

論 文

プレスボードパイプ内の流動帶電現象と課電効果

田 中 俊 秀*, 山 田 直 也**, 八十島 義 行*

(1984年7月13日受理)

Streaming Electrification in Pressboard Pipe and Energization Effect

T. TANAKA,* N. YAMADA** and Y. YASOJIMA*

(Received July 13, 1984)

Fundamental studies on streaming electrification phenomena were conducted with transformer oil and cylindrical pressboard pipes. The leakage current from the pipes due to streaming electrification were measured changing flow velocity or temperature of oil. The data were examined by formulae obtained by theoretical consideration based on separation and relaxation of charges in oil. The formulae explain the dependences of the leakage current on flow velocity and temperature of oil in both laminar and turbulent flows. The streaming electrification is enhanced by external AC electric field. The energization effect is assumed to be caused by the oscillation of charges distributed in oil due to the AC electric field. A formula based on this assumption agrees with the data of energization effect of streaming electrification in pressboard pipe. The formulae of leakage current and energization effect are also applied successfully for the analyses of the experimental data on a full scale model transformer.

1. まえがき

最近、送油冷却式の大型変圧器内での流動帶電現象について各種の研究が進められてきた¹⁻⁶⁾。液体の流動帶電現象は、古くから石油工業の分野でも研究が行なわれてきたが⁷⁾、変圧器における流動帶電は以下のような点で特徴がある。

変圧器油は完全に密閉された系を循環し、空気に触れたり、系外に流出したりしない。また系内の温度は変圧器の運転条件により変化し、それにつれて変圧器油や絶縁紙などの特性が大きく変化する。この特性の変化は、流動帶電現象に大きな影響を与える。

流動帶電に関与する変圧器油や絶縁紙はともに良好な電気絶縁物であり、流動帶電を抑制するために導電率を増加させるような添加物を使用するようなことは避けなければならない。また、変圧器の巻線を商用周波数の交流で励磁すると流動帶電による電荷発生が増加する^{1,3,5)}。

以上のような特徴を考慮に入れ、大型変圧器内の流動帶電現象を明らかにするため、変圧器油とプレスボード

で成形されたパイプを用いて基礎的な実験を行なった。とくにパイプ外側から交流電界を印加し、これが流動帶電に及ぼす影響についても詳しく調べた(本論文では、これを課電効果と呼ぶ)。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の構成を示す。実験装置は取扱いが簡単なように各部分がユニット化されている。すなわちポンプ、ヒータ、クーラと五つのタンクより構成され、約2,000 lの油が入るようになっている。五つのタンクはそれぞれ上流側タンク、試料タンク、下流側タンク、コンサベータ、緩和タンクと呼ばれ、試料タンクにプレスボードで作られたパイプを設置して実験を行なう。また、試験装置の各部分には油の導電率および油中電荷密度を測定するための平行平板型プローブ⁸⁾が装着されている。

油流は配管に設置されたゲートバルブを開閉することにより調整する。試料タンク内に設置されたパイプにはつねに電気的に中性の油が流入するように、すなわち上流側タンク内に入る前に油中電荷がほとんど緩和するよう緩和タンクが設けられている。

油温の設定は、自動温度調節回路を用いてヒータおよびクーラのon-off制御を行ない、本実験では25~65°Cの範囲で実験を行なった。

* 三菱電機株式会社中央研究所(661 尼崎市塚口本町 8-1-1)
Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, 1-1, Tsukaguchi-Honmachi 8-chome, Amagasaki, 661 Japan

** 三菱電機株式会社赤穂製作所(678-02 赤穂市天和 651)
Ako Works, Mitsubishi Electric Corporation, 651, Tenwa, Ako, 678-02 Japan

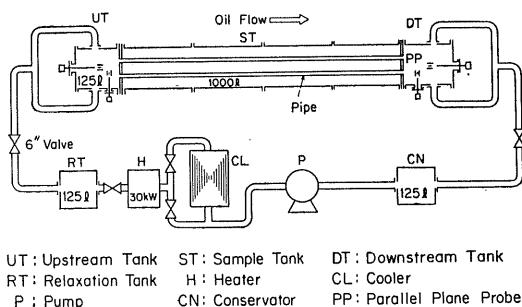


図1 実験装置の構成

Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus.

