応速度論による説明を応用して以来, 広くこの評価方法が使用されている。反応速度論によると, 反応速度は一般に次のように書ける。

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに, C : 反応物質の濃度, t : 反応時間,

K : 反応速度定数, n : 反応の次数

簡単な熱的劣化の場合には一次反応と仮定できる場合が多く, $n=1$ として積分すると次のようになる。

$$\log C = -Kt + \text{const} \dots\dots\dots (2)$$

絶縁物の熱分解によって生じる物理量の変化が絶縁材料の熱分解の度合いに比例すると仮定すると, 物理量 P は次式のようになる。

$$\log P = -Kt + \text{const} \dots\dots\dots (3)$$

$t=0$, すなわち初期の物理量を P_0 とすると,

$$\log (P/P_0) = -Kt \dots\dots\dots (4)$$

となる。速度定数は Arrhenius 氏の式により

$$K = A \exp(-E/RT) \dots\dots\dots (5)$$

A : 定数, R : ガス定数, E : 反応の活性化エネルギー, T : 絶対温度(°K)

Whitman 氏⁽⁴⁾は絶縁材料の寿命の温度依存性を次式によって示した。(4), (5)式においてある物理量が $P_1 = BP_0$ となったときを相対的絶縁寿命と定義すると次式のようになる。

$$\log L = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \log \left(\frac{1}{A} \log \frac{1}{B} \right) \dots\dots\dots (6)$$

白井氏⁽⁵⁾は従来から用いられた 10 度則などの温度

則との関連性をみるために、 $T(^{\circ}\text{K})$ から $\Delta T(^{\circ}\text{K})$ 上昇することにより、寿命が $1/a$ となった場合の a と ΔT の関係を求めた。すなわち、

$$\Delta T = T^2(R/E) \log a \quad (7)$$

$$\Delta T = 10 \log a / \log 2 \quad (8)$$

10 度則は (8) 式のようになり、広い範囲においては適用されない。

一般に絶縁物の絶対寿命は絶縁劣化により絶縁耐力が低下し、使用電圧に耐えなくなった点をもって定義される。しかしながら、絶縁耐力そのものによる評価は実際的にむずかしいため、絶縁の劣化とともに変化する物理量の変化、たとえば $\tan \delta$, C , 絶縁物の重量減少、形状変化などにより、相対的に絶縁劣化速度を比較する方法がとられている。本報では、絶縁耐力以外の物理量から求めた相対的絶縁寿命について加速熱劣化の等価性とそのメカニズムについて述べる。

3. 含浸樹脂の熱分解速度

高電圧巻線の構成材料のうちマイカ、ガラステープは有機物に比しほとんど熱的に劣化せず、劣化は主に紙や含浸樹脂の熱分解によって進展する。第1図は含浸樹脂の熱分解を調べるための測定法の一例を示す。試料を加熱すると、最初未反応物質や低分子量物質など合成樹脂中の残留ガスが発生するが、時間の経過とともに急速に減少し、一定速度となる。第1図は空気中の酸素濃度に相当する酸素ふんい気において、硬化樹脂試料を一定温度に加熱し、発生する分解ガスをトラップするための装置である。一定時間に発生した試料をコールドトラップ E に送り、ふんい気ガスと分離する。分離された発生ガスは次にトラップ容器 A に移し、マススペクトロメータにて定性定量分析を行った。(6) マススペクトルの一例は第2図に示すように、分解ガスは主として H_2O , CO , CO_2 である。したがって、含浸樹脂の熱劣化や寿命を調べるにあたり、材料の主構成物質である炭素原子に着目して、 $\text{CO} + \text{CO}_2$ の発生量に着目することができる。測定結果

第1図 熱分解ガス捕集装置

Fig. 1. Apparatus for trapping thermally decomposed gases of resins.

第2図 レジンの熱分解によるマススペクトル
Fig. 2. Mass spectrograph of decomposed gases.

第3図 熱分解ガスの発生速度
Fig. 3. Rate of thermal decomposition.

第4図 熱分解速度のアレニウスプロット
Fig. 4. Arrhenius plots for thermal decomposition of resins.

