

論 文

送油式内鉄型変圧器における油の流動による静電気帶電現象

檜 垣 勝*, 加 子 泰 彦*, 森 山 昌 和**, 平 野 三 百 里 **
平 石 清 登**, 栗 田 健 太 郎 ***

(1979年10月11日受理)

Static Electrification Caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled
Core Type Transformers

M. HIGAKI,* Y. KAKO,* M. MORIYAMA,** M. HIRANO,**
K. HIRAISHI** and K. KURITA***

(Received October 11, 1979)

This paper deals with the investigation of some special features of the static electrification which is caused by oil flow in forced oil cooled core type transformers. At first, using simplified models of oil flow, the basic characteristics of the electrostatic charge separation caused by oil flow was investigated. Second, using actual transformers, the distribution of the static charges generated by static electrification in each part of a transformer and the influence of some factors on the electrostatic charge distribution in transformers were studied. Finally, the conditions of the occurrence of the partial discharges caused by static electrification were investigated by increasing the total oil flow rate up to several times the rated value. Consequently, the phenomena of static electrification in large power transformers were clarified, and also it was found that under certain oil flow conditions partial discharges took place at locations where the electrostatic charges caused by static electrification had accumulated on the surface of the solid insulating structures in transformers.

1. まえがき

電力用変圧器においては、巻線を有効に冷やすために強制的に巻線内に変圧器油を流すことが多い。油を強制的に流すということは、いわば油と固体とが摩擦することになり、油と固体との界面で静電気が発生する。一般に絶縁性液体が流動すると、静電気の発生する現象は、流動帶電現象として石油などのパイプライン輸送において良く知られており、この分野で活発な研究が進められている¹⁻³⁾。この流動帶電現象は変圧器では液体の導電率、流速および油通路の構造と油自身の流動帶電性が最も重要なパラメータであると考えられている。

近年、とくに変圧器の大容量化、高電圧化が進められてきた。大容量化に伴い巻線の冷却効率を良くするために循環油量が増大し、また高電圧化に伴う絶縁信頼性の向上のために絶縁抵抗の高い良質の固体絶縁材料が大量に使用されるようになっている。このことは静電気帶電という面からみると静電気の発生が増大し、かつ発生した静電気が逃げにくい傾向になってきていくことに相当する。このように静電気帶電によって変圧器の内部に多量の静電荷が蓄積されるようになると、変圧器内でかなり高い直流電界が発生することが予想され、しかも油中放電の発生にまで至る可能性も考えられる。

変圧器の絶縁信頼性を向上させるためにも、このような静電気帶電に起因するトラブルボテンシャルを十分究明しておく必要がある。しかし、変圧器での油の流動による静電気帶電については従来経験的に知られているだけで、その定量的な解析や油中放電の可能性にまで立ち至って検討した例はない。筆者らはこの変圧器内の静電気帶電現象を解明するため数年来研究を進めてきた。

まず、基礎的な要素モデルを用いて油流時の静電気発生量を実測し、その基礎特性を明らかにした。ついで、実変圧器を用いて油流時の変圧器内の電荷分布とそれに及ぼす各種要因、油温、送油量、冷却器およびAC励磁

* 株式会社日立製作所日立研究所 (319-12 日立市久慈町 4026)

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
4026, Kuji-cho, Hitachi 319-12, Japan

** 株式会社日立製作所国分工場 (316 日立市国分町 1-1-1)

Kokubu Works, Hitachi Ltd., 1-1-1, Kokubu-cho, Hitachi 316, Japan

*** 株式会社日立製作所電力事業本部(100 東京都千代田区 大手町 2-6-2)

Power Generation and Transmission Group,
Hitachi Ltd., 2-6-2, Otemachi, Chiyoda-ku,
Tokyo 100, Japan

の有無の影響を実験的に明らかにした。さらに実変圧器で送油量を定格送油量の4倍まで増大させることにより、静電気帶電による油中放電の発生限界を把握した。これらの一連の実験と電界解析とによって変圧器における静電気帶電に対する絶縁信頼性を確認できるようになった。

本論文は、内鉄型変圧器を対象として、変圧器における静電気帶電現象と油中放電の発生について解析した結果を述べるものである。

2. 実験方法

2.1 プレスボードパイプモデル

変圧器での油流による静電気発生を調べるために当たっては、固体絶縁物と変圧器油とが接している場合が最も重要である。変圧器では固体絶縁物のうちでもプレスボードで作られた油道が多い。このプレスボードで作られた油道内での静電気の発生量を基礎的に調べるためのモデルの一例を図1に示す。本論ではこのモデルをプレスボードパイプモデルと称する。

