UDC 621.313.3.029.3.045: 621.3.082
621.315.614.64: 621.317.333

論 文

54-A10

高電圧回転機コイル絶縁の含浸過程の検出法

正 員 三 井 久 安 (東 芝)

正 員 熊 沢 良 二 (東 芝)

1. ま え が き

含浸は古くから電気絶縁分野で行なわれている重要な作業の一つで、ケーブル、変圧器、回転機コイルなどの多岐の分野で適用されている。含浸作業は絶縁層内部の空気を液体または気体で置換するもので、この作業で最も重要なことは絶縁層内部の空気を完全に含浸材で置換することである。回転機用高電圧コイル絶縁では、マイカなどの絶縁層にエポキシなどの熱硬化性樹脂を真空加圧含浸 (VPI: Vacuum-Pressure Impregnation) する方式が多く、回転機製造者により採用されている。高電圧絶縁コイルは回転機の心臓にあたり、かつ高価であるため、この VPI 方式では含浸が十分に行なわれたかどうか、絶縁層を分解することなく、連続的に含浸過程を追跡することが品質管理のポイントである。

筆者らはこのような観点から、回転機コイル絶縁への樹脂含浸機構の解明を理論的および実験的に進めてきた^{(1)~(4)}。その結果、通常行なわれている VPI 条件では、含浸は絶縁層内外の圧力差に基づく含浸樹脂の粘性流として説明できること、含浸中の静電容量を連続測定することにより含浸過程を追跡できること、含浸中の静電容量の実測値が含浸理論に基づく計算値から逸脱する場合は、マイカ中の接着剤が含浸中に溶出したり、含浸樹脂と反応して粘度上昇するためであることなどを明らかにしたので報告する。

2. 回転機コイル絶縁の含浸に関する基礎理論

含浸に関する基礎理論⁽⁵⁾は電力ケーブル⁽⁶⁾⁽⁷⁾、モールド変圧器⁽⁸⁾などではかなり検討されているが、回転

機コイル絶縁の分野ではあまり報告を見ない⁽⁹⁾。回転機コイル絶縁の含浸機構としては

(1) コイル絶縁層内外の圧力差に基づく含浸樹脂の粘性流⁽⁵⁾

(2) 含浸樹脂の表面張力に基づく毛細管現象が考えられる。

高電圧回転機コイルの絶縁層は普通マイカ、ガラス織布、マイカ接着剤および空気を成る複合体であるが、ここでは均質の多孔体として取扱う。

〈2・1〉 絶縁層内外の圧力差による含浸機構 コイル絶縁は均質で無限に長いと考え、比企野氏らの方法⁽⁷⁾に従って圧力差による含浸樹脂の動きを二次元的に取扱う。

含浸樹脂は非圧縮性流体で、その流れは定常流と考えられる。また単位時間あたりの樹脂の流量は圧力差に比例し、流動抵抗に反比例するから、第1図に示すように絶縁厚が全周にわたって均一で、含浸はどの

第1図 コイル絶縁の含浸模式図

Fig. 1. Schematic diagram of coil insulation.

Measurement of Resin Impregnation Process on the Coil Insulation of High Voltage Rotating Machines. By Hisayasu Mitsui, Member & Ryōji Kumazawa, Member (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corporation).

三井久安: 正員, 東京芝浦電気株式会社重電技術研究所
熊沢良二: 正員, 東京芝浦電気株式会社重電技術研究所

部分も等速に進むと仮定して計算すると、付録に示すように(1)式が成立する⁷⁾。

$$t = \frac{A \mu \alpha L^2}{2\pi^2 p_0} \left[(\ln \Theta) \left\{ \Theta^2 + \frac{H^2}{\Pi} (\ln \Theta + \ln \frac{\Pi \Theta^2 - G^2}{\Pi \Theta^2}) \right\} + \frac{1}{2} \left\{ (1 - \Theta^2) + \frac{H^2}{\Pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G^{2n}}{n^2 \Pi^n} \left(1 - \frac{1}{\Theta^{2n}} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t : 時間、 A : 固有流動抵抗係数(透過率の逆数⁽¹⁰⁾)、 μ : 含浸樹脂の粘性係数、 α : 絶縁層の空けき体積/絶縁層の全体積、 p_0 : 外部圧力、 h : 導体直線高さ、 w : 導体直線幅、 r_1 : 角部導体半径、 r_0 : 角部絶縁半径、 r : 角部含浸先端半径、 p_s : 真空脱気による乾燥終末時の絶縁層内圧