を試料 1g から1時間に発生するガス量 $1l$, 0°C の容器に封入したときの圧力、すなわち $\text{mmHg} \cdot \text{l/h} \cdot \text{g}$ で表示すると第3図のようになる。そこで第4図のように含浸樹脂の分解速度 ($\text{mmHg} \cdot \text{l/h} \cdot \text{g}$ に比例) の対数表示をとると $1/T$ に対して直線関係が得られ、さきに述べた Arrhenius 氏の法則性がよく説明できる。

CO, CO₂ 以外の分解生成物の主要成分としては H₂O があるが、樹脂の構造、組成により H 原子の濃度が変化するために、H₂O の発生量も変化する。含浸樹脂の熱劣化においては反応速度論がよくあてはまることがわかる。

4. 高電圧巻線の絶縁劣化

〈4・1〉 重量および形状変化 第5図は試料を一定温度ふんい気中において劣化を与えた場合の重量変化を示す。重量変化は試料中の絶縁物量を 100 として示した。劣化の初期には比較的大きい重量変化率を示しているが、長時間側においては $\Delta W(t)$ を重量変化率とすると $\log \Delta W(t) \sim t$ は直線性を示す。最初 10 日目くらいまでの変化率が大きいのは、含浸レジンの場合と同様に、絶縁組織中に残存する低分子物質の影響を考えなければならない。もう一つの要因は、絶縁組織においては含浸レジンがマイカ、ガラスなどの無機物によって、ふんい気ガス、すなわち酸素からシャ断されることと絶縁厚が厚いために内部における劣化が抑制されるためである。したがって、絶縁物の劣化速度は劣化段階において異なってくる。第5図のように、長時間側では $\log \Delta W$ と t の関係は比較的良好な直線性を示しており、(2)式に一致している。これらの熱分解が巻線の電気的性質に及ぼす影響についてあとに述べる。

重量 170 g, 長さ 50 mm に切断した 11 kV 巻線サンプル

第 5 図 熱的劣化による巻線の重量減少特性
Fig. 5. Weight loss curve for insulations.

重量 170 g, 長さ 50 mm に切断した 11 kV 巻線サンプル

第 6 図 熱的劣化による巻線の形状変化特性
Fig. 6. Deformation of insulating winding by thermal deterioration.

次に加熱劣化による高電圧巻線の形状変化を第6図のように $(W - W')/W' \times 100$ で示すと、加熱によって含浸樹脂の強度が低下することにより寸法の膨みが増大する方向に進む。この場合、寸法変化に対しては2つの要因が関係する。一つは含浸樹脂接着力の温度特性により、試料をある温度以上に上げると樹脂の接着力が急激に低下するために、マイカフレークの曲げ応力により巻線の膨みが増大することである。加えて含浸樹脂の経時熱劣化による寸法膨みが与えられる。耐熱性および接着力がポリエステルに比較して高いエポキシ樹脂 A₁B₁ は加熱劣化とともに徐々に寸法変化が進行している。第6図にはエポキシを含浸した高電圧巻線の寸法変化を示すが、これからわかるように A₁B₁ ではある時間後に明らかな寸法変化の変曲点が見られ、その出現点は劣化温度が高いほど早い。これらの変化は明らかに時間依存性があることから、樹脂の熱分解に基づくものと解釈することができる。また、これらの変曲点が樹脂の熱分解に基づくものであれば、さきに述べた重量変化とも関連があるはずである。A₁B₂ のように裏打機がガラスの場合には、含浸樹脂との接着力がいくぶん低く、形状変化は早く進行する。比較的高温特性の低い不飽和ポリエステル巻線 (A₄B₁) を加熱劣化した場合、形状変化は劣化の初期に大きい。これは含浸樹脂の高温における接着力が低いために、初期状態で高温下におくことによりボイドの発生が進んだものである。

〈4・2〉 誘電正接特性の変化 高電圧巻線の電気的性状を非破壊的に知る方法として、 $\tan \delta$ の測定は最も一般的に用いられているが、第7図はエポキシ樹脂 A₁ 含浸フレークマイカの 11 kV 高電圧巻線の加熱による $\tan \delta$ の変化を示す。なお、 $\tan \delta$ の測定はいずれも劣化温度で行なった。加速劣化のために 130 ~ 180°C の高温を使用した。いずれの場合においても

第 7 図 熱劣化による $\tan \delta$ の変化(劣化温度で測定)

Fig. 7. $\tan \delta$ -time curves for thermal deterioration of insulating windings.