2.2 プレスボードパイプ

パイプは、内径 20 mm、外径 31.6 mm、内面の表面粗さが 0.2 mm 程度のプレスボード成形品で、1 本当たり 1 m である。これを試料タンク内で 4 本接続して、全長 4 m のパイプとし、できるだけ大型変圧器内部の流動帶電現象を模擬するようにした。これにより、油流による電荷発生だけでなく、油中電荷の緩和現象をも十分観測できるようになっている。

図2は全長 4 m のパイプの外周に装備する構成部品を示す。Ⓐはパイプの両端に位置し、それぞれ上、下流側タンクとの隔壁にOリング構造で結合するためのフランジである。Ⓑはパイプから接地へ流れる漏れ電流を測定するためのパイプ状の電極で、長さは一つ当たり 95 mm である。この電極は 5 mm の絶縁スペーサをはさんで 100 mm 間隔で設置される。Ⓒはパイプ外側より交流電界を印加するための分割形課電電極である。これらの電極を用い、4 m のパイプ 1 本につき最高 38 点の軸方向の漏れ電流分布を測定することができる。

2.3 油の導電率

流動帶電現象を考察する場合には、油の導電率は重要な因子の一つである。油の導電率は装置各ユニットに設置された平行平板型プローブにより測定した⁹⁾。

油の導電率の油温依存性は、次式で示される。

$$\kappa = \kappa_0 \exp(-W_e/kT) \quad (1)$$

ただし、 κ_0 は定数、 W_e は油の導電率の活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。本実験で使用した変圧器油 (JIS 2号油) の κ_0 および W_e は、それぞれ $6.67 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ および 0.408 eV である。

2.4 油の粘度

流動帶電現象は油の粘度にも大きな影響を受ける。変圧器油の動粘度の温度依存性は、ASTM D341-43(1949)で示される“Chart E”のグラフ上で直線の関係にあり、次式によても表わされる。

$$\nu = 10^{10y} - 0.7 \quad (2)$$

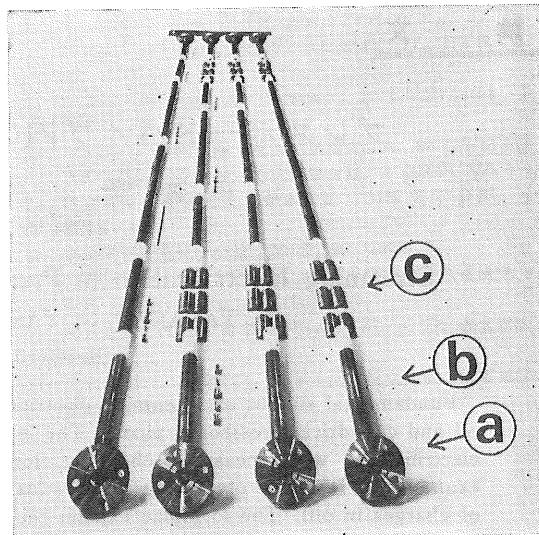


図2 パイプ外周の構成部品

Fig. 2 Electrodes and accessories installed on the outer surface of pipes.

ただし、 $y = A - B \log T$, $\nu(\text{cSt})$ は油の動粘度、 A , B は定数である。定数 A , B は油の種類、銘柄によって異なるが、本実験で使用した変圧器油の場合、 $A = 10.4285$, $B = 4.1905$ である。

また油流の状態はレイノルズ数 Re で表わされるパイプ中の油流の場合レイノルズ数は、次式で表わされる。

$$Re = \bar{v} \cdot d / \nu \quad (3)$$

ここで、 \bar{v} はパイプ内の平均油流速、 d はパイプの内径である。

3. 実験結果と考察

3.1 流動電流

変圧器油が絶縁紙に接触すると、絶縁紙には負イオンがより多く吸着され、油中に残された余剰の正イオンは空間電荷電界による電気伝導と、拡散が釣り合うように分布し、境界面近傍の電荷分布 $\rho(z, x)$ (C/m^3) は次式で与えられる^{10,11)}。