$$a = h + w$$

$$L = \pi r_0 + a$$

$$\Theta = (\pi r + a) / (\pi r_0 + a)$$

$$H = \sqrt{1 - \{(\pi r_1 + a) / L\}^2}$$

$$\Pi = p_0 / p_s$$

$$G = \sqrt{\{(\pi r_1 + a) / L\}^2 (\Pi - 1) + 1}$$

と置いた。

含浸終末値: Θ_{lim} はボイルの法則から

$$\Theta_{lim} = G / \sqrt{\Pi} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 Θ_{lim} は次式で与えられる。

$$1 \geq \Theta_{lim} \geq \Theta_1$$

ここで、

$$\Theta_1 = (\pi r_1 + a) / (\pi r_0 + a)$$

また、(1)式において

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{G^{2n}}{n^2 \Pi^n} \left(1 - \frac{1}{\Theta^{2n}} \right)$$

は、

$$1 \geq \Theta \geq \Theta_{lim}$$

であるので収束する⁷⁾。

実際のコイル含浸の場合は普通 $\Pi \geq 760$ であり、この場合(1)式は

$$t = \frac{A \mu \alpha L^2}{2\pi^2 p_0} \left\{ \Theta^2 \ln \Theta + \frac{1}{2} (1 - \Theta^2) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

導体が円柱状のコイルを仮定した場合 $a=0$ であるから、(1)式において

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= r / r_0 \\ L &= \pi r_0 \\ A \mu \alpha L^2 / 2\pi^2 p_0 &= A \mu \alpha r_0^2 / 2 p_0 \\ G &= \sqrt{(r_1 / r_0)^2 (\Pi - 1) + 1} \\ H &= \sqrt{1 - (r_1 / r_0)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

第2図 コイル絶縁の圧力差に基づく樹脂含浸の進行状況計算結果

Fig. 2. Calculated results of the resin impregnation into coil insulation caused by the pressure difference.

となり、電力ケーブルの含浸と同じ式になる⁷⁾。

また、導体が方形のコイルを想定すると、 $r_1=0$ であるから、 d_0 : コイル絶縁厚、 d : 含浸先端絶縁厚とすると、(1)式において

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= (\pi d + a) / (\pi d_0 + a) \\ L &= \pi d_0 + a \\ \frac{A \mu \alpha L^2}{2\pi^2 p_0} &= \frac{A \mu \alpha (\pi d_0 + a)^2}{2\pi^2 p_0} \\ G &= \sqrt{\{a / L\}^2 (\Pi - 1) + 1} \\ H &= \sqrt{1 - \{a / L\}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

である。一般のコイルは $a \gg r_1 \approx 0$ であるので、ほぼ(5)式で近似できる。

実験で求めた $A \mu, \alpha$ の値を(1)式へ入れ、導体が円柱状および方形のコイル例について電子計算機を用いてこの式を解いた結果を第2図に示す。

〈2・2〉 毛細管現象に基づく含浸機構 第3図を考えると、毛細管現象による単位面積あたりの浸透力 p_s は、絶縁層中の毛細管の半径がすべて $\bar{r}_c$ で接触角も一定であると仮定すると、(6)式で示される。

$$p_s = 2T_s \cos \phi / \bar{r}_c = \rho g h \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 T_s : 表面張力、 ϕ : 接触角、 $\bar{r}_c$: 毛細管の平均半径、 ρ : 液の密度、 g : 重力加速度、 h : 液の上昇高さである。

この p_s は含浸の要因となる絶縁内層方向への圧力と考えてよい。従って、 p_s に基づく含浸は(1)式において p_0 の代わりに $p_0 + p_s$ を用いることによって検討できる⁷⁾。第2図(a)の円柱状コイル絶縁を用い

第3図 毛細管現象による液体の上昇

Fig. 3. Liquid rise by the capillary action.