も $\tan \delta$ -劣化時間特性は極大値を示している。極大値の発生する時間は高温の劣化ほど短時間側にあり、低温ほど長時間側に移る。 $\tan \delta$ 極大値 ($\tan \delta_{\max}$ と略) の出現する時間帯を各温度について第6図フレックマイカー紙に示した巻線の形状変化の変曲点と比較すると、それぞれ良い対応性を示していることがわかる。すなわち、180°C では1~2日付近、150°C では5~6日付近、130°C では40~50日付近である。(両者の試料は長さにおいて異なっているために変化点の絶対日数は少し相違がある) $\tan \delta_{\max}$ の出現点は巻線の形状変化すなわち寸法増大点と強い関連性を示す。 $\tan \delta_{\max}$ 出現は高電圧巻線の絶縁劣化機構に重要な手がかりを与えるが、その発生機構は次のようなプロセスで考えられる。

(1) 熱分解ガスの発生 含浸樹脂の熱分解は第4図に示すように Arrhenius 氏の速度論に従った温度依存性を示す。また裏打ち機として紙を使用した場合には第6図に示したように紙の熱分解ガスも発生すると考えねばならない。もし絶縁体が気密であれば、これらの分解物は不純物(分解により生成した固体、液体、ガスをさす)として、ボイドや絶縁物中に蓄積する。

(2) 熱分解生成物の拡散 $\tan \delta_{\max}$ の出現点が巻線の形状変化の変曲点にはほぼ一致していることから熱分解物(ガスを含む)の蓄積による絶縁体内の圧力の増加、および含浸樹脂の熱劣化によるマイカ間の接着力の低下にするボイドの発生により、外気への分解物の拡散が生じる。すなわち、水分や極性の分解物などの絶縁物内における蓄積により、イオン性物質が増加し $\tan \delta$ は増大する。分解物の蓄積と分解による含浸樹脂の接着力の低下により、ボイドが発生し ($\Delta \tan \delta$ が増大し) 外気へのガスの拡散速度が増大すると、分解物はガス化して拡散しうる。

いま、蓄積される熱分解生成物の濃度を $C(t)$ 、分解物の生成速度を $v_g(t)$ 、外部への拡散速度を $v_d(t)$ とすると次の関係がある。

$$C(t) = \int_0^t \{v_g(t) - v_d(t)\} dt \quad \dots\dots\dots (9)$$

$v_g(t) > v_d(t)$ の領域においては、分解物濃度 $C(t)$ は増加することがわかる。したがって、 $\tan \delta$ は増加する。 $v_g(t) \approx v_d(t)$ で $C(t)$ はピーク値をとり、 $\tan \delta$ もピークを示す。 $v_g(t) < v_d(t)$ では蓄積された分解物は外部に拡散されるので $C(t)$ も減少し、 $\tan \delta$ は減少曲線となる。ただし、発生したボイドは熱分解の進展によりさらに増加する。たの結果、生成物の拡散速度 $v_d(t)$ はさらに増大することになる。 $v_g(t) \leq v_d(t)$

第8図 合成レジン巻線の熱的劣化による $\tan \delta$ の変化

Fig. 8. $\tan \delta$ -time curves for insulating windings.

の領域において蓄積分解物 $C(t)$ が0になると、発生したボイドは大気に置きかえられた状態になり、 $\tan \delta$ は減少するはずである。すなわち、分解物との複合体が大気とのそれに近づいた場合、明らかに後者の $\tan \delta$ 値は低下する。したがって $C(t) \approx 0$ 、 $v_g(t) \leq v_d(t)$ の領域は第3段階ステップとなる。(これらのモデルを第16図に示す)

