絶縁油の帯電度と帯電発生要因 に関する一考察

正 員 大久保 仁 (東 芝)
正 員 矢 成 敏 行 (東 芝)
正 員 池 田 正 己 (東 芝)
正 員 本 多 正 己 (東 芝)
非会員 柳 川 和 広 (東 芝)

1. ま え が き

液体が固体材料上を流動することによって生ずる静電気帯電すなわち流動帯電現象は、これまで石油産業などで問題となり研究されてきたが、最近になって大容量電力用変圧器における絶縁油と紙・プレスボードなどの固体絶縁物との間で発生する現象として注目されるようになった。大容量電力用変圧器では冷却効率を上げるため絶縁油が固体絶縁物上を流動しており、最近の絶縁材料およびそれらの処理技術の質的向上によって、従来は問題とされなかった流動帯電現象がクローズアップされてきた。これらの流動帯電現象を詳細に研究し、変圧器絶縁特性に及ぼす影響や、その許容限界を求めることは重要である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

変圧器内の流動帯電現象を支配する要因として、流速・温度・流路形状・固体絶縁物表面状態などが考えられるが、これらと並んで絶縁油の帯電度特性を挙げることができる。それは、流動帯電現象が液体および固体の両相を構成するそれぞれの物質の特性に依存しているものの、イオンなどの移動しやすい液相中の因

子とりわけ重要な役割を果たすものと思われ、従って絶縁油の特性によって大きく影響されると考えられるからである。一般に絶縁油が正、プレスボードなどが負極性に帯電するが、これは油中の正・負イオンの吸着係数の差により負イオンがより多くプレスボード側に吸着されるためであると考えられている。その結果として油中に残存過剰正イオンが分布し、流れによって運ばれて流動電流となる。

これまでの多くの研究結果により、従来より絶縁油の電気的特性を示す一つの指標であるところの導電率や誘電正接のみで、絶縁油の帯電のしやすさすなわち帯電度(本論文では、流動により帯電した油中の帯電電荷密度を pC/cm^3 の単位で表わしたもの)を決定することはできないことが明らかにされており、絶縁油の帯電度を直接測定する必要がある⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾。

絶縁油の帯電度を変圧器の帯電状況と対応づけて測定するためには、測定原理において変圧器における現象との等価性を有する必要があり、また測定装置としての良好な再現性や操作性の良さなどが重要となってくる。これまでに用いられてきた種々の帯電度測定装置は、この変圧器内の現象との等価性という点において十分であるとは言えず、筆者らはこれらの要請を満たす循環式帯電度測定装置を開発し、その特性の調査を続けてきた⁽⁴⁾。循環式帯電度測定装置はフィルタ効果を利用しているため測定感度が良く、油中の微量な因子による帯電度変化特性も測定できるため、絶縁油種類の違いや油中不純物による帯電度への影響などを求め、流動帯電を発生させる油中の種々の支配的因子

Consideration on a Charging Tendency and a Primary Factor Causing Static Electrification of Insulating Oil. By Hitoshi Okubo, Member, Toshiyuki Yanari, Member, Masami Ikeda, Member, Masaki Honda, Member & Kazuhiro Yanagawa, Non-member (Toshiba Corp.).

大久保 仁: 正員, 東京芝浦電気(株)

矢成敏行: 正員, 東京芝浦電気(株)

池田正己: 正員, 東京芝浦電気(株)

本多正己: 正員, 東京芝浦電気(株)

柳川和広: 非会員, 東京芝浦電気(株)

について検討を加えることができたので、以下に報告する。

2. 循環式帯電度測定装置

〈2・1〉 帯電度測定 従来より考えられている帯電度測定装置のうち、絶縁油の帯電度測定に使用できるものとして直管流下式⁽⁵⁾・改良形流下式⁽⁶⁾・回転式⁽⁴⁾など幾つかを挙げることができる^{(1) (9)}。いずれの方式を用いても、変圧器内の流動帯電現象との対応・等価性を求めるためには全体を密封構造とし、脱気・脱水分などの変圧器なみの絶縁油処理をすることが必須となる。また、帯電発生部として変圧器内で使用されている絶縁紙あるいはプレスボードなどを用いることが必要となる。上記の帯電度測定のための各方法・装置ともそれぞれの特徴を有しており、その詳細については文献(1)に譲るが、いずれも測定値の再現性・感度・少量サンプル測定・短時間測定・操作の容易性などの点で十分であるとは言い難い。