このモデルで、断面 $9.6 \times 10 \text{ mm}$ の油道内を変圧器油が流れる。プレスボードパイプの外側に電極を取り付け、その電極から大地に漏洩する電流を測定した。この電流はプレスボードと油との界面で、油流により電荷分離が起きた際にプレスボードパイプ内面に残った静電荷がプレスボードを介して大地に漏洩していく電流である。

2.2 実変圧器

表1に今回の静電気帶電試験に用いた代表的な内鉄型変圧器の仕様を示す。本論では500 kV 1,000/3MVA 変圧器での実測結果を主体に報告する。

実変圧器での静電気帶電特性を測定するための試験回路を図2に示す。この回路には静電気現象の測定のため特別な配慮がなされている。構造面での特徴は下記のとおりである。

(1) 卷線内での電荷分布を求めるために多数のセンサ

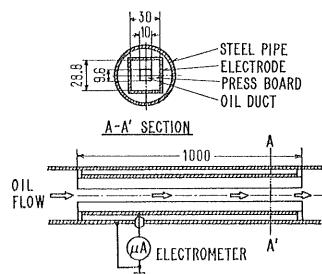
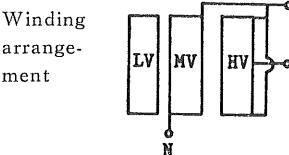
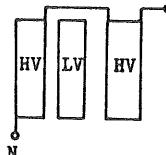


図1 プレスボードパイプモデルの構造

Fig. 1 Construction of press board pipe model.

表1 静電気帶電試験に使用した変圧器の仕様

Table 1 Specification of actual transformers used for static electrification tests.

Transformer	500 kV 1,000/3MVA	525 kV 1,200MVA
Type	Core type	Core type
	Single phase auto transformer	3 phase transformer
Cooling	Forced oil Forced air	Forced oil Forced air
Winding arrangement		

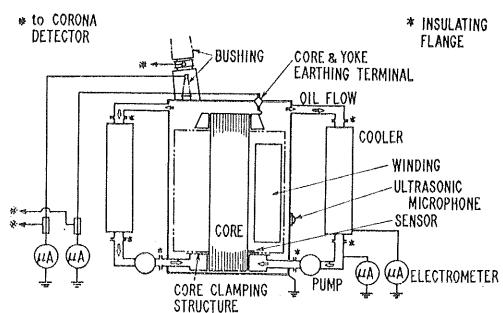


図2 実変圧器での静電気帶電試験の回路

Fig. 2 Test circuit for static electrification in actual transformers.

を巻線内に挿入した。とくに巻線下部の端部絶縁に集中してセンサを挿入している。これらのセンサからの対地漏洩電流を測定することにより巻線内での電荷分布を推測することができる。

(2) 変圧器各部での電荷発生状況を把握するために、変圧器の各要素を絶縁フランジにより互いに絶縁し、かつそれらを大地からも絶縁した。これにより巻線の対地漏洩電流だけでなく、冷却器、送油ポンプ、および鉄心と鉄心締金具とを一括した鉄心の対地漏洩電流も測定することができる。

試験条件としては、油の温度、送油量、冷却器の種類およびAC励磁の有無をパラメータとしている。とくに、油中放電の発生限界の把握のために送油量を定格送油量の4倍まで増大して試験できるようにしている。

静電気帶電により変圧器内で油中放電が発生したか否かの検出は、各部分からの対地漏洩電流の瞬時変化の測

定だけでなく、ERA および RIV による部分放電検出器と変圧器タンク壁に取り付けた超音波マイクロホンなどを用いて行なわれた。

3. 油流による静電気発生の基本特性

本章ではプレスボードパイプモデルなどによる実験結果をもとに、変圧器油と固体絶縁物との界面における油流による電流発生の基本特性について報告する。発生電流がわかれば電荷分布を推測することができる。なお、プレスボードパイプモデルを用いた実験では、流入する変圧器油からの静電荷の注入が無視できるように配慮されており、以下で述べる諸特性は油流による静電荷の発生の最も基本的な特性を示すものである。

3.1 油の平均流速と電荷発生量との関係

プレスボードパイプモデル油道内での油の平均流速と電極からの対地漏洩電流との関係を図3に示す。電極からの対地漏洩電流は負極性である。このことは、油流により油とプレスボードとの界面で電荷分離が起き、油中に正電荷が分離され油とともに流れ去るのに對し、プレスボード表面に負電荷が残り、それが大地に対して漏洩することを示している。すなわち、油と固体絶縁物との界面では油流により油中に正電荷が、固体絶縁物表面に負電荷が分離される傾向が強いといえる。この現象は油と金属との界面でも同様であることが同じような金属パイプモデルでの実験によって確認されている。