以上のようなメカニズムはもちろん、加速劣化による可酷な条件を与えた場合であり、これらの現象が実際の巻線でどう現われるかは、大変興味がある。そこで、さらにこのメカニズムを確かめるために各種の絶縁構成について調べた。第8図をみるとポリエステル A_1 巻線 (A_4B_2 , A_4B_1) では含浸樹脂の耐熱性が低いことから、180°C 劣化ではすでに初期の状態において大きな寸法増大を示した。すなわち、初期においてすでに絶縁体内部へのボイドの生成が進み、分解物が外部へ拡散しやすい状態になることがわかる。このため、 $\tan \delta_{\max}$ の値は測定点では顕著に現われていない。150~130°C における $\tan \delta_{\max}$ もゆるやかな曲線で発生している。(ポリエステル A_2 についても同じような性状変化を示した) 同じ含浸樹脂を用い裏打ち材をガラスクロスにした場合、明確な $\tan \delta_{\max}$ は現われず、劣化曲線は平らである。この理由は裏打ち材の劣化がないことにより、分解物が減少することおよび第6図に示した例のようにガラス-樹脂の接着力が劣り、ボイドができやすいためである。また、裏打ち材がガラスの場合でも、180°C で行なったエポキシ A_1 巻線 (A_1B_2) については $\tan \delta_{\max}$ が現われ、 $\tan \delta_{\max}$ の出現は(9)式に述べた分解物の発生速度とその拡散速度のバランスにより変化することを示している。

〈4・3〉 絶縁劣化に対するスロットギャップの影響

高電圧巻線は実際の使用においては鉄心内のスロットにそう入される。スロットを巻線間には巻線の固定

第 9 図 熱劣化に及ぼすスロットギャップの効果

Fig. 9. Effects of slot-gap for thermal deterioration.

および接地をよくするためにスロットライナーが用いられる。したがって、強く固定される場合、絶縁体の形状変化に対する影響が生じてくる。第 9 図は巻線とスロット間のギャップ（これを α と略する）の大小による劣化状態の変化を調べたものである。スロットギャップをなくした場合、（すなわち、巻線の寸法とほぼ同一のスロットを用いた場合）高電圧巻線の寸法変形は抑制される。つまり絶縁層の膨張がおさえられ、ボイドが発生しにくくなる。このために分解物は絶縁体内部に蓄積されやすくなり、 $\tan \delta_{\max}$ の発生は長時間側に移行する。つまり、相対的には変曲点は長時間側にシフトし、 $\tan \delta_{\max}$ は大きくなる。

逆にスロットギャップ α を 1mm とし、巻線の寸法変形が起こりやすい場合、ボイドが発生しやすくなり分解物の発生とともに分解物の拡散速度も増大するために $\tan \delta_{\max}$ は比較的小さい値をとり、（すなわち分解物の蓄積量は小さく）極大値発生点は短時間側で生ずる。ポリエステル A_1 , A_2 に比べて耐熱性が高いエポキシ A_2 絶縁においては、スロットギャップの影響はあまりなく、ゆるやかな $\tan \delta_{\max}$ を発生している。これは耐熱強度があるために、高温での形状変化がおさえられるとともに、分解物の発生も少ないためである。

〈4・4〉 絶縁劣化に及ぼす含浸剤の効果 第 10 図は 180°C における劣化時間と $\tan \delta$ 値の変化を調べたものである。含浸樹脂の種類によって $\tan \delta_{\max}$ の発生点が異なっていることがわかる。ポリエステル含浸巻線が 1~2 日に $\tan \delta_{\max}$ を発生するのにに対し、エポキシ $A_2(A_2B_1)$ では 60 日付近に山があり、耐熱性は相対的に 60 倍となっていることがわかる。エポキシ樹脂 A_2 にガラスクロス裏打のフレークマイカを用いると、 $\tan \delta_{\max}$ の発生は 170 日付近となり分解物蓄積量

第 10 図 含浸樹脂と巻線の $\tan \delta$ 変化

Fig. 10. Effects of impregnating resin for $\tan \delta$ -time curves.

第 11 図 高電圧巻線の曲型的劣化曲線

Fig. 11. Typical $\tan \delta$ changes by thermal deterioration of windings.