て、 p_s を実験的に求めたところ高々 10mmHg であった。もちろん、この値はマイカ材料や含浸樹脂の種類、温度などにより異なるが、一般に行なわれている VPI 方式では $P_s \ll P$ と考えてよい。従って、一般の回転機コイル絶縁の含浸の場合、毛細管現象に基づく含浸効果は無視でき、絶縁層内外の圧力差による含浸のみを考えればよい。

3. 含浸過程の誘電特性測定による解析

樹脂の含浸を絶縁層を分解せずに測定するためには、樹脂とマイカ層の誘電特性が異なるために、マイカ層へ樹脂が浸透するに従い絶縁層の誘電特性が相対的に変化することを利用する。そこで、含浸用エポキシ樹脂の誘電特性と含浸による絶縁層の変化について実験し、誘電特性の変化を追跡することにより、含浸過程を解析するための理論式を導き出し、実験検討を行なった。

デジタル LCR メータ (横河電機製 2581 形) により各種含浸材料・マイカ材料の誘電特性 (静電容量: C , 誘電正接: $\tan \delta$, コンダクタンス: G , 絶縁抵抗: R) の温度および周波数などへの依存性、経時変化、組成比による変化⁽¹¹⁾、硬化反応による変化⁽¹²⁾ などを調べた。この結果、実際にコイル含浸を行なう条件下では、1kHz の C が温度などの外部要因による影響を比較的受けにくく、含浸過程を追跡するのに最適な誘電特性測定項目であることがわかった⁽²⁾。そこで第1図の形状のコイル絶縁について C の変化を予測する式を検討した。

〈3・1〉含浸中の静電容量の変化予測式 第1図から含浸中のコイル絶縁層全体の静電容量 C は (7) 式で求まる。

$$C = C_M C_{RM} / (C_M + C_{RM}) \quad (7)$$

ただし、 C_M は未含浸部分の、 C_{RM} は既含浸部分の静電容量を表わす。ここで、 ϵ_M , ϵ_{RM} をそれぞれ未含浸部、既含浸部の比誘電率、 l を電極長さ (m) と置くと、

$$C_M = \epsilon_M l \{ 24.16 / \log(r/r_1) + 2 \times 8.85 \times (a/d) \} \times 10^{-12} (\text{F}) \quad (8)$$

$$C_{RM} = \epsilon_{RM} l \{ 24.16 / \log(r_0/r) + 2 \times 8.85 \times a / (d_0 - d) \} \times 10^{-12} (\text{F}) \quad (9)$$

また、

$$r = d + r_1 = (1/\pi)(L\theta - a) \quad (10)$$

であるから、(8)~(10)式を (7) 式へ代入して整理すると (11) 式が求まる。

$$C = \epsilon_{RM} \epsilon_M l \left\{ \frac{24.16}{\log\{(L\theta - a)/\pi r_1\}} + \frac{17.7a\pi}{L\theta - a - \pi r_1} \right\} \left\{ \frac{24.16}{\log\{\pi r_0/(L\theta - a)\}} + \frac{17.7a\pi}{\pi r_0 + a - L\theta} \right\} \left[\frac{\epsilon_M}{\log\{(L\theta - a)/\pi r_1\}} + \frac{\epsilon_{RM}}{\log\{\pi r_0/(L\theta - a)\}} \right] + 17.7a\pi \left\{ \frac{\epsilon_M}{L\theta - a - \pi r_1} + \frac{\epsilon_{RM}}{\pi r_0 + a - L\theta} \right\} \times 10^{-12} (\text{F}) \quad (11)$$