筆者らはこの点を考慮して、変圧器内の現象と等価性があり、感度が良好で再現性もあり、かつ少量のサンプル量で短時間測定のできる循環式帯電度測定装置を研究開発してきた。循環式帯電度測定装置は通常の帯電度測定のほかに、油中の微量な因子による帯電度の違いを求めることが可能であり、帯電発生の要因となる因子を求める手段となり得る。

すなわち、短時間測定が可能であることは各試料を厳密な意味で同一条件下で測定・比較できることを意味しており、再現性の高い測定値が得られることを裏付けている。また、少量のサンプルで測定が可能であるということは感度の良さとも関連性を有し、油中に存在する微量な成分・因子の違いによる帯電度の相对比较が可能であることを示している。

〈2・2〉 循環式帯電度測定装置の測定原理と諸特性

循環式帯電度測定装置の構成を第1図に示す。帯電発生部は変圧器内で使用されているクレープ紙を円筒状に巻付けたもので、その中をフィルタ状に絶縁油が通過するので、帯電発生量が多く感度が良くなるようになっている。帯電発生部のクレープ紙とそれを収めたホルダを第2図に示す。帯電発生部はテフロン(PTFE)によって全体が周囲より絶縁されており、帯電発生部より大地へ流れる電流が測定され、記録されるようになっている。

循環式帯電度測定装置の大きな特徴の一つは、帯電発生部の直前にサンプル注入部を備えていることである。すなわちベース油と呼ばれる絶縁油が一定流量で装置内を循環し、帯電発生部で定常電流を発生してい

第1図 循環式帯電度測定装置の構成

Fig. 1. Construction of circulating type charging tendency measuring apparatus.

(a) クレープ紙ロール

(b) 発生部ホルダ

第2図 帯電発生部

Fig. 2. Electrification generating part.

るとき、注入部より帯電度の被測定油(サンプル油)を注入すると、ベース油の一部がサンプル油に置き換わって帯電発生部を流れる(サンプル注入部の上流にそれまで発生した電荷の緩和と注入による電力上昇を抑えるための緩和タンクがあるので、サンプル注入によっても帯電発生部を流れる全流量は一定に保たれる。つまり、ベース油を抜き取りサンプル油として油入したとき電流波形に変化はないことが確かめられている)。このときベース油とサンプル油との間に帯電度差があれば、それに比例して変化した電流波形よりサンプル油のベース油に対する相対帯電度、すなわちサンプル油とベース油の帯電度の差が求まり、ベース油の帯電度からサンプル油の帯電度が求まる。これが循環式帯電度測定装置の測定原理であり、サンプル油注入時の代表的電流波形をモデル的に示すと第3図のようになる。

第3図に示した電流波形により帯電度を求める過程を、以下に簡単に説明する。ここで、 i_0 はベース油の定常発生電流(A)、 α はサンプル油の注入量(cm^3)、 L をベース油の流量(l/min)とすると、サンプル油の帯電度 q' (pC/cm^3) は

$$q' = q_0 + (q_s/\alpha) \dots \dots \dots (1)$$

で求まる。ここで、 q_0, q_s は

$$q_0 = (i_0 \times 60) / (L \times 10^3) \dots \dots \dots (2)$$

第 3 図 サンプル注入時の電流波形
(モデル図)

Fig. 3. Current waveform by sample oil injection (model for explanation).

第 1 表 測定条件

Table 1. Measuring condition.