油と固体絶縁物との界面での静電気発生量は電極からの対地漏洩電流の大きさで与えられる。油の平均流速が低い場合にはほぼ流速に比例して静電気発生量が増大するのに対して、流速が高くなると流速の約2乗に比例して増大することが図3よりわかる。

3.2 レイノルズ数と電荷発生量との関係

油の流れの状態を示す指標の一つであるレイノルズ数と電極からの対地漏洩電流との関係を図4に示す。層流

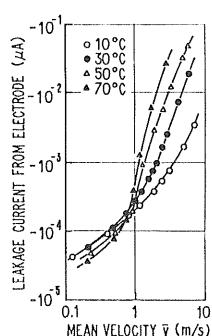


図3 平均流速と電極の対地漏洩電流との関係

Fig. 3 Relation between mean velocity and leakage current from electrode.

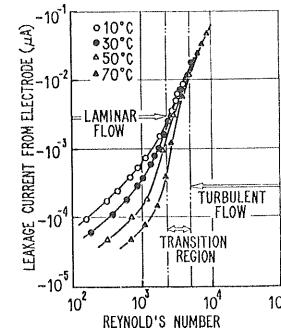


図4 レイノルズ数と電極の対地漏洩電流との関係

Fig. 4 Relation between Reynold's number and leakage current from electrode.

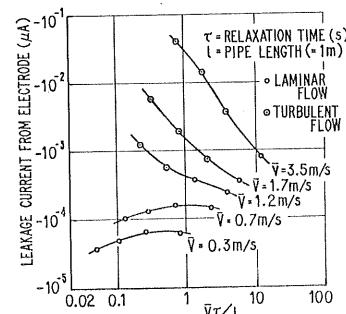


図5 $v\tau/l$ と電極の対地漏洩電流との関係

Fig. 5 Relation between $v\tau/l$ and leakage current from electrode.

領域ではレイノルズ数に比例して電荷発生量が増大し、レイノルズ数一定の場合に油温が高いほど電荷発生量は少なくなる。一方、乱流領域ではレイノルズ数の約2乗に比例して電荷発生量が増大し、レイノルズ数一定の場合油温にはほとんど依らないことが特徴である。すなわち乱流領域では油の流れの状態によって電荷発生量がほぼ決まるということができる。

層流から乱流への遷移領域においては流れが非常に不安定であり、電荷発生量もレイノルズ数の2~5乗に比例して増大することがわかる。

3.3 油温と電荷発生量との関係

平均流速を v 、油の緩和時間を τ 、パイプ長を l とすると静電気の発生においては $v\tau/l$ が一つの指標となる。図5はこの $v\tau/l$ と電極からの対地漏洩電流との関係を示したものである。ここで平均流速 v をパラメータとしている。緩和時間 τ は油の誘電率を ϵ 、導電率を κ とすると次式で与えられるものである。

$$\tau = \epsilon / \kappa$$

油温が高くなると κ が大きくなり、 τ は小さくなる。本

実験ではパイプ長 l を 1 m 一定としており、平均流速 v を一定にすると図 5 の横軸は油温の逆数になっているともいえる。

層流においては平均流速が一定であるならば、ある油温で電荷発生量が最大を示すような特性となり、乱流においては油温が高いほど電荷発生量が多くなるという特徴である。このような電荷発生量と $v\tau/l$ との関係を調べることにより、その内部での油の流れの状態、層流か乱流かを推定することも可能である。

3.4 AC 励磁と電荷発生量との関係

油中に AC 電界がかかったとき、油と固体との界面で油流による電荷発生量がどう変化するか、図 1 と同種の要素モデルを用いて実測した。図 6 は油にかかる AC 電界強度と AC 励磁による、発生電流の増加の割合との関係を示したものである。この関係は油の平均流速を変えてもほぼ同じであった。

油にかかる AC 電界強度が高くなると電荷発生量も増大すること、しかも油温が高いほど電荷発生量の増大の割合も大きくなることが特徴である。AC 励磁により電荷発生量が増大する現象は、油と固体との界面で油中に分離された正電荷がその AC 電界に応じて油中を振動するために見掛け上固体表面から離れて分布するようになり、その分だけ油とともに流れ去る正電荷の量が多くなったために起こるものと解釈できる。

油の流动による油と固体絶縁物との界面での電荷発生量の基本特性を本章で報告した。実際の変圧器では上流からの静電荷の流入があり、電荷の発生のほかに流入する静電荷の緩和が重畠されることになる。

4. 内鉄型変圧器における油流時の電荷分布

図 2 に示した試験回路で、冷却器がついている正規の状態で送油量、油温を変えて変圧器各部の対地漏洩電流、および巻線内に挿入したセンサの対地漏洩電流あるいは

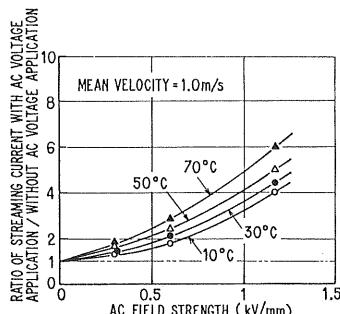


図 6 流動電流と油の AC 電界強度との関係

Fig. 6 Relation between streaming current and AC field strength in oil.