ここで、導体が円柱状の場合、 $a=0$ であり

$$C_c = \frac{24.16}{\frac{1}{\epsilon_{RM} l} \log\left(\frac{1}{\theta}\right) + \frac{1}{\epsilon_M l} \log\left(\frac{r_0}{r_1}\right)} \times 10^{-12} (\text{F}) \quad (12)$$

また導体が方形の場合、すなわち $r_1=0$ で、 $a \gg d$ のとき

$$C_r = \frac{17.7a\pi}{\frac{1}{\epsilon_{RM} l} (\pi r_0 + a - L\theta) + \frac{1}{\epsilon_M l} (L\theta - a - \pi r_1)} \times 10^{-12} (\text{F}) \quad (13)$$

ここで、(1)式からある値の θ のときの t を読み、(11)式から同じ θ のときの C を求めれば、 t と C の関係が求まる。これらの理論を検証するために以下の実験を行なった。

〈3・2〉絶縁抵抗測定による含浸樹脂到達点の検出

コイル絶縁層への含浸樹脂の到達点を調べるため、アルミニウム板 (6×25×300mm) に巻いたマイカテープの任意の層に、先端の被覆を約 5mm はいだ直径 0.08mmφ のエナメル銅線を埋め込んで、内層電極と

第4図 含浸到達層の検出 (絶縁層分解結果)

[Fig. 4. Detection of resin arrived layers (result from the dismantle of insulation layers).

した。対向電極として、最外層にしゃへい用銅テープ (住友スリーエム製: スコッチテープ No. 24) をテープ幅だけ巻き、リード線で含浸タンクの外に取出し、電極間の絶縁抵抗を超絶縁抵抗計 (横河ヒューレットパッカード社製 4329A) にて連続測定し、記録させた。樹脂が含浸し内層電極に到達すると、絶縁抵抗は初期値の 10^{11} から $10^9 \Omega$ のオーダーに低下する¹¹⁾。

樹脂の浸透状況と絶縁抵抗の変化が対応しているかどうか、第1表のマイカテープIを1/2重巻で30回巻いたコイルを1.86ボアズの含浸樹脂を用い、 6 kg/cm^2 (ゲージ圧) 加圧で含浸し確認した。コイルの両端は樹脂の浸透を防ぐためエポキシ樹脂であらかじめシールした。第4図は15層目に巻込んだ内層電極間の絶縁抵抗が $2 \times 10^{11} \Omega$ から低下し始め、60分後に $3 \times 10^9 \Omega$ で飽和した時点でコイルを取出し、絶縁層を分解した後の含浸状況を示す。一部16, 17層にも到達しているが、15層は完全に含浸しており、絶縁層分解による目視の結果は絶縁抵抗測定による含浸到達点の検出結果と良く一致している。

〈3.3〉 樹脂含浸による静電容量の変化測定 製品であるコイルの含浸状態を〈3.2〉節で述べた絶縁抵抗法によって追跡することは、埋込んだ極細線が有害となるため実際には実用性がない。そこで、絶縁抵抗法と静電容量測定法を併用し相互を比較することにより、静電容量測定による含浸検出法の実用性について検討した。

断面が $6 \times 25 \text{ mm}$ の方形アルミニウム板に第1表に示すマイカテープを1/2重巻30回巻いたもの、および外径が 30 mm のアルミニウムパイプに第1表のマイカテープを、平巻と1/2重巻で30回巻いた模擬コイル絶縁を試料として用意した。この際、第5図に示すようにマイカテープの任意の層に、樹脂の到達を検知するために絶縁抵抗測定用の極細エナメル銅線を埋

第1表 実験に用いたマイカテープ
Table 1. Mica tapes used for experiment.

No.	マイカペーパー	厚さ (mm)	接着剤量 (%)
I	軟質無焼成	0.179	10.5
II	"	0.169	6.0
III	"	0.166	3.8
IV	硬質焼成	0.14	9.4

(注) 裏打ち材はすべて $35 \mu\text{m}$ 厚のガラスクロス

第5図 実験装置の系統図

Fig. 5. Schematic diagram of experimental setup.