	最小～最大	最適条件	単位
サンプル注入量	20～100	20～50	cm ³
サンプル注入速度	2～20	10～15	cm ³ /s
ベース電流	0.1～8.0	0.5～1.0	nA
ベース流量	2.5～4.5	3.5	l/min
油温	15～40	20	°C

$$q_s = \int_{t_1}^{t_2} (i(t) - i_0) dt \dots \dots \dots (3)$$

と表わされる。ここでわかるように、 q_s は第 3 図で示した電流波形の変化分であり、ベース電流 i_0 に対して波形が下に出る場合には q_s' で示してあり、 q_s は負になる。従って、 (q_s/α) は注入サンプル油 1 cm³ による電流波形の変化分となり、サンプル油とベース油の帯電度の差である。一方、 q_0 はベース油の帯電度であり、サンプル油の帯電度 q' は q_0 および (q_s/α) により (1) 式から求まり、単位は pC/cm³ となる。

(1)～(3) 式に示した測定原理は、数多くの裏付け測定により確認チェックされている⁽⁴⁾。すなわち、帯電度測定が文献 (4) で示されたある一定の条件下、すなわち第 1 表の範囲内でサンプル注入量に対して直線性のあること、注入速度に影響を受けないこと、ベース油の種類あるいは変化によって影響のないこと、ベース油の流量に依存しないこと、発生部クレープ紙の種類やエージング時間などに依存しないことなどが既に明らかになっている。

絶縁油の帯電度は温度によって大きく影響を受ける。各種絶縁油を用いて調査した結果、20°C を基準として任意の温度 θ (°C) における温度校正係数 η は 15～45°C の範囲において

$$\eta = \exp(1.62 - 0.081\theta) \dots \dots \dots (4)$$

と表わされる。運転中の変圧器などから直接採油したサンプルを測定する場合など高温のサンプルを測定する場合も生ずるが、このような場合にはベース油とサンプル油との間に温度差がなければ (4) 式による η の校正のみで標準状態における帯電度値 q を求めること

ができる。すなわち、

$$q = \eta \cdot q' \dots \dots \dots (5)$$

となる。また標準状態におけるベース油の流量は 3.5 l/min 一定としているが、 $L=2.5 \sim 4.5$ l/min の範囲内ではベース油依存性には直線性のあることが確かめられている。

以上説明したように、循環式帯電度測定装置は (1)～(5) 式によって帯電度が測定でき、通常の測定操作における操作条件などには依存しないことがわかる。また既に明らかなことではあるが、装置全体が完全密封系になっており絶縁油も脱気・脱水分処理後注入されているので外部環境の影響を受けない。以下の各測定において、帯電度値としてはすべて標準状態における値 (20°C, $L=3.5$ l/min) を用いることにする。

3. 油中不純物と帯電度

〈3・1〉 絶縁油種類と帯電度 循環式帯電度測定装置を用いて、一般に使用されている各種の絶縁油の帯電度を長時間にわたって測定した結果を第 4 図に示す。同図より絶縁油の種類によって帯電度には大きな差のあることがわかると同時に、装置内を循環しているベース油の発生するベース電流値が一けた程度変化しても、再現性の良い帯電度値が得られていることがわかる。ここに絶縁油 A は新油の変圧器油であり、絶縁油 D は一般使用絶縁油内で非常に多数回放電を起こした後のものである。

絶縁油 A の特性を第 2 表に示す。第 4 図では絶縁油 A の帯電度値にややばらつきが見られるが、これは絶縁油 A の帯電度値が 2～4 pC/cm³ 程度と非常に小さい値であるためである。

第 5 図は 10 種類の市販絶縁油について、その新油状態および強制加熱した後の帯電度を測定した結果で

第 4 図 ベース電流と各種絶縁油帯電度

Fig. 4. Charging tendency of various kind of insulating oil and base current.

第 2 表 絶縁油 A の諸特性
Table 2. Characteristics of sample oil A.

比重	粘性 30°C	流動点	抵抗率 80°C	分子量	C_A (%)	C_N (%)	C_R (%)	C_P (%)
0.878	11.73 cs	-32.5°C	$6.35 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$	280.6	17.2	26.4	43.6	56.4

第 5 図 各種絶縁油の帯電度

Fig. 5. Charging tendency of various kind of insulating oil.