も減少し、 $\tan \delta_{\max}$ も小さい値となっている。

大容量発電機においては不飽和ポリエステル樹脂含浸巻線によりすでに長年の運転実績⁽⁷⁾があり、さらに耐熱性の高いエポキシ絶縁では絶縁性能の安定化が期待できる。

〈4・5〉 静電容量, $\tan \delta$, 絶縁強度の変化 第 11 図は $\tan \delta_{\max}$ の発生に伴う静電容量の変化、 $\Delta \tan \delta$ を示した。 $\tan \delta$ の上昇、降下とともに C (静電容量) も変化する。これは分解物の発生による水分などのイオン性物質の生成により、複素誘電率が増加するためである。また分解物が拡散するにはボイドの発生が必要となり、 $\Delta \tan \delta$ (定格電圧の $\tan \delta$ -2kV の $\tan \delta$ 値) が $\tan \delta$ 値のピークを境に増大している。スロットギャップがある場合には、形状変化がおさえられないために $\Delta \tan \delta_{\max}$ は初期から増大し、分解ガスの拡散が可能であるために $\tan \delta_{\max}$ の出現はない。劣化の進展によりボイドが生成すると見かけ上の誘電率は下がり $\tan \delta$ は減少する。第 11 図のスロットギャップ $\alpha=1$ の場合の結果はこれをよく説明している。

$\alpha=0$ の場合、〈4・4〉節で述べたように $\tan \delta_{\max}$ は長

第 12 図 $\tan \delta_{\max}$ における絶縁破壊の変化
Fig. 12. Changes of breakdown strength at L_0, L_1, L_2 .

時間側にシフトし、 $\tan \delta_{\max}$ は増大する。しかし、熱分解物の生成とともに含浸レジン強度も低下し、第 6 図で示したような形状変化の急増点をたどる。 ΔC 、 $\Delta \tan \delta$ がこの場合やはり極大値をとるが、この理由は先報⁽²⁾に示したように劣化過程におけるボイドの形状の変化によるものである。すなわち、劣化の初期においては導体-絶縁層界面の大きなボイドから劣化が進むにつれて絶縁層全体に細分化されて行くため、ボイド放電電圧が変化し、見かけ上 $\Delta \tan \delta$ が減少する。 $\tan \delta_{\max}$ の発生する時間を L_1 とし、その前後の時点それぞれ L_0, L_2 とすると第 12 図のようになる。

L_1 において $\tan \delta$ 、 $\Delta \tan \delta$ 、 C 、 ΔC は増大し、絶縁破壊強度は極小値をとる。(絶縁抵抗や成極指数も極小値をとる) これは熱分解生成物の蓄積が最大になった時点で絶縁性状が最も悪化することを示す。むしろ、ボイドの生成により分解物が外部に拡散したほうが絶縁強度や誘電特性には好ましい。このことは、 $\Delta \tan \delta$ の値の増大よりもイオン化電圧以下の $\tan \delta$ 値の増大が破壊強度に対してよい目安となるわれわれの経験によく一致している。第 12 図において、 $\alpha=1$ では BDV はほとんど低下していないが、これは $\tan \delta$ ピーク値の出現点が第 11 図のように 1~2 日にあり、ピーク値は非常に小さい。したがって、破壊強度には悪影響が小さい。 $\alpha=0$ ではピーク値は 30 日付近に出現し、その値も高く劣化も大きいため、破壊強度の低下も大きいことがわかる。

このようなことから、筆者がここで議論している $\tan \delta$ および関連する物理的性質は絶縁破壊強度の低下と深い関連があると考えられるが、破壊強度に関する詳細な検討は本報では取り扱わないことにする。

〈4・6〉 絶縁劣化に及ぼす絶縁厚さの効果 絶縁体中の有機物の熱分解は大気中酸素の絶縁層への拡散により影響をうける。第 13 図(a)、(b) は各種の絶縁構成に対してエポキシ樹脂を含浸した巻線について

第 13 図 エポキシ樹脂含浸コイルの熱劣化特性

Fig. 13. Thermal deterioration characteristics of epoxy insulating systems.

第 14 図 絶縁厚さによる $\tan \delta_{\max}$ と破壊強度の変化

Fig. 14. Thickness effects for $\tan \delta_{\max}$ and breakdown voltage.