込み、かつ静電容量を測定するために絶縁表面をしゃへい用銅テープで突合せ巻きした。

この試料を含浸タンクに納め、静電容量、絶縁抵抗測定のためのリード線をタンク外に取出した。静電容量の測定はデジタル LCR メータにて連続的に測定し、記録計に記録させた。

第6図(a)~(f)に、第1表のマイカテープI~IVを、方形アルミニウム板またはアルミニウムパイプに1/2重巻または平巻30回巻いたコイル絶縁を 6 kg/cm^2 (ゲージ) 加圧または大気圧放置した際の、超絶縁抵抗計から求めた含浸樹脂到達巻回数(A)、この含浸樹脂到達巻回数から(12)式または(13)式により計算した静電容量(A'), LCRメータによる静電容量の実測値(B)、および(12)式または(13)式と(1)式から求めた静電容量の計算値(C)の変化を示す。また図中には含浸樹脂到達巻回数について比較を行なう意味で、(B)、(C)に対応した含浸樹脂到達巻回数(B'), (C')も示した。ただし(C)、(C')の時間軸は便宜上含浸終了時間が実測値と一致するように、(1)式の定数項: $A\mu\alpha L^2/2\pi^2 p_0$ の値を設定してある。

これらの図から次のことがわかる。静電容量の実測値(B)は絶縁抵抗の変化から読みとった含浸樹脂到達巻回数(A)を基に計算した静電容量(A')と比較的良

第 6 図 含浸到達巻回数と静電容量の関係

Fig. 6. Relation between the resin impregnated layer numbers and capacitance.

く一致している。しかし、第 6 図(a)~(c)に見られるように、静電容量の実測値(B)は(12)式または(13)式と(1)式から求めた静電容量の計算値(C)とは、マイカ接着剤量の少ないときにはほぼ一致しているが、接着剤量が増え、含浸所要時間が長くなると共に計算値からの逸脱が大きくなる。また第 6 図(d), (e)に示すように、 6 kg/cm^2 (ゲージ)の圧力含浸で含浸所要

時間が短いときには比較的良好に一致しているが、大気圧放置で含浸所要時間が長くなるにつれ一致しなくなる。このように含浸所要時間が長くなるにつれ計算値から逸脱する原因は、後述するように含浸中にマイカ接着剤が含浸樹脂に溶出したり、含浸樹脂自身あるいは含浸樹脂とマイカ接着剤とが反応するためである。第 6 図(a)と(f)を比較してわかるように、接着剤量

の多いマイカテープ I の場合でも、導体断面が方形の場合より円形の場合の方が計算値と実測値とが良く合う。これは導体が方形の場合、実際の絶縁層は正確な方形になりにくいので寸法誤差を生じやすいのに対し、導体が円形の場合、寸法がより均一で誤差を生じにくいと思われる。従って、各種マイカテープの含浸性の比較とか含浸現象の基礎的な研究には、円柱状導体を使用する方が好ましい。第 6 図(d)と(e)は外部圧力 p_0 のみが、(d)図の場合の方が(e)図の場合に比べ 7 倍大きいのみで他の条件は同じである。両図の曲線(A)を比較してわかるように、含浸所要時間は(d)図の場合が(e)図の場合の約 1/7 になっており、この結果は(1)式を満足していると言える。

これらの結果から、高電圧回転機コイル絶縁の含浸は絶縁層内外の圧力差に基づくものであること、含浸中の静電容量は未含浸部と既含浸部の各々の静電容量を直列回路モデルで求めた(11)式で近似でき、その測定値から樹脂の含浸到達点を検出できることが裏づけられた。

4. 検 討

〈3・3〉節で述べたように、マイカ接着剤が多かったり、大気圧放置などで含浸所要時間が長くなると、含浸中の静電容量の実測値と計算値が一致しなくなる。この原因を調べるために、マイカ層を浸透してゆく過程の粘度変化、絶縁内層の圧力変化とマイカ層中の樹脂の流れについて検討した。

〈4・1〉含浸中の樹脂の粘度変化 含浸樹脂がマイカ層を浸透してゆく過程で、粘度がどのように変化するか調べるために、第 7 図に示すように銅の細管を埋込んだアルミニウム板に、第 1 表に示すマイカテープを巻いたモデルコイルを用意した。コイル端からの

第 7 図 含浸樹脂採取用モデルコイル

Fig. 7. Model coil for collecting an uncured impregnant.