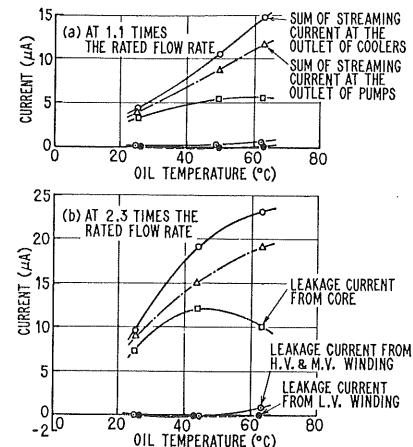


図 7 500 kV 1,000/3MVA 変圧器各部の電流の温度特性

Fig. 7 Temperature dependence of currents in each part of 500 kV 1,000/3MVA transformer.

帶電電位を測定した。さらに、冷却器の種類および AC 励磁が変圧器内の静電気帶電特性に与える影響についても実験した。それらの実験結果から得られた実変圧器での静電気帶電特性と電荷分布の特徴について報告する。

4.1 各部の対地漏洩電流の温度特性および送油量との関係

図 7 は 500 kV 1,000/3MVA 変圧器での高圧と中圧巻線、低圧巻線、および鉄心の対地漏洩電流と、冷却器出口および送油ポンプ出口での流動電流の温度特性を、送油量が定格送油量の 1.1 倍と 2.3 倍の二つのケースについて実測した結果である。図 7 から次のような特徴のあることがわかる。

(a) 冷却器出口での流動電流（正極性）が他の部位での電流に比べて大きい。

(b) 冷却器出口および送油ポンプ出口での流動電流と鉄心の対地漏洩電流は、高温領域での温度特性が少し違うが、全体的にはほぼ同じような温度特性を示す。

(c) 卷線の対地漏洩電流は油温や送油量を変えてあまり変化せず、他部位での電流値に比べて小さい。

冷却器からの電荷の流入の影響をさらに詳しく調べるために、送油ポンプ起動直後の鉄心および高圧と中圧巻線の対地漏洩電流の初期時間特性を実測した。その結果を図 8 に示す。鉄心の対地漏洩電流は送油ポンプを起動してから約 2 秒後に急激に増大しはじめ、6 秒後に最大値を示す。巻線の対地漏洩電流は送油ポンプ起動後約 4 秒して増大しはじめ、18 秒後に最大値を示す。これらの時間遅れは、冷却器内の油が送油ポンプにより鉄心締金具内および巻線内に流れ込むまでの時間に一致している。

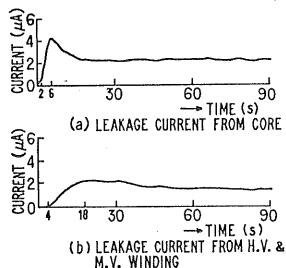


図 8 鉄心と巻線の対地漏洩電流の時間特性(定格送油量の1.1倍のとき)

Fig. 8 Time characteristics of leakage current from core and winding (at 1.1 times the rated oil flow rate).

る。

以上の実験結果から次のことが明らかとなった。

- (1) 冷却器で電荷分離が起き、油中に正電荷が発生する。油中正電荷は油とともに冷却器から流れ出る。
- (2) 冷却器で発生した油中正電荷は送油ポンプ、配管内で一部緩和したあと、鉄心締金具内に入り、その大多数の電荷が鉄心締金具に緩和する。
- (3) 鉄心締金具内を通った油は巻線の下側に形成されている巻線下部絶縁内の油道に入る。その油道内でも油流により電荷分離が起き、しかも油温が高いほど電荷発生量が大きい傾向がある。この点は鉄心の対地漏洩電流が送油ポンプ出口での流動電流よりも小さく、しかも油温が高いほどその差が大きいことから推測される。
- (4) 巒線でも油流により電荷分離が起きているが、冷却器で発生した油中正電荷の一部と巻線下部絶縁の油道内で発生した油中正電荷とが巻線内に流れ込み、緩和する。したがって、巻線の対地漏洩電流は巻線自身での電荷発生と巻線に入ってくる油中正電荷の緩和との重畳によって決まる。巻線での電荷発生量が小さく、流入する油中正電荷量とほぼつり合う程度であれば巻線の対地漏洩電流は小さく、送油量を変えてもその電流値はあまり変化しない。一方、巻線での電荷発生量が大きいと巻線の対地漏洩電流は送油量に対し依存性を示すようになるといえる。