$$\rho(z, x) = (q(z)/\delta) \cdot \exp(-x/\delta) \quad (4)$$

ここで、 $q(z)$ (C/m^2) は境界面単位面積当たりの油中のイオン数、 x (m) は境界面から油中への垂直方向の距離、 z (m) はパイプ入口から油流方向の距離である。油中の正イオン分布のデバイ長 δ (m) は、油の導電率 κ (S/m)、誘電率 ϵ (F/m) と拡散係数 D (m^2/s) を使って次式で表わされる。

$$\delta = \sqrt{\epsilon D / \kappa} \quad (5)$$

境界面に平行な油流速は x の関数で表わされ、いまこれを $v(x)$ (m/s) とおくと、パイプ入口から z の距離に

おける単位周長長当りの流動電流 $i(z)$ (A/m) は、

$$i(z) = \int_0^R \rho(z, x) \cdot v(x) dx \quad (6)$$

である。パイプ内の油流速が層流の場合 $v(x)$ は

$$v(x) = 2 \bar{v} \cdot x (2R - x) / R^2 \quad (7)$$

と示されるから、式(6)に式(4)と式(7)を代入し、 $R \gg \delta$ の条件のもとに積分すると、 $i(z)$ は次式のようになる。

$$(層流) \quad i(z) = 4 \bar{v} \delta q(z) / R \quad (8)$$

またパイプ内の油流速が乱流の場合、巨視的には $v(x) = \bar{v}$ と見なすことができ、 $i(z)$ は次式のようになる。

$$(乱流) \quad i(z) = \bar{v} q(z) \quad (9)$$

いま、油と絶縁紙の界面における電荷発生は、Schön¹⁰⁾ の場合と同様、パイプ壁面いたるところで一定であるとし、単位面積当り発生する電流を i_a (A/m²) とする。パイプ入口から z の距離のところで dz の微小区間に入ってくる電流と出していく電流の平衡は式(10)で示すことができる。

$$di(z) = (i_a - \kappa q(z) / \epsilon) dz \quad (10)$$

式(8)または式(9)を式(10)に代入し、境界条件 $i(0) = 0$ を用いて z について積分すると流動電流 I_z (A) ($= 2\pi R i(z)$) は以下のようになる。

$$I_z = 2\pi R z e_i a \{1 - \exp(-z/z_{e1})\} \quad (11)$$

$$z_{e1} = (4/R) \bar{v} \delta (\epsilon/\kappa) \quad (\text{層流}) \quad (12)$$

$$z_{e1} = \bar{v} \cdot \epsilon / \kappa \quad (\text{乱流}) \quad (13)$$

ここで z_{e1} は緩和長である。

絶縁紙と油の境界面から発生する電流密度は、絶縁紙や油の特性およびその組合せによって影響を受ける。さらに油中の電荷密度、油の流れの状態によつても影響を受ける。ここで、 i_a は、層流では \bar{v} に、乱流では \bar{v}^{m-1} に比例するものと考えると

$$i_a = A_1 n \bar{v} \quad (\text{層流}) \quad (14)$$

$$i_a = A_t \bar{v}^{m-1} \quad (\text{乱流}) \quad (15)$$

のように示される。ここで、 n は油中のイオン数、 A_1 、 A_t は定数である。

油の導電率および油中のイオン密度の温度依存性はそれぞれ式(1)および式(16)によって与えられ、

$$n = n_0 \exp(-W_n/kT) \quad (16)$$

油中イオンの拡散係数は、イオン移動度の温度依存性 ($\mu = \mu_0 \exp(-W_\mu/kT)$) と、Nernst-Einstein の関係式 ($D = (kT/e)\mu$; ただしイオンの価数を 1 とする) によって次式のように示される。

$$D = (kT/e) \cdot \mu_0 \exp(-W_\mu/kT) \quad (17)$$

ただし、 n_0 (1/m³)、 μ_0 (m²/V·s) は温度に無関係な定数、 e (C) は素電荷、 W_n 、 W_μ (eV) は活性化エネルギーである。さらに、活性化エネルギーの関係は、

$$W_\kappa = W_n + W_\mu \quad (18)$$

と表わされる。

式(11)、(12)、(13)に式(1)、(5)、(14)～(18)を代入することにより流動電流は次のように求められる。

(層流)

$$I_1 = A_L \bar{v}^2 \cdot T^{1/2} \exp\{(W_\kappa - W_n/2)/kT\} \times \{1 - \exp(-z/z_{e1})\} \quad (19)$$

