

経年変圧器における流動帯電現象

上級会員 小林 隆幸* 正 員 山田 慎**
正 員 白坂 行康*** 正 員 細川 登****

Static Electrification in Aged Transformers

Takayuki Kobayashi*, Senior Member, Shin Yamada**, Member, Yukiyasu Shirasaka***, Member,
Noboru Hosokawa****, Member

Increase of static electrification was experienced in aged transformers of both shell-form and core-form. The investigation disclosed increase of accumulated charge by aging of insulator (pressboard). For assessment of static electrification (SE) in aged transformers, accumulated charge evaluation by potential measurement becomes necessary instead of conventional electro-static charging tendency (ECT) of oil. As for the increase of SE, recent research disclosed that oxidation of sulfuric contents in oil, such as sulfide and sulfoxide, caused increase of high ECT of oil. Sulfoxide in pressboard also showed good correlation with accumulated charge on the pressboard. Sulfoxide in oil and pressboard can be a good indicator for the increase of SE. Further accumulation of the field data is important for development of diagnostic technology for SE in transformers.

キーワード：変圧器，流動帯電，経年，劣化，帯電度

Keywords: transformer, static electrification, aging, deterioration, ECT

1. まえがき

高電圧・大容量変圧器の絶縁は絶縁油と絶縁紙により構成されている。絶縁油は冷却媒体の役割も果たしており、絶縁油を循環させて冷却を行っている。絶縁油が循環する際に、絶縁紙との界面で帯電が生じ、絶縁紙が負に帯電し、絶縁油中に正電荷が供給される。この現象を変圧器の流動帯電現象という。内鉄形変圧器および外鉄形変圧器の帯電電荷分布を図1、図2に示す^①。変圧器内部の流動帯電が大きくなると帯電が過剰に進み、放電発生に至る危険がある。

1970年代の500kV変圧器導入初期に流動帯電による不

具合を経験してから、この流動帯電についての研究が行われてきた。これにより、現在の流動帯電抑制方策は確立されてきた。

流路構造では、流れの分散化、絶縁物端面の滑らかな加工、渦のできにくい流路構造、コイル内への直接的な油の吹き上げ防止などの対策が採られている。流動帯電に大きく影響する流速についても変圧器製造各社で制限が設けられ、巻線漏れ電流による流動帯電管理値も設定された。

また、絶縁油に対してBTA（ベンゾトリアゾル）を添加することが流動帯電抑制に有効と認められ、BTA添加油がJISに規定されて以降、国内の高電圧変圧器にはBTA添加油が適用されている。

90年代になって、絶縁油の劣化により流動帯電が増大する不具合が発生し、この時の検討により、ある種の劣化しやすい絶縁油では経年により帯電度が増大することが確認された。絶縁油の流動帯電に対する管理手段としてミニ静電テストによる絶縁油の帯電度測定が電気協同研究で標準化され、帯電度についての管理基準が制定された^②。

更に、近年、経年変圧器で絶縁油の帯電度が管理基準内にあるにもかかわらず、静電気放電が発生する不具合が経験されて、絶縁油の帯電度による管理だけでは不十分で、新たな流動帯電診断手法が必要になってきた。

以下に経年による流動帯電の増大現象とそれに対する診断手法の検討状況について述べる。

* 東京電力（株）

〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3

Tokyo Electric Power Company

1-1-3, Uchisaiwai-chou, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8560

**（株）東芝

〒210-0862 川崎市川崎区浮島町2-1

Toshiba Corporation

2-1, Ukishima-chou, Kawasaki-ku, Kawasaki 210-0862

***（株）日本AEパワーシステムズ

〒316-8501 日立市国分町1-1-1

Japan AE Power Systems Corporation

1-1-1, Kokubu-chou, Hitachi 316-8501

****三菱電機（株）

〒678-0256 赤穂市天和651

Mitsubishi Electric Corporation

651, Tenwa, Ako 678-0256

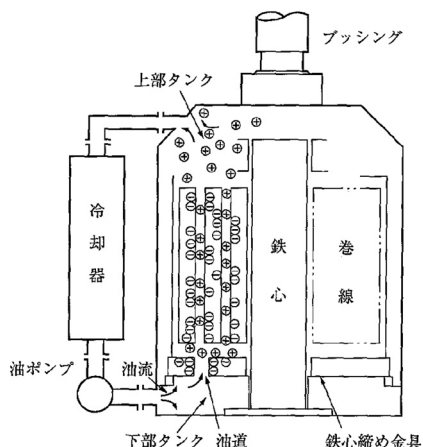


図 1 内鉄形変圧器の電荷分布

Fig. 1. Charge distribution in a core-form transformer.