$\tan \delta$ と絶縁破壊強度の変化を示した一例である。 $\tan \delta_{\max}$ は 180°C 100 日付近に発生している。

これから L_1 における $\tan \delta_{\max}$ と絶縁破壊強度を定格電圧ごとにまとめると第 14 図のようになり、わずかではあるが絶縁厚の薄い 6.6 kV 巻線のほうが劣化程度は大きい。これは絶縁が薄いほど酸化劣化をうけやすいためと考えられる。 $\tan \delta_{\max}$ の出現した 180°C では 100 日 20% での絶縁強度の低下がみられる。

5. 絶縁劣化に対する速度論の適用性

高電圧巻線中の含浸樹脂の劣化はマスペクトルの結果からわかるように、Arrhenius 氏の式によって説明でき、分解物の生成速度 w_g は速度論に従う。分解物の絶縁体外部への拡散はボイドの発生に関連し、その生成は樹脂自体の熱分解による接着力低下の他に、接着力の温度特性やスロットギャップの大小に影響されるので、加速温度の設定にはこれらの条件を考える必要がある。しかしながら、上に述べたメカニズムの考察から、電気性質の変化は複雑になるにもかかわらず、これらの絶縁劣化はある限られた温度領域では速度論に準則されていると考えてよい。

そこで 180, 150, 130°C における各特性の変化点を相対的に比較して第 15 図に示した。

マスペクトルによる各温度での相対的分解速度比、巻線の $\tan \delta$ が極大値を生じるまでの時間 L_1 、形状変化の変曲点、試料中絶縁物に対する重量減少が 0.4% になるまでの相対時間比を比較した。(ポリエステル巻線については、変曲点がなく樹脂の接着力による二次的効果ははいっているので除外した) これらの各方法による相対劣化比率はきわめてよく一致していることがわかる。

第 2 表は相対劣化比率より求めた活性化エネルギーであり、巻線の相対劣化の活性化エネルギーは含浸樹脂の活性化エネルギーにより決まることがわかる。

次に反応速度論による相対寿命と経験則との関係を

×: マスペクトロメータ, ○巻線の $\tan \delta_{\max}$ 値 (L_1),
●: 巻線の加熱減量 (減量 0.4% の時間変化), △: 形状変化

第 15 図 各種の物性値により評価した相対寿命の比較

Fig. 15. Relative life curves evaluated by masspectle of decomposition gases, $\tan \delta_{\max}$ weight loss deformation of winding.

第 1 表 高電圧巻線試料の構成一覧表

Table 1. Insulation systems of specimen bars.

含浸レジジン (A)		マイカテープ (B)	
A ₁	エポキシ A ₁	B ₁	フレックマイカ紙
A ₂	エポキシ A ₂	B ₂	フレックマイカガラス
A ₃	エポキシ A ₃	B ₃	フレックマイカ紙 +パルプマイカ紙
A ₄	ポリエステル A ₁	B ₄	パルプマイカガラス
A ₅	ポリエステル A ₂	B ₅	—
A ₆	ポリエステル A ₃	B ₆	—
A ₇	ポリエステル A ₄	B ₇	—

例: A₁B₁ はエポキシ A₁ 含浸フレックマイカ紙構成の高電圧巻線を示す。

第 2 表 活性化エネルギー

Table 2. Activation energy.

方 法	(レジジン)マ スペクト ロメータ (kcal/mol)	(コイル) $\tan \delta_{\max}$ 値	(コイル) 重量減少率*	(コイル) 形状変化点
ポリエステル A ₁	18.4	18.6	18.5	—
ポリエステル A ₂	25.5	26.0	25.5	—
エポキシ A	25.5	25.4	25.8	25.5
エポキシ B	21.6	23.0	21.6	21.6

*: 重量減少が 0.4% に達する時間から求めたもの。

第 3 表 活性化エネルギーと寿命半減温度 ΔT

Table 3. Activation energy and half life temperature.

E (kcal/mol)	T(°C)	100	110	120	130	140	150	160	平均 100 160
18.4	$\Delta T=11.0$	11.6	12.3	13.0	13.6	14.2	15.0	15.7	12.9
21.6		9.6	10.0	10.6	11.2	11.7	12.3	13.0	11.2
25.5		8.2	8.5	9.0	9.4	9.8	10.1	10.8	9.4

第 3 表に示した。表には、活性化エネルギーが 18.4 ~ 25.5 kcal/mol である場合に、相対劣化寿命が 1/2 になる温度を (8) 式によって計算して求めた。活性化エネルギーが 18.4 kcal/mol の場合、100 ~ 160°C の寿命半減温度の平均は約 13°C, 21 kcal/mol では 11.2°C, 22.5 kcal/mol では 9.4°C であり、かなり 10 度則に近い。一般に含浸樹脂の熱劣化の活性化エネルギーは 20 kcal/mol 前後であるので、10 度則はだいたい計算としては使用可能であると考えられる。

相対劣化曲線により、180°C の加速劣化は 130°C に対して約 100 倍の加速性がある。第 14 図より 180°C 100 日ではほぼ 20% の絶縁耐力の低下がある。これは B 種最高許容温度 130°C では 20 数年に相当する。

I : 含浸樹脂のキュア進行領域
II : 熱分解ガスの蓄積領域
III : 熱分解ガスの拡散による枯れの領域

第 16 図 高電圧巻線の熱劣化モデル

Fig. 16. Thermal deterioration model for high voltage windings.