ある。同図より、新油状態でも絶縁油の種類によって一けた程度の帯電度差のあること、また強制加熱した後に帯電度の上昇傾向があるが、その程度にはばらつきのあることなどが明らかになった。なお、この場合の強制加熱条件は窒素中・銅共存下で 150°C・1 時間加熱を行なったものである。

このように、絶縁油の銅共存下での強制加熱劣化によって帯電度が上昇する過程をもう少し詳しく調査するために、強制加熱時の共存銅量を変化させて油中溶存銅量と帯電度との関係を調査した。強制加熱条件は窒素中で 150°C・6 時間、絶縁油 250 ml 中の共存銅表面積を 0.0~25.0 cm² と変化させたものである。

油中銅量と帯電度との関係を測定した結果を第 6 図に示す。同図より油中溶存銅量と帯電度との間に一定の関係が見いだされ、油中銅量が増すと共に帯電度が増加していることがわかる。帯電度の絶対値そのものは、このようなかなり厳しい強制加熱条件下ではばらつきも大きくあまり重要ではないが、全体の傾向を見ることが重要であると考えられる。

〈3・2〉 各種試薬添加と帯電度の変化 これまでの測定結果から、一般に新油は使用されている絶縁油よりも低い帯電度を示すことがわかり、絶縁油中の不純物や劣化生成物の中に帯電発生に影響を与える物質が存在するものと予想される。以下では絶縁油の劣化

第 6 図 油中溶存銅量と帯電度

Fig. 6. Dissolved copper rate in insulating oil and charging tendency.

生成物と帯電度との関係について考えてみる。

例えば、絶縁油が加熱劣化してゆく過程の一例として次のように考えることができる⁽⁷⁾。絶縁油の劣化はまず過酸化物が生じ、その結果アルコール・アルデヒド・ケトンなどの中間生成物を経て有機酸に至る。これらの反応速度は温度の上昇と共に促進される。一方、各種金属は絶縁油の劣化を促進し、特に Fe や Cu などが促進性を有しているとされている。また有機酸から更に進んで金属塩類になることがあり、そのうちでもオレイン酸銅、ステアリン酸銅などは絶縁油の劣化を促進する金属塩類であると報告されている。

これらの劣化生成物はそれらが微量であり、かつまた互いに関係をもって存在して複雑であるために、絶縁油の中から直接分析し取出すことは一般には困難である場合が多い。従って、筆者らはこれらの油中劣化生成物と関連性のあることが予想される幾つかの試薬を絶縁油に添加し、それによって帯電度が変化する過程を調査した。

まず、絶縁油劣化生成物の最終段階であり、また複雑な有極性物質やイオン性物質を多数含有していると思われるアスファルトを絶縁油に添加し、帯電度を測定した。そのときの電流波形を第 7 図に示す。同図にはアスファルトを 5 ppm および 10 ppm 添加したものについて示してあるが、アスファルト添加量と帯電度

第 7 図 アスファルト添加油注入時の電流波形

Fig. 7. Current waveform by injection of sample oil with additive asphalt.

第 8 図 アスファルト添加量とベース電流

Fig. 8. Additive quantity of asphalt and base current.

との間に明確な相関性のあることが確かめられている。例えば、アスファルト添加量とベース電流比についてまとめると第 8 図のようになる（アスファルトの添加による帯電度への影響度が大きいために、この場合はベース電流の変化量で測定した）。同図から、アスファルト添加によって帯電度が上昇してゆくことがわかるが、飽和傾向を示すのは循環式帯電度測定装置の帯電発生部における電荷分離に限界があるためと思われる。しかし、いずれにしてもこの結果より油中の有極性物質やイオン性物質が帯電発生要因の一つであると予想することができる。

次に、劣化生成物として予想される有機酸のうちから不飽和カルボン酸であるオレイン酸 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}]$ 、還元して成る飽和カルボン酸であるステアリン酸 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}]$ 、それに有機酸塩のうちからオレイン酸銅 $[\text{Cu}(\text{C}_{18}\text{H}_{33}\text{O}_2)_2]$ およびナフテン酸銅 $[\text{Cu} \cdot (\square) - (\text{CH}_2)_n)_2]$ を用いて、絶縁油新油に添加し帯電度の測定を行なった。ステアリン酸の添加の場合は 100 ppm までほとんど変化はなく、逆にオレイン酸・オレイン酸銅を添加した絶縁油の場

第 9 図 試薬添加量と帯電度

Fig. 9. Additive quantity of several reagent and charging tendency.