$$A_L = 8\pi A_1 n_0 \mu_0^{1/2} (\epsilon/\kappa_0)^{3/2} (k/e)^{1/2} \quad (20)$$

$$z_{e1} = B_L \bar{v} T^{1/2} \exp\{(W_\kappa + W_n/2)/kT\} \quad (21)$$

$$B_L = (4/R) \mu_0^{1/2} (\epsilon/\kappa_0)^{3/2} (k/e)^{1/2} \quad (22)$$

(乱流)

$$I_t = A_T \bar{v}^m \exp\{(W_\kappa - W_n)/kT\} \times \{1 - \exp(-z/z_{et})\} \quad (23)$$

$$A_T = 2\pi R A_t n_0 \epsilon / \kappa_0 \quad (24)$$

$$z_{et} = B_T \bar{v} \exp(W_\kappa/kT) \quad (25)$$

$$B_T = \epsilon / \kappa_0 \quad (26)$$

ここで A_L 、 B_L 、 A_T 、 B_T は温度・油流速に無関係な定数である。

現在、油の導電率と油中のイオン密度の関係について詳細なデータはないが、本論文では、層流の場合 $W_n = (2/3)W_\kappa$ と推定する¹²⁾。また乱流の場合は絶縁紙と油の界面近傍における垂直方向の油流速成分が熱拡散またはイオンの移動度より十分大きくなり、 $W_\mu \approx 0$ と見なすことができる。したがって式(19)、(21)、(23)はそれぞれ式(27)、(28)、(29)のよう変形できる。

$$I_1 = A_L \bar{v}^2 T^{1/2} \exp(2W_\kappa/3kT) \times \{1 - \exp(-z/z_{e1})\} \quad (27)$$

$$z_{e1} = B_L \bar{v} T^{1/2} \exp(4W_\kappa/3kT) \quad (28)$$

$$I_t = A_T \bar{v}^m \{1 - \exp(-z/z_{et})\} \quad (29)$$

3.2 漏れ電流

プレスボードパイプ中では紙と油の界面に沿って、正電荷は油流によって運び去られ、負電荷は紙の表面に蓄積する。流動電流としてパイプから流出した正電荷は、下流において大地へ緩和していく。一方、紙の表面に蓄積した負電荷は近くの接地物体から漏れ電流として流出する。したがって、平衡状態では流動電流と漏れ電流は逆極性でその絶対値は等しい。

3.2.1 漏れ電流の油流速依存性

パイプの内表面に蓄積した負電荷は、パイプ外壁に装着した電極を通して大地へ流出する。漏れ電流 I_s は、電極からの漏れ電流をすべて合計することにより求められ、パイプ内で発生する正味の電荷量を示している。この漏れ電流をピコアンペータとペン書きレコーダーを用いて測定した。図3は油流速を変化させた場合の漏れ電流の波形を示したものである。漏れ電流は油流速が減少するに従つて減少し、油流速 $\bar{v} = 1.3$ m/s において激しい

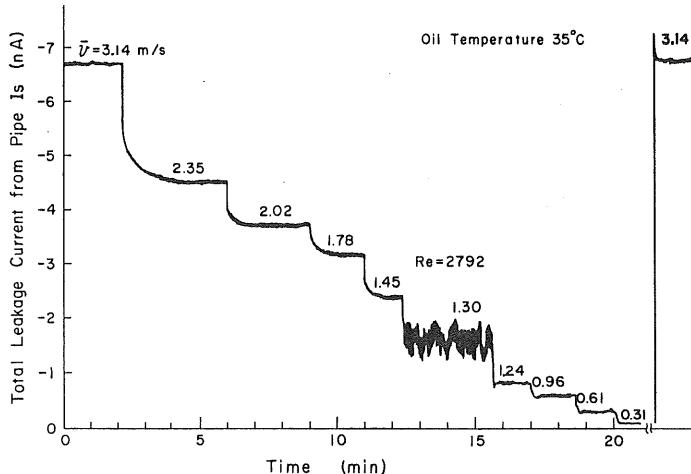


図3 パイプ全体からの漏れ電流

Fig. 3 Total leakage current from the pipe.