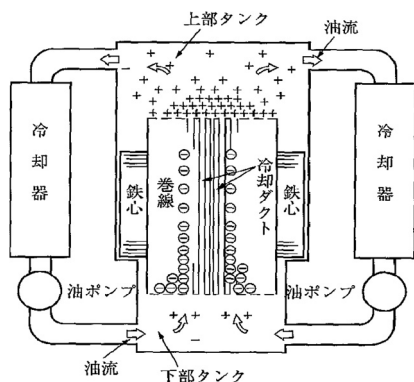


図 2 外鉄形変圧器の電荷分布

Fig. 2. Charge distribution in a shell-form transformer.

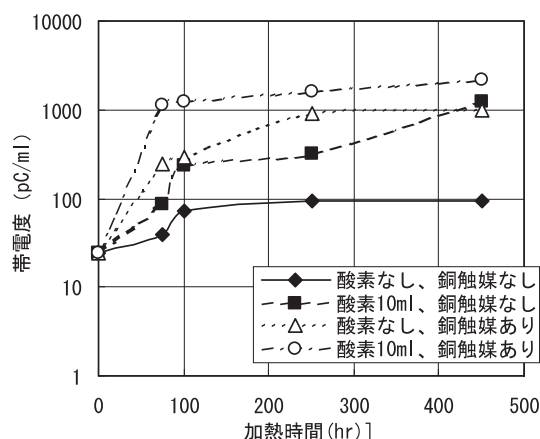


図 3 ドデシルスルフィド添加アルキルベンゼンの帯電度の経時変化

Fig. 3. Aging characteristics of electrostatic charging tendency of alkylbenzene with 1000 ppm dodecylsulfide.

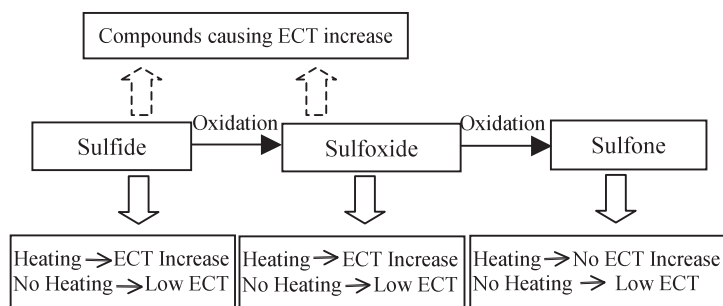


図 4 絶縁油の高帯電度化メカニズム

Fig. 4. Mechanism of increase of ECT.

2. 絶縁油の経年的劣化による流動帯電増大

〈2・1〉 絶縁油の帯電度 流動帯電における絶縁油の電荷発生の起きやすさを示す指標に帯電度がある。帯電度は、一般的には、絶縁紙の表面に沿って一定の流量で油を流したときに運び去られる電荷量の大きさを測定して求める。単位時間に生成される電荷量 (pC/s) を油の流量 (mL/s) で割った値を帯電度 (pC/mL) という。

初期の流動帯電研究において各種の帯電度測定装置が考案されたが標準化されたものはなかった。電気協同研究において各測定方式を比較した結果、ミニ静電スタ法が特に利便性に優れており、再現性もあること、また、国際的に広く採用されていることから国内の帯電度測定の標準方法として採用され、標準的な測定手順も規定された。当時のフィールド調査結果をもとに、帯電度による流動帯電管理基準 (据付時 200 pC/mL, 現地保守 500 pC/mL) も制定された⁽¹⁾。

〈2・2〉 経年による絶縁油の高帯電度化 絶縁油の加速劣化試験によって、油種により経年による帯電度の増大

が少ない油と経年により帯電度が大きく増大する油が存在することが知られてきた。

油中に含まれる微量化合物の影響についての最近の研究で、経年的に絶縁油の流動帯電を増大させる物質があることが明らかになってきている。硫黄化合物であるスルフィドおよびその酸化により生成するスルホキシドは、絶縁油中に添加するだけでは油の帯電度は増大しないが、加熱すると絶縁油を高帯電度化させることがわかってきた⁽²⁾。図 3 に一例として、絶縁油 (アルキルベンゼン) にスルフィドを添加したときの加速劣化試験の結果を示す⁽³⁾。また、スルホキシドを更に酸化させて得られるスルホン類では加熱による高帯電度化が認められなかった⁽⁴⁾。これらの結果から、経年による絶縁油の帯電度増大のメカニズムとして図 4 に示すプロセスが推定されている。現在まだ成分の特定はできていないが、スルフィドの単純な酸化物ではなくスルフィドおよびスルホキシドの酸化の過程で生成するなんらかの成分が絶縁油を高帯電度化させると考えられている。変圧器油中のスルフィド量およびスルホキシド量は変圧器油の経年的流動帯電増大の指標として有望と考えられる。