4.2 巒線下部絶縁内の電荷発生特性

巻線下部絶縁の油道内での油流による電荷発生特性を調べるために巻線下部にいくつかのセンサを挿入し、センサの対地漏洩電流を実測した。図9は鉄心締金具の近くに配置したセンサからの対地漏洩電流の温度特性を測定した結果である。このセンサの対地漏洩電流は、油道内での電荷分離により絶縁物表面に残った負電荷が大地

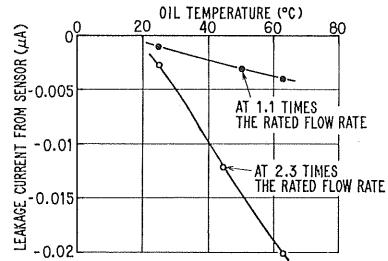


図 9 センサの対地漏洩電流の温度特性

Fig. 9 Temperature dependence of leakage current from sensor.

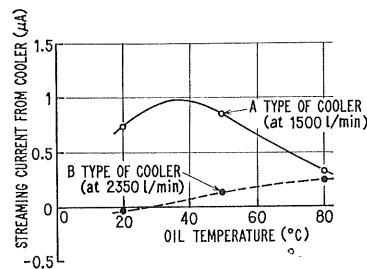


図 10 クーラの流動電流の温度特性に及ぼすクーラ種類の影響

Fig. 10 Influence of sort of cooler on the temperature characteristics of streaming current from cooler.

に対して漏洩する電流の一部を検出しているものである。

図9より、巻線下部絶縁の油道内においては油温が高いほど電荷発生量も大きく、送油量の約2乗に比例して電荷発生量が増大することがわかる。このことは前節で鉄心の対地漏洩電流の温度特性から推測したことと良く一致している。したがって、送油量がさらに増大すると絶縁物表面での帯電電荷量が急増し、その表面電位も上昇し、高い直流電界が生ずるようになる。すなわち、油中放電の発生の可能性も考えられるようになる。

4.3 冷却器の影響

冷却器で発生した静電荷が変圧器全体の電荷分布に大きく影響していることを4.1で明らかにした。そこで冷却器の種類が違うと変圧器の電荷分布にどう影響していくかを調べてみた。

図10はタイプAとタイプBの2種類の冷却器を単体で試験したときの電荷発生特性の実測結果である。AとBの違いは冷却器内の冷却管の構造の違いである。冷却器の種類によって発生電荷量やその温度特性が異なること、タイプAの冷却器のほうがタイプBのものよりも電荷を発生しやすいことがわかる。

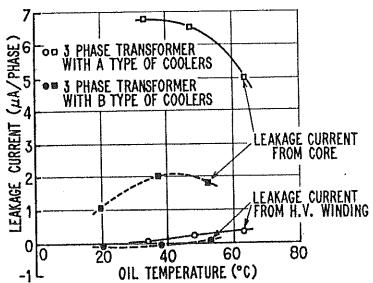


図 11 実変圧器での対地漏洩電流に及ぼすクーラ種類の影響

Fig. 11 Influence of sort of coolers on leakage current from core and H.V. winding in actual transformers.

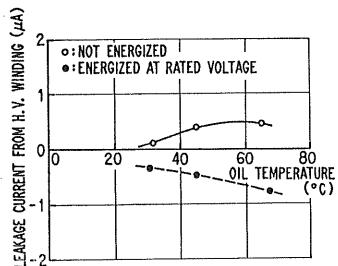


図 12 525 kV 1,200 MVA 変圧器高圧巻線の対地漏洩電流に及ぼす AC 励磁の影響

Fig. 12 Influence of AC energization on leakage current from H.V. winding in 525 kV 1,200 MVA transformer.