第 8 図 マイカ層中の含浸樹脂の粘度変化

Fig. 8. Viscosity change of an impregnation resin in the micaceous layer.

第 9 図 マイカテープと接着剤溶出率の関係

Fig. 9. Relation between mica tape and the binder dissolution rate in an impregnant.

樹脂の侵入を防ぐために、両端をあらかじめシールした。含浸終了後、銅管から採取した含浸樹脂の粘度を少量サンプル用 B 形粘度計にて測定した。また採取樹脂を赤外吸収スペクトル分析し、吸光度比から含浸樹脂中に溶出したマイカ接着剤を定量した。

マイカ巻回数を変えたモデルコイルを同一ロットで含浸し、終了後同時に取出して粘度を測定し、巻回数に対してプロットした結果を第 8 図に示す。この図から絶縁内層に向かうほど含浸樹脂の粘度が上昇しており、接着剤量が増えるほど粘度の上昇が大きくなることがわかる。また、マイカテープ I～IV を 1/2 重巻で 10 回巻回したコイルの最内層の含浸樹脂への接着剤の溶出率を示した第 9 図から、接着剤量が増すに従い溶出率が増えていることがわかる。マイカテープ IV がマイカテープ I～III より粘度上昇が少なく、溶出率も 0% であったのは、このマイカには硬化促進剤が含まれていないことと、焼成タイプのマイカペーパーであるため、無焼成タイプのものより見かけ密度が小さく、接着剤保持能力が大であるためであろう⁽¹³⁾。

含浸樹脂やマイカテープには硬化剤や硬化促進剤が活性状態で含まれている。そこで、含浸中に樹脂自身あるいは接着剤の溶出した樹脂が化学反応により粘度上昇しないかどうか検証した。

一般に、粘度の時間による変化は(14)式で表わされる。

$$\eta = \eta_0 10^{kt} \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 η_0, η : 時間 0 および t における粘度、

k : 粘度上昇速度定数

k は、時間-粘度変化を片対数グラフで表わした場合のこう配を表わす(粘度上昇速度定数と呼ぶことにする)。つまり、 k が大きいほど化学反応による粘度上昇が速い。 k を求めるため、含浸終了後採取した樹脂を 23°C の恒温恒湿室に放置し、粘度の経時変化を測定した。マイカ I (0.715 ポアズ) の場合、5~20 回巻コイルの絶縁内層の k 値は 0.004~0.009 で、接着剤が全く溶出していない樹脂の 0.001~0.002 に対してかなり大きく、反応による粘度上昇が起こっていることがわかった。一般に k の値はマイカテープの種類、含浸樹脂の種類により変わるし、温度が高いほど大きくなる。

〈4.2〉 絶縁層の内圧の変化 静電容量の測定値と実測値が異なるその他の要因として、絶縁層からの分解ガスによる絶縁内層の圧力上昇が考えられる¹⁰⁾。そこで絶縁内層の圧力変化を測定するため、第 5 図に示したようにアルミニウム板の中央にひずみゲージ式圧力センサ(共和電業 PS 形、6φ×0.6mm 厚)を埋込み、第 1 表のマイカテープ I を巻回してモデルコイルを作った。コイル端は粘度測定用コイルと同様エポキシ樹脂でシールした。含浸樹脂が浸透してゆく過程の圧力変化を動ひずみ計(共和電業製 DPM 形)を通して連続測定して記録させた。高粘度含浸で浸透が止ったコイルの未含浸部分の圧力は約 5mmHg(真空度校正時の検出感度)を保持しており、含浸を著しく阻害するような内圧上昇は起こっていないことを確認した。なお、圧力センサに含浸樹脂が到達すると、加えた外圧と等しくなるので、到達点の検出にも利用できる。