3. 経年変圧器の流動帯電増大現象

〈3・1〉 経年変圧器の流動帯電増大 近年、500kV 経年変圧器で放電発生指標となるアセチレンが微量検出され、内部点検による調査の結果、流動帯電による静電気放電の痕跡が確認された。

一例は、外鉄形変圧器で、アセチレン検出後の巻線漏れ電流測定で表 1 に示すように漏れ電流が経時的に増大しており、流動帯電の増大が認められた。この期間中の絶縁油の帯電度は図 5 にみられるように、帯電度は現地管理基準の 500pC/mL より十分に低く、また、増大傾向がなかったため、経年変圧器での流動帯電増大現象は絶縁油の劣化ではなく、絶縁物の劣化に起因するものと推定された⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

もう一例は、内鉄形変圧器で、これもアセチレン検出後の巻線漏れ電流は表 2 に示すように増大傾向を示したが、絶縁油の帯電度は 341pC/mL と現地管理基準内にあり、外鉄形変圧器と同様、絶縁物の劣化に起因するものと推定されている⁽⁶⁾。

〈3・2〉 劣化絶縁物の流動帯電増大 前述のように、絶縁油の帯電度では経年変圧器の流動帯電特性を評価するには十分でないことがわかったため、絶縁部分での放電発生の危険性をより直接的に評価できる絶縁物（プレスボード、PB）上の蓄積電荷量による評価が重要と考えられた。

PB 上の蓄積電荷量を評価するため、変圧器内の油流を模擬した油ダクトを PB で構成し、ダクト内 PB 上の帯電電

位の測定を行った。この系を用いて PB の経年が蓄積電荷量に及ぼす影響が評価された。

帯電電位測定に用いた試験系（帯電モデル）の構成図を図 6 に、試料の断面図を図 7 に示す。油ダクト中央 PB 内部の電極から測定線をテフロンで絶縁して取り出した。帯電電位は、外に引き出した測定線の電位を表面電位計により非接触で測定した。

この系の帯電電位は PB 上の帯電電荷量に対応する。油ダクト部の PB 表面に、単位面積あたり σ (C/m²) の電荷が均一に帯電していると想定すると、PB 中央電極の帯電電位 V (V) は次式で与えられる。

$$V = (2\sigma/\epsilon_{PB}) * t + (\sigma/\epsilon_o) * d \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t (m) : PB 厚さ、 d (m) : 油ダクトの高さ
 ϵ_{PB} (F/m) : PB 誘電率、 ϵ_o (F/m) : 油の誘電率

油温 30°C の条件で外鉄形当該経年変圧器から採取した経年油および経年 PB と新油、新品 PB との帯電電位の流速特性を比較した結果を図 8 に示す。新油 1 と 2 は、銘柄の異なる絶縁油を使用した。

図 8 の結果では、絶縁油の経年の他に PB の経年による帯電電位の増大も顕著に現れている。特に、経年 PB の帯電電位は新品 PB の 3 倍以上であり、帯電度測定では顕著に現れなかった経年 PB による流動帯電増大現象を確認することができた。経年変圧器の流動帯電を評価するには、従来の帯電度測定では不十分であり、絶縁物の劣化影響も評価ができる帯電電位測定が有効であることが確認された。

表 1 巻線漏れ電流の推移（外鉄形）

Table 1. Trend of winding leakage current (shell-form) (estimated value for 25 degree C, 7 pumps).

	96/5	98/10	03/5
A Phase	-0.31μA	-2.05μA	-3.14μA
B Phase	-0.41μA	-2.92μA	-8.65μA
C Phase	-0.24μA	-1.13μA	-6.85μA

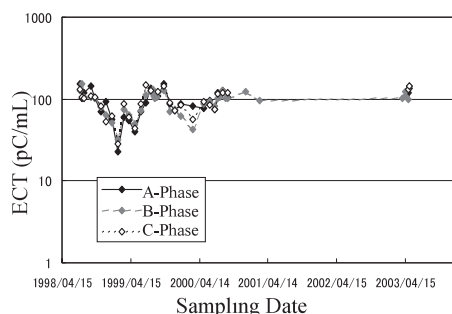


図 5 帯電度の推移（ミニ静電テスタ）

Fig. 5. Trend of ECT (mini-static tester).