これら 2 種類の冷却器を取り付けて試験し、鉄心および高圧巻線の対地漏洩電流を測定した結果が図 11 である。タイプ A の冷却器を取り付けた変圧器では、タイプ B の冷却器を取り付けた変圧器に比べて、いずれの対地漏洩電流も全体的に正極性側に寄っている。これはタイプ A の冷却器での発生電荷量がタイプ B のものに比べて数倍大きく、鉄心締金具および巻線への油中正電荷の緩和がその分だけ多くなり、正極性側に寄ってきたものと考えられる。しかし、冷却器で発生した油中正電荷の大多数は鉄心締金具に緩和し、その残りが巻線内に入り緩和するために、冷却器の違いが鉄心の対地漏洩電流に大きな影響を与えるのに対して、巻線の対地漏洩電流に与える影響は比較的小さいといえる。したがって、変圧器巻線内での静電気帶電特性あるいはそれによる油中放電の発生条件などを考察するうえでは、冷却器の影響をそれほど問題にする必要はないと考えられる。

4.4 AC 励磁の影響

前章で明らかにしたごとく、油隙に AC 電界がかかっ

ていると油流による静電荷の発生量が増大する。したがって、実際の変圧器でも巻線を AC 励磁すると巻線内の発生電荷量が増大し、巻線の対地漏洩電流も変化するはずである。

図 12 は 525 kV 1,200 MVA 変圧器で、巻線を励磁した場合と励磁しなかった場合の高圧巻線の対地漏洩電流を測定した結果である。対地漏洩電流のうち AC 電流成分はフィルタによりカットされている。

AC 励磁されると巻線の対地漏洩電流は負極性のほうに移っていくこと、しかも油温が高いほど AC 励磁のない場合の電流値からの変化が大きいことがわかる。すなわち、AC 励磁により巻線での発生電荷量が増大し、油温が高いほど発生電荷量の増え方も大きくなる。このことは巻線上部での油中正電荷量の増大を引き起す。

一方、巻線の下部で静電荷の発生が多い絶縁物油道入口部では、接地された金属物に近いため巻線内の AC 電界よりずっと低い電界しかからず、AC 励磁しても静電荷の発生状態はほとんど変化しないと考えられる。

4.5 内鉄型変圧器内の電荷分布

図 13 は以上の実験結果をまとめて変圧器内の電荷分布を推定したモデル図である。冷却器でまず正電荷が油中に分離され、その電荷は送油ポンプ、配管、鉄心締金具に緩和し、巻線にも一部緩和する。巻線下部の絶縁物油道内でも電荷分離が起き、油中に発生した正電荷は油とともに巻線内に入り、絶縁物表面に負電荷が残り、蓄積する。巻線内では電荷分離により絶縁紙表面に負電荷が発生し、巻線に入ってくる油中正電荷の緩和がそれに重畠される。巻線上部の絶縁物空間でも巻線から出てくる油中正電荷の緩和と、そこでの電荷分離による負電荷の発生とが重畠される。流速はかなり遅いため前者の影響のほうが大きいと考えられる。巻線上部から出た油中

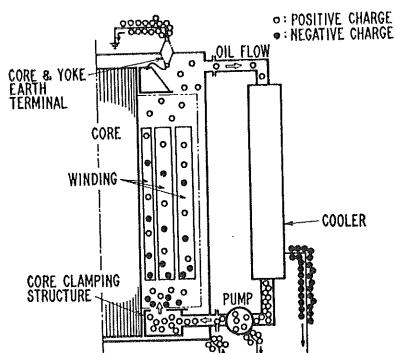


図 13 変圧器内電荷分布の概念図

Fig. 13 Brief outline of charge distribution in transformer.

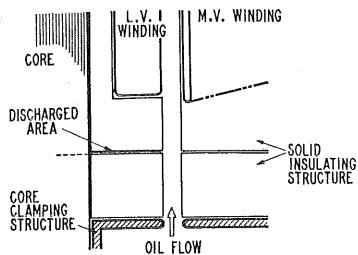


図 14 500 kV 1,000/3 MVA 変圧器での部分放電の発生位置 (16°C, 定格送油量の4倍のとき)

Fig. 14 Location of partial discharges in 500 kV 1,000/3 MVA transformer (at 16°C, 4 times the rated oil flow rate).

正電荷は、タンク、鉄心および鉄心締金具に緩和し、ほとんど帯電していない油が冷却器に戻り、循環を繰り返す。

5. 静電気帶電による変圧器内での油中放電発生条件

前章では実変圧器で送油量を定格送油量の2.3倍まで上げて実験したが、油中部分放電の発生はなかった。そこで静電気帶電量を増大させるために送油量を定格送油量の4倍までふやして試験し、油中部分放電の発生条件とその発生位置について調べた。その際、巻線内および巻線下部絶縁での電荷発生量、あるいは帯電量と油中部分放電との関係をクローズアップして把握できるようにするために、図2の試験回路で冷却器を取りはずし、太い径の直配管に置きかえて試験した。