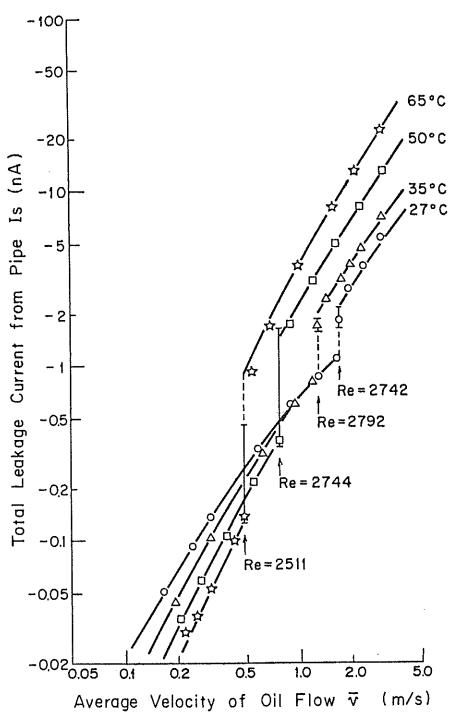


図4 漏れ電流の油流速依存性

Fig. 4 Dependence of total leakage current on average velocity of oil.

振動を示した。このときのレイノルズ数は2,792で、油流の状態が層流と乱流の両方に過渡的に変化しているものと考えられる。

図4に漏れ電流の油流速依存性を示す。図中工の印は、図3に示すような層流と乱流の変換点における振動

の振幅を示している。油流は、これら変換点より高速では乱流に、一方低速では層流になっている。漏れ電流は、いずれの場合も油流速につれて増大するが、乱流域では油温が増加するにつれて漏れ電流も増加し、層流域では逆に油温が増加すると、漏れ電流が減少する傾向を示している。これは層流域では高温になるほど、緩和現象が顕著であることを示している。

流动電流^{*1}の式 I_L および I_t に、層流および乱流の場合のデータを二点ずつ代入することにより、定数 A_L , B_L , A_T , m の値を求めることができる。ただし、 B_T は式(26)に ϵ および κ_0 の値を代入することによって求まる。本実験では、それぞれ

$$A_L = 2.39 \times 10^{-15}$$

$$B_L = 3.24 \times 10^{-10}$$

$$A_T = 5.77 \times 10^{-9}$$

$$B_T = 2.92 \times 10^{-6}$$

$$m = 2.3$$

となる。

図4における実線は、このようにして求めた定数と、 I_L , I_t の式を用いて計算した結果を示しており、測定値とよく一致していることがわかる。

3.2.2 漏れ電流の油温依存性

漏れ電流の油温依存性を、油流速をパラメータとして測定した結果を図5に示す。漏れ電流は油流速が早い場合は、油温の上昇とともに単調増加するが、油流速が低くなるにつれて、ある温度でピークを示し、その後減少する特性を示している。これは高温・低流速において、パイプ内の油中正電荷の緩和が著しく効いてくるため

*1 漏れ電流の式はこの極性を変えたものに等しい。

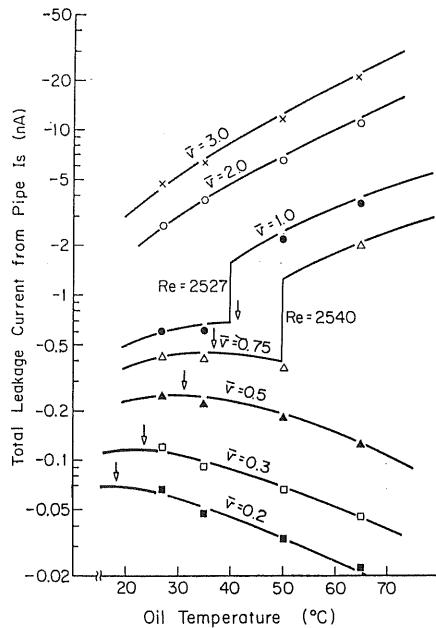


図5 漏れ電流の油温依存性

Fig. 5 Dependence of total leakage current on oil temperature.