第 10 図 オレイン酸銅添加油の帯電度と $\tan \delta, \sigma$

Fig. 10. Charging tendency of insulating oil with copper oreate and $\tan \delta, \sigma$.

合は、第 9 図に示すようにそれぞれの添加量 (w/w) と帯電度との間に相関性のあることがわかった。このうち、特にオレイン酸銅添加時の帯電度と誘電正接 $\tan \delta$ ならびに導電率 σ について測定した結果を第 10 図に示す。

第 9 図、第 10 図より試薬添加量と帯電度、帯電度と誘電正接および導電率の間にほぼ比例関係のあることが明らかになり、この意味からも帯電度特性が絶縁油特性調査の一方法としても用いられ得ることが明らかである。ただし、オレイン酸およびオレイン酸銅添加時の帯電極性は、アスファルト添加時に比べて逆極性であった。続いてナフテン酸銅添加の場合には、10 ppm 添加ではほとんど変化のないものが 100 ppm 添加時には第 3 表に示すような変化を示した。帯電度特性のみならず、誘電正接ならびに導電率の値も変化している。第 9 図、第 10 図および第 3 表の結果より、

第 3 表 ナフテン酸銅添加量と帯電度

Table 3. Quantity of additive copper naphthenate and charging tendency.

	帯電度 q	誘電正接 $\tan \delta$	導電率 σ
新油	+ 2.1	< 0.001	0.80×10^{-15}
新油 + ナフテン酸銅 10 ppm	- 1.4	< 0.001	0.83×10^{-15}
新油 + ナフテン酸銅 100 ppm	- 27.0	0.260	1.00×10^{-14}
単 位	pC/cm ² (20°C)	% (80°C)	Ω/cm (80°C)

油中の有機酸や有機酸塩などが帯電発生に寄与している可能性が明らかになったわけであるが、帯電度と $\tan \delta$ や σ との相関性から、この実験によりやはり油中の有極性物質やイオン性物質も帯電発生源であることも裏付けられた。

以上の試薬添加による実験はすべて常温 (15~20°C) で行なったもので、今回は試薬添加時の温度特性を特に考慮していない。

〈3・3〉特殊フィルタと帯電度 これまでの諸調査により、油中の不純物・有極性物質、イオン性物質や劣化生成物などが帯電発生の要因の一つとして考えられることがわかったが、油中のこれらの物質を除去することができる特殊フィルタ⁽⁴⁾を用いて更に実験を行なった結果を以下に説明する。

ここで用いた特殊フィルタは、ろ過精度 50 mμ, φ350 mm で第 11 図 (a) に示すエレメント 7 枚構成を 1 セットとして用いている。(b) 図に示すように、フィルタを用いて絶縁油の循環ろ過を行なったときの循環回数に対する帯電度 q 、誘電正接 $\tan \delta$ 、導電率 σ の変化過程を第 12 図に示す。いずれの特性もこの特殊フィルタ循環により顕著に改善されることがわかる。フィルタ循環の各ステップにおける循環式帯電度測定装置による帯電度測定時の電流波形を第 13 図に示す。

第 12 図および第 13 図の結果より、フィルタによって除去された物質により、帯電度・誘電正接・導電率

(a) 特殊フィルタの構成 (1 枚分)

(b) 特殊フィルタの循環実験

第 11 図 特殊フィルタ

Fig. 11. Filter.

第 12 図 フィルタ循環回数と絶縁油諸特性の変化

Fig. 12. Number of times of filtering and variation of insulating oil characteristics.

のいずれも影響を受けていることがわかる。第 12 図に飽和特性が現われているのは、この実験が循環ろ過であり、従ってフィルタによる浄化作用が指数関数的

第 13 図 フィルタ循環時の帯電度測定電流波形

Fig. 13. Current waveform by charging tendency measurement on filtering.

第 14 図 リードモデル

Fig. 14. Lead model.

第 15 図 フィルタリング前後の各特性値の変化 (リードモデル)

Fig. 15. Variation of several characteristics before and after filtering.