5.1 油中部分放電の発生とその位置

試験に用いた実変圧器で、送油量を定格送油量の4倍にしたときに油中部分放電が初めて検出された。部分放電の大きさは $10^4 \sim 10^6$ pC と非常に大きく、いったん部分放電が発生しあらわると放電は頻繁に発生するようになり、送油量を少し下げても部分放電は発生していた。

図14は静電気帶電による部分放電の発生位置を示したものである。放電は巻線の下部絶縁で、巻線の油道に面して絶縁物層間に存在する油隙での沿面放電であった。この部分放電が起きた部位にかかるAC電界強度は低い。したがって、このタイプの変圧器では、油中部分放電の発生条件はAC励磁してもほとんど変化しないと考えられる。

他の部位では定格送油量の4倍まで試験しても部分放電の発生はなかった。したがって、内鉄型変圧器ではまず巻線下部での油中部分放電の発生条件を把握することが重要である。この巻線下部での油中部分放電は、油道に接した絶縁物の表面に、油流により電荷分離された負電荷が蓄積し、油隙に高い直流電界がかかったため

に起きた放電である。

5.2 巻線下部での油中部分放電の発生条件の解析

油中放電は油にかかる電界強度が油の絶縁破壊強度を超したときに起こる現象である。そこで油の流動により生ずる静電気帶電によって巻線下部にどのような直流電界が発生するのかを、次に述べる電界解析手法⁴⁾により調べてみた。なお、以下で求める電位分布は静電気帶電が定常状態に達し、それ以上電位上昇しないと考えられる場合の分布である。

いま任意の絶縁媒質中を考えると、定常状態においては次の式が成り立っている。

$$\text{div } i = 0 \quad (1)$$

ここで i は媒質中のある点での電流密度 (A/m^2) である。油流により固体絶縁物と油との界面で電荷分離が起きているので、その界面を含む領域では次式が成り立つ。

$$\int_{ds} \kappa E \cdot ds - i_s = 0 \quad (2)$$

ここで κ は媒質の導電率 (S/m)、 E は電界強度 (V/m)、 ds はその領域での面積要素である。 i_s はその領域内における界面での発生電流 (A) である。油と固体絶縁物との界面を含まない領域では電荷分離が起きていないので次式が成り立つ。

$$\int_{ds} \kappa E \cdot ds = 0 \quad (3)$$

静電気帶電による電位分布は、(2), (3) 式を満足し、かつ境界条件を満足するような分布になる。油と固体絶縁物との界面での発生電流は基礎的な要素モデルでの実験結果から求められる⁴⁾。

図15は定格送油量の4倍で油を流したとき、油中部

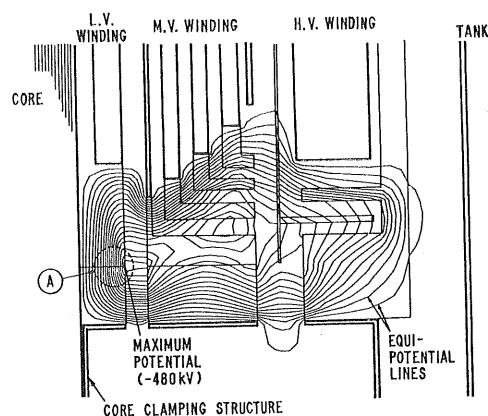


図 15 500 kV 1,000/3 MVA 変圧器での電位分布の計算例 (30°C, 定格送油量の4倍のとき)

Fig. 15 A calculated result of potential distribution caused by static electrification in 500 kV 1,000/3 MVA transformer (at 30°C, 4 times the rated oil flow rate).

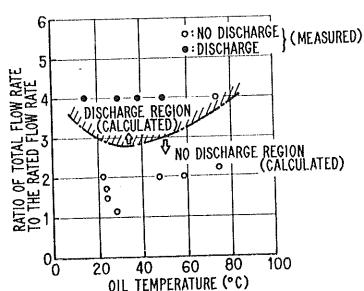


図 16 500 kV 1,000/3 MVA 変圧器での部分放電発生条件の実測結果と計算値の比較

Fig. 16 Comparison between the calculation and measurement of the conditions of the occurrence of partial discharges in 500 kV 1,000/3 MVA transformer.