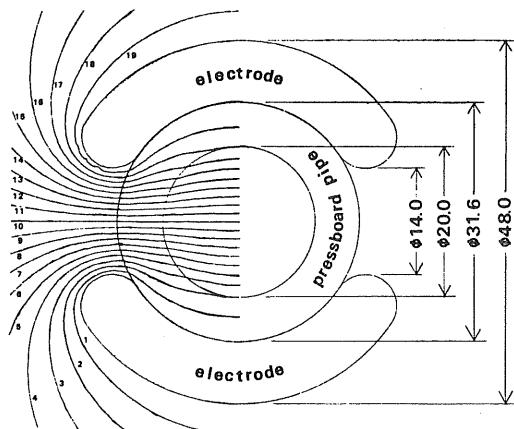
である。また図5においても、油流速依存性の場合と同様、不連続な点が $\bar{v}=1.00\text{ m/s}$ と 0.75 m/s の場合に生じている。この不連続点より高流速側、高温側において乱流に、またその逆では層流となっている。このことから、同じパイプにおいても、油流の状態が変化すると電荷発生だけでなく、緩和にも影響を与える、漏れ電流の油温依存性が大きく変化することがわかる。

図中、実線は3.2.1で述べた計算結果を示しており、実験データと非常によく一致している。層流の場合、漏れ電流は低温域では温度とともに増加し、ある温度でピークを示す。漏れ電流がピークを示す温度は $dI_l/dT=0$ を計算することにより求めることができる。数値計算により求めたピークを示す温度を図5に矢印で示す。このことから、ピークを示す温度は流速が速いほど高温側に移っていくことがわかる。

一方乱流の場合は、漏れ電流は温度とともに増加し、だいに一定値に飽和していく。

3.3 課電効果

パイプ内での流動帶電は、外部から交流電界を印加することにより増加する。この課電効果を調べるために、図6に示すような分割型課電電極をパイプの外壁に設置した。測定に際しては一つの電極に交流電圧を印加し、もう一方の電極から流出する漏れ電流を測定する。この場合、測定される漏れ電流には、流動帶電による直流の漏



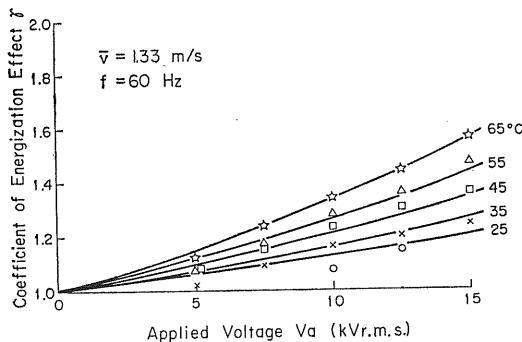


図7 課電効果の印加電圧依存性

Fig. 7 Dependence of energization effect on applied voltage.

$$q(z, x) = \{q(z)/\delta\} \cdot \exp(-x/\delta) \times \exp[(\mu E_0/2\pi f\delta) \{1 - \cos(2\pi f t)\}] \quad (34)$$

式(4)の代りに式(34)を用いて漏れ電流の式を求め、課電時と無課電時の比をとった後、その時間平均を計算すると、課電効果倍数 γ は次式のように表わされる。

$$\gamma = f \cdot \int_0^{1/f} \exp[(\alpha \mu V_a / 2\pi f\delta) \times \{1 - \cos(2\pi f t)\}] dt \quad (35)$$

3.3.1 印加電圧依存性

図7に油流速 $\bar{v}=1.3 \text{ m/s}$ 、印加電圧の周波数 60 Hz のときに、油温をパラメータとして、課電効果倍数の印加電圧依存性を求めた結果を示す。課電効果倍数は印加電圧に比例して増加し、その傾斜は油温が高いほど大きくなっている。図中の実線は後述するように、計算により求めた理論曲線を示している。