6. む す び

本報では高電圧巻線の熱的絶縁劣化の機構の解明を試みた。試料を高温に保持し熱的に加速劣化することにより巻線絶縁物の重量変化、形状変化、誘電正接、絶縁破壊強度などの特性は劣化に伴って種々の形態をたどるが、これらの特性変化は加熱による有機物の熱分解物の発生とその拡散との均衡により系統的に説明しうる。これらの熱劣化モデルを第 16 図に示す。絶縁劣化過程を分けると大きく 3 段階に分けられる。

(1) 含浸樹脂の硬化の進行領域。含浸樹脂のキュアが進行し絶縁特性がさらによくなる領域。(加速劣化ではあまり明確でない。)

(2) 加熱により熱分解物が絶縁体内に蓄積される領域。ここでは分解物の発生速度は分解物の外部への拡散速度より大であり、分解物は絶縁体内に蓄積され $\tan \delta$ 、静電容量は増大し、絶縁抵抗、絶縁耐力は低下する。絶縁劣化とともに含浸樹脂が熱分解し、ボイドの発生が進むと外部への分解物の拡散速度が分解物生成速度より大きくなり、蓄積された分解物が拡散し、

$\tan \delta$ は極大値を経て低下する。 $\Delta \tan \delta$ は増大し、(4・5)節で述べたように絶縁耐力は極小値を経ていくぶん回復する。

(3) 分解物の拡散速度が生成速度より大きい場合には、 $\tan \delta$ や関連する電気的性質のピーク値は生じない。

(4) これらのメカニズムにより、高電圧巻線の電気的性質を追跡することにより、絶縁劣化の進行度を知ることができる。(ただし、実際の巻線温度は発電機においては 100°C 前後であり、これらの変化はきわめて小さくなる)

(5) スロット内にそう入され形状変化がおさえられる場合、変曲点発生は長時間側にシフトするが極大値(たとえば $\tan \delta_{\max}$)は大きくなる。

(6) 高電圧巻線の相対的絶縁劣化は、巻線の電気的、物理的性質から Arrhenius 氏の式によりよく説明できる。また、従来から使用されている 10 度半減則は回転電機の使用範囲においては略算則としてほぼ有効である。

以上述べた実験結果および劣化メカニズムの解明は、機器の絶縁設計および実際の運転による絶縁劣化判定に有効な資料を提供しうる。しかしながら、絶縁性状の判定において劣化に加えて吸湿状態、ダストの付着、冷熱サイクルや電気的劣化などの影響も加味しなければならない。また、運転状態においては絶縁劣化性状の変化はきわめてゆるやかに起こり、小さい。したがって、実際の絶縁診断においてはさらに総合的なテストを必要とする。

最後に、本研究は数年にわたる長期の高電圧巻線の劣化試験をまとめたものであり、研究に当たり種々ご助言をいただいた日立化成 井上副技師長、実験に協力された日立製作所日立研究所 高村研究員、試料を提供された日立工場の関係者に深謝の意を表する。

(昭和 47 年 11 月 16 日受付、同 48 年 3 月 17 日再受付)

文 献

- (1) 松延, 他: 電学誌 89, 1521 (昭 44-8)
- (2) 松延, 他: 電学誌 92-A, 18 (昭 47-1)
- (3) T. W. Dakin: AIEE Trans. 67, Pt-III, 1600 (1948)
- (4) L. C. Whitman: AIEE Trans. 73, Pt-I, 193 (1954)
- (5) 白井, 他: 三菱電機 29, 5, 275 (昭 30)
- (6) 東工大依頼研究資料: 未発表
- (7) K. Matsunobu, et al.: IEEE Trans. Elect. Insulation EI-7, 132 (1972)