表 2 巻線漏れ電流の推移（内鉄形）

Table 2. Trend of winding leakage current (core-form).

	'02/3	'05/2
Current	-0.004μA	-0.05μA
	9 pumps	9 pumps
	(4°C)	(17°C)

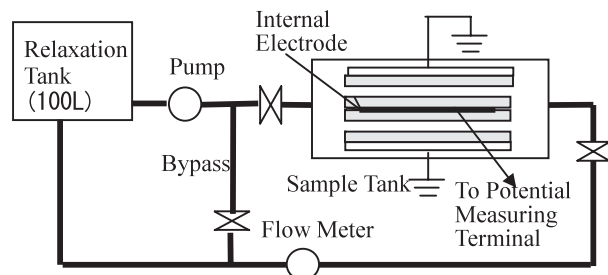


図 6 帯電電位測定試験系（帯電モデル）の構成図
 Fig. 6. Structure of test system (electrification model) for electrification potential measurement.

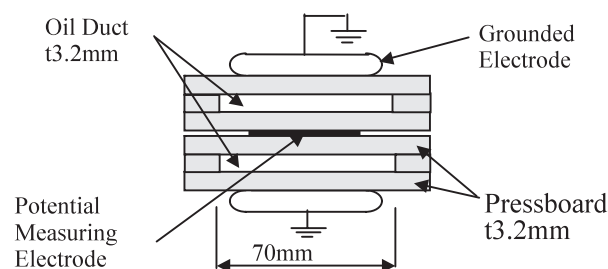


図 7 帯電電位測定試料の断面図

Fig. 7. Cross section of test sample for electrification potential measurement.

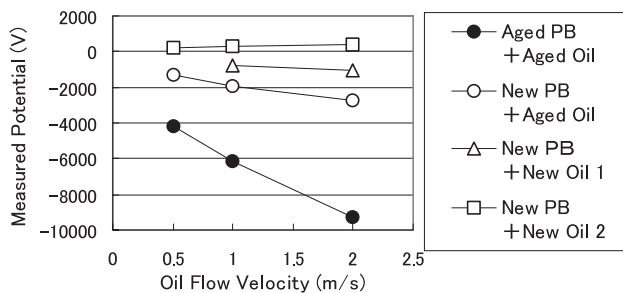


図 8 プレスボード上帯電電位の流速依存性に及ぼす経年の影響

Fig. 8. Effect of aging on flow velocity dependence of electrification potential.

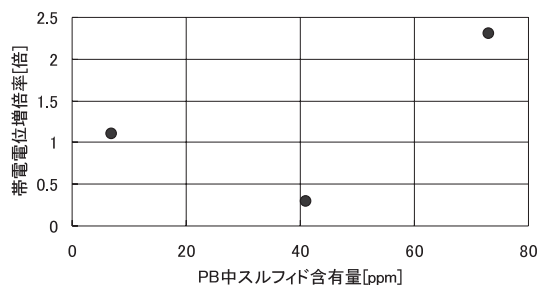


図 9 PB 中スルフィドと帯電電位増加の関係

Fig. 9. Relationship between increase rate of electrification potential and sulfide compounds in pressboard.

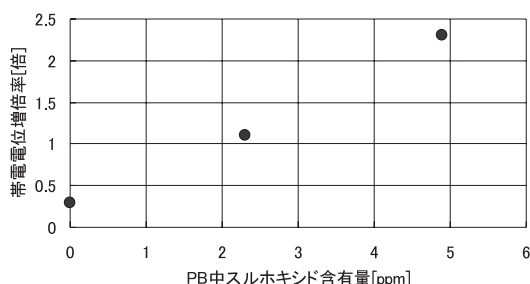


図 10 PB 中スルホキシドと帯電電位増加の関係

Fig. 10. Relationship between increase rate of electrification potential and sulfoxide compounds in pressboard.