分放電が発生した変圧器での巻線下部における電位分布の計算結果の一例である。等電位線は最大電位の 5% 間隔で描かれている。絶縁物表面に負電荷が蓄積するとして計算しているので最大電位は負極性である。その値は定格送油量時に $-20 \sim -30$ kV、定格送油量の 4 倍時に 30°C で -480 kV と計算されている。このような電位分布は、油温や送油量に応じて大幅に変化する。

図 15 の電位分布計算結果から実際に部分放電が発生した部位 A での電界強度を求める 16 kV/mm となる。この電界強度の値は油が絶縁破壊を起こしうる電界強度である⁵⁾。したがって、理論的にも静電気帶電により変圧器内で油中部分放電が起こりうることが確認された。

送油量と油温とを種々変えて 500 kV 1,000/3MVA 変圧器での巻線下部の電位分布を計算し、部分放電が発生する条件を求めた結果が図 16 に示されている。油の直流絶縁破壊強度は約 10 kV/mm 程度であるので⁵⁾、この値を超えたときに油中部分放電が発生すると考えている。実際に変圧器での油中部分放電の発生条件を計算により求める際には、巻線下部だけでなく変圧器内各部での電位分布を計算し、各部での放電発生条件を求めたあと、そのうちの最低レベルの放電発生条件を実際の変圧器での油中部分放電発生条件としている。

500 kV 1,000/3 MVA 変圧器で送油量と油温を変化させたとき、油中部分放電の発生の有無を実測した結果が図 16 に示されている。実測結果と計算結果とを比較してみると、全体的に計算により求められた部分放電発生限界曲線は実測結果より少し低めに見積もられていく傾向であるが、実測結果と計算結果とは比較的良く一致している。すなわち、電位分布を計算することにより油中部分放電の発生限界を推測することができる。

これらの油中部分放電発生の実測結果と放電発生条件

の計算結果から、油中部分放電が発生するに要する送油量の値が油温によって異なり、ある油温で最小値を示す特性となることがわかる。

実変圧器を用いて静電気帶電試験を実施した結果、静電気帶電により変圧器内で油中部分放電が起こりうることが確認された。今回の試験に用いた変圧器では、油中部分放電が発生するために送油量を定格送油量の 4 倍にする必要があったが、このような油中部分放電の発生条件は変圧器の構造によって変化するものであり、いちがいに規定されうるものではない。

6. 結 言

基礎的な要素モデルと、実変圧器を用いて油が流動したときの内鉄型変圧器の静電気帶電現象を調べた。その結果次のようなことが明らかとなった。

- (1) 変圧器では冷却器で正電荷が油中に発生しており、その油中正電荷が変圧器内の電荷分布に影響を与えている。
- (2) 冷却器で発生した油中正電荷は、送油ポンプ、配管内で一部緩和し、その大多数は鉄心締金具に緩和する。
- (3) 巷線下部絶縁の油道内においても電荷分離が起きており、油中に正電荷が発生し、絶縁物表面に負電荷が残り蓄積する。鉄心の対地漏洩電流は冷却器からの油中正電荷の緩和と、この巷線下部絶縁で絶縁物表面に蓄積した負電荷の漏洩と巷線で発生する油中正電荷の緩和とが重畠したものである。
- (4) 巷線の対地漏洩電流は、巷線での電荷分離により絶縁紙表面に発生する負電荷の漏洩と、巷線に入ってくる油中正電荷の緩和電流とが重畠されたものである。
- (5) 変圧器においては、ある油流条件下で油の流動による静電気帶電により、油中部分放電が発生することがある。その場合には、巷線下部絶縁で油中部分放電が発生しやすい。
- (6) 巷線下部絶縁で発生する油中部分放電は、絶縁物油道表面に負電荷が蓄積することにより生ずるものであり、静電気帶電により生ずる電位分布を計算することにより、その発生条件を定量的に把握することができる。

以上の検討により、油を流す条件によっては、変圧器内で静電気帶電による油中部分放電が起こりうることがわかった。しかし、その油中部分放電の発生条件は、変圧器の油道、巷線、絶縁物構成などの構造や油量分配、絶縁油の特性などが相互にからみ合って決まるものである。したがって、これらの点を十分考慮することにより、

信頼性の高い変圧器の絶縁設計とができる。

最後に、本研究を進めるに当たり、有益なご指導とご助言をいただいた東京電力株式会社高木顧問および関係者の方々、東京大学工学部電気工学科増田教授、東京農工大学工学部電気工学科村崎教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Elec-*

- trostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Publishing Co. (1958).
- 2) W.M. Bustin, T.L. Culbertson and C.E. Schleckser : Proc. Am. Pet. Inst., 37 (III) (1957), 24.
- 3) D.T. Rogers, J.P. McDermott and J.C. Munday : *ibid.*, 37 (III) (1957), 44.
- 4) M. Higaki, H. Miyao, K. Endou and H. Ohtani : *IEEE PES 1979 Winter Meeting*, F79 230-4 (1979).
- 5) B.E. Gänger : IEEE Trans. Power Appar. Syst., 4 (1968), 1840.