これとは別に、導体内部に細い中空パイプを埋込んだ絶縁コイルを透明なアクリルパイプに納め、アクリルパイプに固定したもののさしの目盛から読みとった樹脂の含浸量と、内圧の変化からボイルの法則により求めた計算値とはほぼ一致することを確認している¹³⁾。

以上の結果から、静電容量の測定値が理論値と一致しなくなる原因は、含浸樹脂が浸透する過程で高粘度のマイカ接着剤が溶出したり、化学反応して粘度上昇

が起きるためであり、内圧上昇は無視してよいことがわかった。

5. む す び

高電圧回転機コイル絶縁層のエポキシ樹脂含浸について、理論的、実験的に検討を加えた結果、次のことがわかった。

(1) 通常のコイル絶縁の VPI では、マイカ絶縁層への毛細管現象による寄与は無視できるほど小さく、絶縁層内外の圧力差による含浸機構を考慮すれば良い。そこで、絶縁層内外の圧力差に基づく回転機コイル絶縁の含浸理論式を、電力ケーブルで導かれた理論式を拡張して導いた。

(2) 未含浸状態ではマイカ層とエポキシ樹脂の誘電特性が大きく異なるので、マイカ層中に埋込んだセンサの絶縁抵抗値の変化から含浸樹脂の到達を検出でき、含浸中の絶縁層の静電容量の変化から、含浸の度合いを測定できる。

(3) 一般に絶縁層の静電容量の測定値は、絶縁層内外の圧力差による含浸理論式を基にした静電容量の計算値と良く一致する。特に、導体断面が方形より円形の方が絶縁層の寸法誤差が少ないために一致しやすい。絶縁層の静電容量の理論値と計算値が一致しないのは、マイカテープ接着剤の溶出、樹脂自身あるいは樹脂とマイカテープ接着剤との化学反応により、含浸樹脂が含浸中に粘度上昇することが主な原因である。

最近、筆者らの方法に基づいて、回転機コイル絶縁の含浸に関する研究が行なわれており⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、誘電特性の変化追跡による含浸過程の検出法は、実用的に極めて有用な手段であると確信する。

終りに、本研究に有益な御助言を賜った名古屋大学 家田教授、並びに討論に参加された当社 鶴見工場 井上主務に深く感謝の意を表します。

(昭和 53 年 3 月 25 日受付、同 53 年 10 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 上内・三井:「エポキシ含浸コイル用絶縁材料の基本特性」第 5 回絶縁材料シンポジウム I-4 (昭 47)
- (2) 井上・三井:「エポキシ樹脂真空加圧含浸による誘電特性の変化」昭 48 電気学会全大 325
- (3) 三井・熊沢・梅本・井上:「LCR メータによる高電圧絶縁コイルの含浸機構の研究」第 7 回絶縁材料シンポジウム III-6 (昭 49)
- (4) 熊沢・三井:「高電圧回転機巻線絶縁の含浸過程の非破壊的解析」昭 53 電気学会全大 168
- (5) G.R. Cox: "Insulation fundamentals" *Insulation*, p. 33 (1961-12)
- (6) N. Klein: "Oil drainage in solid type cables on slopes", CIGRE, No. 213 (1952)