3.3.2 油温依存性

図7の 10 kV における実測値を式(35)に代入して数値計算により $\alpha \mu / \delta$ の値を求めるとき、図8の○印のようになる。

$\alpha \mu / \delta$ の油温依存性は以下のように考えられる。式(1)式(5)および Nernst-Einstein の関係式より、 $\alpha \mu / \delta$ は温度の関数として次のように表わされる。

$$\alpha \mu / \delta = (\beta / \sqrt{T}) \exp(-W_e / 2kT) \quad (36)$$

ここで

$$\beta = \alpha (ek_0 \mu / \epsilon h)^{1/2} \quad (37)$$

である。いまの場合、パイプ内における油流は全温度領域で乱流となっており、以前に述べたようにイオン移動度の温度依存性は一定と見なすことができる。

式(36)に図8で求めた 65°C の場合の実測値を代入することにより β の値を求める

$$\beta = 210$$

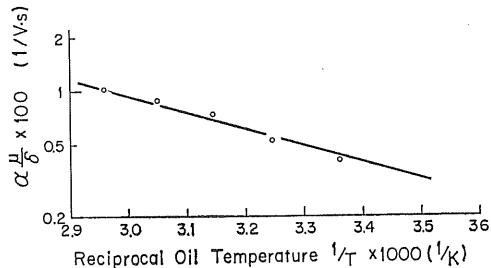
図8 $\alpha \mu / \delta$ の温度依存性

Fig. 8 Temperature dependence of coefficient $\alpha \mu / \delta$.

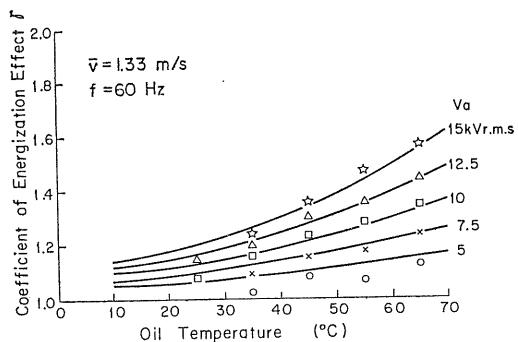


図9 課電効果の油温依存性

Fig. 9 Dependence of energization effect on oil temperature.

となる。この値と式(36)より $\alpha \mu / \delta$ の温度依存性を求めたのが図8の実線であり、実測値とよく一致している。

図9は油流速 $\bar{v}=1.33 \text{ m/s}$ 、周波数 60 Hz の場合に印加電圧をパラメータとして課電効果倍数の油温依存性を求めたものであり、図中実線は計算により求めた理論曲線である。

3.3.3 周波数依存性

印加電圧の周波数を $40 \sim 150 \text{ Hz}$ の間で変化させて、課電効果に与える周波数の影響を調べた。図10は課電効果倍数を油温をパラメータにとり、周波数の逆数で整理したものである。この図は印加電圧の周波数が低いほど、課電効果の大きいことを示している。これは、イオンの移動距離が長くなるためと考えられる。なお、図中の実線は、式(35)、式(36)と $\beta=210$ を用いて計算した結果である。

4. 実規模モデル変圧器における課電効果への適用

変圧器内部で発生する流動帶電も、コイル巻線に交流電圧を印加した場合増加する^{1,3,5)}。実規模の大型モデル変圧器を使用して、この課電効果を測定した結果を図11に示す⁵⁾。図中△印は無課電の状態での高圧および中圧

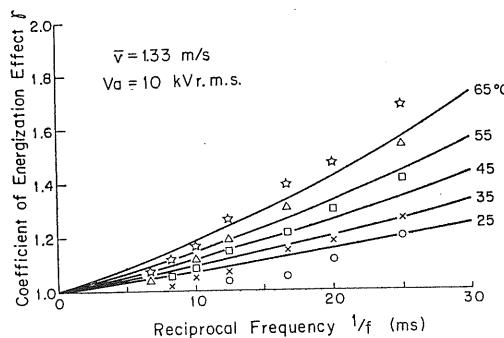


図 10 課電効果の周波数依存性

Fig. 10 Dependence of energization effect on reciprocal frequency.

コイルからの漏れ電流を示しており、□と○印はそれぞれ $0.5E$ および $1.0E$ を課電した場合のコイル漏れ電流を示している。ただし、 E は変圧器の定格電圧である。

まず $0E$ 、すなわち無課電時における実線は、油流が層流の場合の式(27)と式(28)を用いて計算した結果である。理論曲線は比較的実測値に合っているが、油温が 75°C のときの実測値が計算値より少し低い値となっている。これは、変圧器のコイル漏れ電流は、内部で発生した電荷の一部しか測定しておらず、油温が高くなつたことにより内部での各部分の抵抗が変化し、コイルへの負イオンの移動が減少したか、あるいは油中の正イオンが他の部分よりコイルへ緩和しやすくなつたためと考えられる。