になり、初期において特に顕著となるためであろう。

さて、これらの帯電度値を主とした絶縁油諸特性と、実際の帯電状況との関連性を明らかにしておくために、変圧器の一部を模擬した部分モデルを用いて調査を行なった。第 14 図に示すリードモデルをあらかじめ準備した高帯電度油 2,200 l 中にそう入し、油道における平均流速 1 m/s で油を流動させ、長期間にわたり多数回の油の帯電電位を測定した。続いて、上述の特殊フィルタを用いて全油量の 4 回の循環ろ過を行なった後、再び長期間にわたり多数回の油の帯電電位を測定した。その結果の油の帯電電位、帯電度、誘電正接、導電率について第 15 図に示す。これらの間には相関関係が認められ、循環式帯電度測定装置による帯電度値が実際の帯電モデルによって帯電状況と対応付けられることが証明された。

このような変圧器の部分モデルでは、流速・温度はもちろん流れの状態もフィルタリング前後で同一の状態とすることができるので、上述のような明確な結果が得られたものと思うが、流れの状態などが種々様々である実際の変圧器について、絶縁油の帯電度のみで

一概に説明するにはまだ無理があると言えるだろう。

4. 検 討

ここで説明した循環式帯電度測定装置は絶縁油と絶縁紙による帯電発生量をその測定原理に用いており、それらの処理状態も変圧器内のそれとほぼ同じに保っているため、変圧器内の絶縁油流動による流動帯電現象と帯電度とを対応づけて考えることができる。循環式帯電度測定装置で測定した結果、高帯電度油と低帯電度油であると判明した 2 種の絶縁油を、そのまま同一の変圧器に注油し変圧器全体の流動帯電状況を測定したところ、両者の間に明らかな相違がでたという実験報告がある⁽³⁾。すなわち、変圧器内の流動帯電現象は流速・温度・流れの状態やその他種々の要因によって影響されるが、同一の変圧器を用いてできる限り条件をそろえると、このように絶縁油の特性による影響が現われてくるものと思われる。この結果は第 15 図に示した結果と一致するものであり、これらの意味からして絶縁油の帯電度を測定することは重要であり、また循環式帯電度測定装置の測定法が有効であることが確認された。

さて、循環式帯電度測定装置は約 20 cm³ 程度のサンプル量で、しかもごく短時間で測定できる特徴を持っており、この利点を生かして各種絶縁油の帯電度比較測定や試薬添加絶縁油の帯電度変化特性が調査された。

第 4 図、第 5 図の結果から、絶縁油の種類によってまた新油・使用油の違いによって、更には同じ新油状態でも様々な帯電度を示すことがわかったが、一般の絶縁油特性上あまり相違が出なくても帯電度には差が出る場合が多く、帯電度を決定する種々の要因は複雑でかつ微量であり、帯電度そのものが非常に感度の良いものであることがわかる。各種の新油によって帯電度値にばらつきが見られるのは、新油の成分の違い、精製法・処理法の微妙な違いによるものと思われる。

絶縁油の強制加熱によって帯電度が上昇する傾向は一般の絶縁油の場合はすべて同じであり、強制加熱によって油中に発生した物質がその要因であると考えられる。絶縁油の劣化過程は複雑であり分析上も困難な問題が多いので、一概に決めつけることはできないが、第 5 図に示した例では銅共存下の強制加熱であり、有機酸や有機酸塩、とりわけカルボン酸塩、例えばカルボン酸銅などが帯電発生原因となっている可能性がある。このことはアスファルトや代表的なカルボン酸塩であるオレイン酸銅の添加によって絶縁油の帯電度が大きく影響されることよりも裏付けられる事柄

である。しかし、例えば第9図、第10図や第3表に示した実験結果も同一の条件下では非常に良い再現性を示すものの、温度とか測定時間、あるいは放置時間などの条件を変化させると、これとは違った結果を得ることもある。一方、絶縁油のなかではここに列挙したような劣化生成物や帯電発生因子が単独ではなく、複雑に互いに関係しながら存在しており、その合計として全体の帯電度を決定するので、実際の絶縁油の帯電度を決定する要因は非常に複雑であると予想される。