撤去した経年変圧器から採取した PB と経年油を用いて、小形の帯電電位測定装置により測定した PB 上蓄積電荷密度を新品 PB による測定値と比較調査した結果、経年 PB の中には蓄積電荷密度を増大させるものがあることがわかった。経年 PB の帯電増大に対する PB 中への吸着成分の影響を調べるため、溶剤処理により吸着成分を除去した後の蓄積電荷密度の変化が測定された。PB 中への吸着成分としては絶縁油の帯電度を経年的に増大させるスルフィドおよびスルホキシドに注目し、溶剤処理により抽出された溶液中の量を PB 中の吸着量として評価した。溶剤処理前の帯電電位の溶剤処理後の帯電電位に対する増倍率（帯電電位増倍率）と PB 中スルフィド量およびスルホキシド量との関係を図 9、図 10 に示す。帯電電位増倍率は PB スルフィ

ド量とは良好な相関が見られないが、PB スルホキシド量と相関が見られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

スルホキシドは、油中に含まれているスルフィドの酸化により生成すると考えられることから、油中および PB 中のスルホキシド量が、流動帯電の経年による高帯電度化を示す指標になる可能性があると考えられる

4. まとめ

近年の経年変圧器の流動帯電増大現象について検討した結果、従来から知られていた絶縁油の高帯電度化に加えて絶縁物の帯電も増大することがわかり、経年変圧器の流動帯電診断には絶縁油の帯電度だけでは不十分で、帯電電位測定による帯電電荷量の把握が必要となってきた。

絶縁油の高帯電度化を生じる要因を調査してきた結果、スルフィド、スルホキシドなどの油中微量硫黄化合物の酸化により絶縁油の帯電度が増大することがわかってきた。また、絶縁物（PB）中のスルホキシド量が絶縁物の帯電増大と相関があることがわかり、油中、絶縁物中のスルホキシド量が流動帯電増大の指標となる可能性が示された。

今後、帯電電荷量や油中微量成分などのフィールドデータを蓄積して、診断手法を構築していく必要がある。

（平成 19 年 11 月 27 日受付）

文 献

- (1) 「油入変圧器の保守管理（その 1）」、電気協同研究, Vol.54, No.5 (1999)
- (2) 岡部成光・向富政典・佐藤剛史・土江基夫・網本 剛：「各種成分が絶縁油の帯電度に及ぼす影響」、第 24 回絶縁油分科会研究発表会要旨集, p.40 (2004)
- (3) 岡部成光・岡田富雄・土江基夫・小林淳二：「各種硫黄化合物が絶縁油の帯電度に及ぼす影響」、平成 13 年電気学会全国大会, No.5-131, pp.1935-1936 (2001)
- (4) 岡部成光・岡田富雄・土江基夫・網本 剛：「微量化合物が絶縁油の帯電度に及ぼす影響」、平成 13 年電気学会 B 部門大会, No.320 (2001)
- (5) T. Kobayashi, K. Yajima, S. Yamada, T. Amimoto, and N. Hosokawa: "Increase of Static Electrification in an Aged Oil-Immersed Transformer", *IEEE Trans. PE*, Vol.127, No.9, pp.1025-1032 (2007-9) (in Japanese)
小林隆幸・矢島浩二・山田 慎・網本 剛・細川 登：「油入経年変圧器における流動帯電増大現象」、電学論 B, **127**, 9, pp.1025-1032 (2007-9)
- (6) S. Tsukao, A. Eto, T. Kobayashi, Y. Shirasaka, S. Yamada, and N. Hosokawa: "Increase of Static Electrification in Aged Transformers", *IEEE PES 07GM1217* (2007)
- (7) 衛藤 淳・塚尾茂之・小林隆幸：「経年実フィールド変圧器の流動帯電測定評価」、平成 19 年電気学会全国大会, Vol.5, pp.331-332 (2007)
- (8) 小林隆幸・塚尾茂之・衛藤 淳・山田 慎・細川 登・網本 剛：「油入変圧器の流動帯電評価」、平成 19 年電気学会 B 部門大会, No.147 (2007)

小 林 隆 幸 （上級会員） 1961 年 9 月 12 日生。1984 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月、東京電力（株）入社。以来、変電所の設計および技術開発に従事。工学博士。現在、工務部変電技術担当。



山 田 慎



（正員） 1965 年 12 月 30 日生。1990 年 3 月早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月，（株）東芝入社。高電圧絶縁技術に関する研究に従事。1997 年より，主として油入変圧器，ガス絶縁変圧器の設計業務に従事。

細 川 登



（正員） 1951 年 1 月 26 日生。1975 年 3 月京都大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月，三菱電機（株）入社。油中絶縁の研究に従事した後，1979 年から変圧器の開発業務に従事。

白 坂 行 康



（正員） 1956 年 12 月 2 日生。1982 年 3 月武蔵工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月，（株）日立製作所入所。以来，国分工場にて電力用変圧器の開発・設計に従事。2002 年 10 月会社承継法により（株）日本 AE パワーステムズに転籍。電力用変圧器標準化委員会委員長（兼 IEC/TC14 国内委員会）および CIGRE SCA2(変圧器) 国内分科会委員長。