- (7) 比企野・千葉・小石原:「電力ケーブルの含浸機構の研究」日立評論, 47, p. 79 (昭 40-2)
- (8) D.I. Holton: "Process requirements for epoxy impregnation of transformer coils" *Insulation*, p. 32 (1969-7)
- (9) W. Möller & K. Nylund: "Vakuummprägung mit Kunstharzen in der Electrotechnik" *VAKUUM-TECHNIK*, 16, p. 243 (1967-10)
- (10) 化学工学協会編:「化学工学便覧」p.733 (昭 37) 丸善
- (11) 三井・井上:「エポキシ樹脂の各種因子による誘電特性の変化」昭50電気学会全大 220
- (12) 三井・井上:「誘電特性測定による樹脂の硬化現象の解析」第22回高分子学会年次大会, 30F16 (1973)
- (13) 網島・三井:「各種集マイカの基本特性」昭48電気学会全大 374
- (14) R.H. Schuler: "A post-cured insulation system for high-voltage rotating machines: application and service experience". BEAMA International Electrical Insulation Conference, 351 (1974-5)
- (15) L.D. Dragatakis, Z.N.: "Dielectric analysis reveals how to cure coil insulation tape without energy waste" *Insulation/Circuits*, p. 27 (1978-1)

付 録

(1) 式の求め方 (1) 式は比企野氏らの方法に従い, 次のようにして求めた。

第1図における dR の部分について樹脂の流れを考える。

P : 圧力差

P_r : r_0 と r 間の圧力差

Q : 流量

R : 角部における任意の絶縁層半径

とおくと, (dt) 時間にこの部分を通して流れる流量 (dQ) は圧力差 (dP) と (dt) 時間に比例し, 流動抵抗 $\{A\mu dR/2(\pi R+a)\}$ に反比例するので, (付1) 式が成立する。

$$dQ = \frac{2(\pi R+a) dP dt}{A\mu dR} \dots\dots\dots (付1)$$

連続の形より dQ/dt は一定と考えられるので (付2) 式が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{dQ}{dt} \int_r^{r_0} \frac{dR}{\pi R+a} &= \frac{1}{A\mu} \int_0^{P_r} dP \\ \therefore \frac{dQ}{dt} &= \frac{2\pi P_r}{A\mu \ln\{(\pi r_0+a)/(\pi r+a)\}} \\ &\dots\dots\dots (付2) \end{aligned}$$

また

$$dQ/dt = -2\alpha(\pi r+a)(dr/dt)$$

であるので

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\pi P_r}{A\mu \alpha(\pi r+a) \ln\{(\pi r_0+a)/(\pi r+a)\}} \dots\dots\dots (付3)$$

また内圧に関するボイルの法則から, 与条件を入れ

$$p = p_0 \frac{\pi(r_0^2 - r_1^2) + 2a(r_0 - r_1)}{\pi(r^2 - r_1^2) + 2a(r - r_1)} \dots\dots (付4)$$

ここに, p : 角部含浸先端半径 r での絶縁層

内圧

与条件から (付3) 式に $P_r = p_0 - p$ を代入したものと,

(付4) 式から

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{-\pi \left\{ p_0 - p_0 \frac{\pi(r_0^2 - r_1^2) + 2a(r_0 - r_1)}{\pi(r^2 - r_1^2) + 2a(r - r_1)} \right\}}{A\mu \alpha(a + \pi r) \ln\left(\frac{\pi r_0 + a}{\pi r + a}\right)} \\ &\dots\dots\dots (付5) \end{aligned}$$

$$\Theta = (\pi r + a)/(\pi r_0 + a)$$

であるから

$$\therefore \frac{d\Theta}{dt} = \frac{\pi}{\pi r_0 + a} \frac{dr}{dt} \dots\dots\dots (付6)$$

(付6) 式に (付5) 式を代入して整理すると

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{dt} &= \frac{\pi^2 p_0}{A\mu \alpha \Theta L^2 \ln \Theta} \frac{\Pi \{L^2 \Theta^2 - (\pi r_1 + a)^2\}}{\Pi \{L^2 \Theta^2\}^*} \\ &\quad * \frac{-\{L^2 - (\pi r_1 + a)^2\}}{-(\pi r_1 + a)^2} \dots\dots\dots (付7) \end{aligned}$$

初期条件 $t=0, \Theta=1$ を用いて (付7) 式を解くと (1) 式が求まる。