第10図に示した帯電度と誘電正接および導電率との間の関係は明確なものになっているが、これは純粋な新油に同一の試薬添加のみで測定した結果であるためである。一般に多種類の絶縁油についてこのような関係を調査すると、一対一の関係は得られず、ある幅を持ったものになることが知られている⁽⁴⁾⁽⁸⁾。つまり、一般の使用絶縁油では正極性イオン・負極性イオンの両者が存在し、導電率測定では共に同じイオン・電荷担体として働くのに対し、帯電度測定ではその差に近い概念の電荷移動・電荷分離が重要な役割を果たすためであろう。

さて、第11図に示した特殊フィルタにより帯電度、誘電正接、導電率などがともに改善され、それらの間の相関性が確認された。また、これらの結果は既に報告されている特殊フィルタによる静電気放電発生阻止効果⁽⁴⁾とも一致している。この特殊フィルタによって油中の物理的な微粒子なども同時に除去されているので単純には言えないが、フィルタでイオン交換された物質、吸着された物質などによって誘電正接・導電率が改善され、それらのうち幾つかは帯電発生要因であると言えるだろう。

フィルタより吸着物質を分析して明らかにすることは困難である場合が多いが、フィルタのイオン交換性や吸着性能から予想すれば、試薬添加実験で確認したような油中の複雑な劣化成分、金属塩、金属イオンなどがそれらであろうと思われる。

5. あとがき

微量の絶縁油の帯電度を再現性良く短時間で測定することのできる循環式帯電度測定装置を開発し、それを使用して各種絶縁油の帯電度相対比較や強制加熱劣

化時の帯電度特性、ならびに各種試薬添加時の特性を調査した結果、以下の事柄が明らかになった。

(1) 各種絶縁油はそれぞれ特有の帯電度を示し、一般に新油の場合は使用油よりも帯電度は低い。

(2) 銅共存下の強制加熱劣化により絶縁油の帯電度が上昇する傾向がある。

(3) アスファルトの添加により絶縁油帯電度はほぼ比例的に上昇する。

(4) オレイン酸やオレイン酸銅などの添加により絶縁油の帯電度は上昇し、併せて誘電正接値および導電率値も変化する。この場合、帯電極性はアスファルト添加の場合の逆極性になる。

(5) 特殊フィルタの適用により各種絶縁油特性は改良され、帯電度も減少する。

(6) 流路形状などの条件をそろえると、変圧器全体あるいはその部分モデルにおける流動帯電帯電量と、循環式帯電度測定装置を用いて測定した帯電度との間には明らかな相関性がある。

以上より、絶縁油の劣化生成物、特に油中に存在する各種の有極性物質やイオン性物質が帯電要因になり得ることが明らかになった。

本研究を行なうにあたり、種々の御指導を賜った名古屋大学 上田教授、東京電力(株) 高木顧問はじめ各位に感謝の意を表します。また、終始有益な御助言をいただいた当社重電技術研究所 山本所長、村野次長、伊勢課長ならびに浜川崎工場 村田副技師長、岡本変圧器部長、毛受開閉装置部長代理はじめ関係各位に感謝いたします。

(昭和55年4月22日受付、同55年12月23日再受付)

文 献

- (1) 田村・栗田・村田：電学誌，99，913（昭54-10）
- (2) 本多，他：静電気学会誌，3，258（昭54-5）
- (3) S. Shimizu, et al.: IEEE PES Meeting, F79 231-2 (1979)
- (4) H. Okubo, et al.: *ibid.*, A79 051-4 (1979)
- (5) A. Klinkenberg, et al.: *Electrostatics in the Petroleum Industry* (1958) Elsevier Pub. Co.
- (6) S. Yasufuku, et al.: Int. Workshop on Electric Charges in Dielectrics, No. 10 A-3 (1978)
- (7) 山田，他：新電気絶縁油（昭37）昭晃堂
- (8) M.R. Shafer, et al.: *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 69C, 307 (1965)
- (9) R. Tamura, et al.: IEEE PES Meeting, F79 640-4 (1979)