次に、 $0.5E$ および $1.0E$ における実線は、 $0E$ における漏れ電流の式と、課電効果の式(35)、式(36)を用いて計算した結果である。この場合 β の値は、式(35)に $0.5E$ 、 40°C における一つのデータを代入し数値計算により求めた。コイル漏れ電流は低温域では温度とともに上昇し、高温域では温度とともに減少するが、そのピークは印加電圧の増加とともに高温側に移動している。いずれの場合も理論曲線と実測値は比較的よく一致しているが、 75°C で両者が少しずれるのは、もともと漏れ電流の計算値が少し高くなつたためである。

5. あとがき

大型変圧器における流動帶電現象を究明するため、プレスボードで成形されたパイプと変圧器油を用いて、流動帶電による漏れ電流特性および外部交流電界を印加した場合の課電効果について実験を行なうとともに、理論的な検討を行なった。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

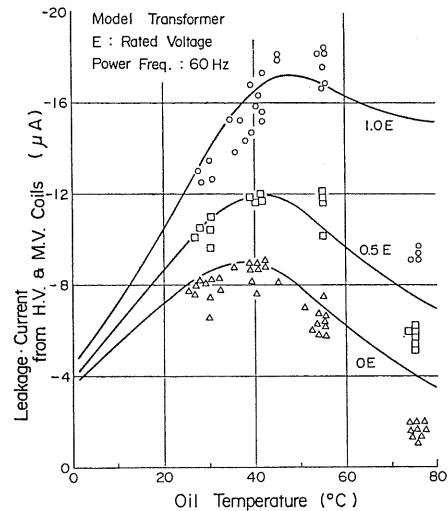


図 11 実規模モデル変圧器における課電効果

Fig. 11 Energization effect in fullscale model transformer.

(1) プレスボードパイプにおける油流は、低流速域では層流、高流速域では乱流となり、その変換点において流動帶電による漏れ電流は激しい振動を示す。

(2) 油中電荷の分離と緩和に基づいた理論より求めた式は、流動帶電による漏れ電流の油流速および油温依存性をよく説明できる。

(3) パイプ中における流動帶電は、外部から交流電界を印加することにより増大する。

(4) 流動帶電が外部交流電界によって増大するのは、紙と油の界面に分布した正イオンが外部電界によって、油中で振動することが原因であると仮定して求めた理論式は、課電効果の印加電圧依存性、油温依存性そして印加電圧の周波数依存性をよく説明できる。

(5) 本論文で求められた漏れ電流および課電効果の理論式は、実規模のモデル変圧器で得られた実測値ともよく一致した。

最後に、この研究にあたりご支援、ご助力をいただいた各電力会社をはじめ、三菱電機㈱の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 菅 寿郎, 三浦良和, 渡邊次男, 石井敏次, 新田東平: 三菱電機技報, 52 (1978) 915
- S. Shimizu, H. Murata and M. Honda: IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-98 (1979) 1244
- M. Higaki, Y. Kako, M. Moriyama, M. Hirano, K. Hiraishi and K. Kurita: ibid., PAS-98 (1979) 1259
- M. Higaki, H. Miyao, K. Endou and H. Ohtani:

- ibid., PAS-98 (1979) 1275
- 5) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii, N. Yamada and T. Nitta : ibid., PAS-99 (1980) 335
- 6) T. Tanaka, Y. Yasojima, N. Yamada, A. Kishi and T. Nitta : ibid., PAS-99 (1980) 1097
- 7) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Electrostatics in Petroleum Industry*, Elsevier, Amsterdam (1958)
- 8) 田中俊秀, 山田直也 : 静電気学会誌, 8 (1984) 126
- 9) 田中俊秀, 嘉木 覚, 新田東平 : 昭和52年電気学会関西支部連合大会予稿集, G-12 (1977)
- 10) G. Schön : *Handbuch der Raumexplosionen*, p. 302, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. (1965)
- 11) 増田閃一 : 電子通信学会誌, 56 (1973) 818
- 12) 宮本晃男, 土江基夫, 石井敏次 : 電気学会放電絶縁材料研究会, ED-76-8, EIM-76-15 (1976)