変圧器油の流動帯電特性に及ぼす直流電界と直流/交流重畳電界の影響

非会員 田中 誠 (関西電力) 非会員 中越吉彦 (四国電力) 正員 畑野雅幸 (電源開発)
 正員 宮尾 博 (日立製作所) 正員 小島啓明 (日立製作所) 正員 古川貞夫 (日立製作所)
 正員 小幡俊光 (日立製作所) 正員 門脇 慎 (日立製作所)

Influence of dc Field and dc/ac Composite Field on the Flow Electrification Characteristics of Transformer Oil

Makoto Tanaka, Non-Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.)
 Yoshihiko Nakakoshi, Non-Member (Shikoku Electric Power Co., Inc.)
 Masayuki Hatano, Member (Electric Power Development Co., Inc.)
 Hiroshi Miyao, Member, Hiroaki Kojima, Member, Sadao Furukawa, Member (Hitachi, Ltd.)
 Toshimitsu Obata, Member, Makoto Kadowaki, Member (Hitachi, Ltd.)

Flow electrification characteristics of transformer oil were investigated by applying dc field and dc/ac composite field with both bare and covered electrode systems. In the case of bare electrode system, it was found that flow electrification characteristics were almost the same between positive and negative dc voltage application and negative charges were generated for both dc voltage and dc/ac composite voltage applications at high dc field region. In the case of covered electrode system, it was found that apparent flow electrification characteristics were different between positive and negative dc voltage applications. For the former, negative charges were generated at high dc field strength for both dc voltage and dc/ac composite voltage applications and for the latter, positive charges always generated for both dc voltage and dc/ac composite voltage applications. However, negative charge generation for positive voltage application was considered to be the influence of negative charge generation at bare part of covered electrode end and it was found that fundamental charge generation characteristics of covered electrode were an increase of positive charge generation by dc voltage application and positive charge generation was accelerated by superimposed ac field.

キーワード：流動帯電、直流、交流、重畳、変圧器油

1. まえがき

変圧器内での流動帯電現象のうち無課電の流動帯電は、各所で研究された結果、その現象がかなり明らかになり、その対策もほぼ確立されてきている。¹⁾ また、交流課電時の流動帯電についても、最近被覆電極系で基礎的に調べられた結果が報告されている。²⁾ 一方、直流変換用変圧器では交流電圧の他に直流電圧が重畳して課電されることになるが、静電荷発生に及ぼす直流課電^{3), 4), 7)} および直流/交流重畳電圧課電⁸⁾ の影響については低直流電界で調べられた例が一部あるだけである。

そこで変圧器油の流動帯電特性に及ぼす直流および直流/交流重畳電圧の影響を裸電極系と被覆電極系の油ダクトを用いて基礎的に調べ興味ある結果が得られたので以下報告する。

2. 実験方法

〈2.1〉 油流回路および電極構造 図1は交流あるいは直流電圧が印加されている間隙中を絶縁油が流動したときの絶縁油の帯電特性を調べるために用いた実験回路であ

る。図1において、リザーブタンク (300 L) の絶縁油はギヤポンプによりいったん No.1 タンクに送り込まれたのち、電圧が印加されている供試電極間に流し込まれる。供試電極は同軸円筒電極であり、電極間に形成された細い間隙中を絶縁油が流れるようになっており、ここで流動帯電が生じるようにした。供試電極はその両端にとりつけた絶

図1 実験回路
Fig.1. Test circuit

図2 供試電極系
Fig. 2. Electrode system.

縁フランジにより配管類や大地から絶縁されている。この供試電極間を通り抜けた絶縁油は下流側の No.2 タンクに入り、供試電極間で帯電した絶縁油中の帯電電荷がここで緩和するようにした。No.2 タンクは絶縁フランジにより大地から絶縁されており、タンクから大地に向けて流れる電流を微小電流計を用いて測定することによりタンクに入ってくる油中電荷の量を求めることができる。実験に用いた絶縁油はリザーブタンク内のヒータにより適当な温度に調整され、また油流量はバイパスバルブにより調整された。

供試電極の内部構造を図2に示す。外径42mmの内側電極と内径47mmの外側円筒電極とから成り、被覆電極系の場合には0.25tのプレスの被覆が内外の電極表面に設けられ油隙間隙は2.0mmの構造になっている。また裸電極系では被覆を取り除いた油隙間隙2.5mmの構造になっている。

高電圧は外側電極に印加し、内側電極を接地側低圧電極としている。電極はいずれも黄銅製であり、外側電極の両端はアクリル製の絶縁フランジにより大地から絶縁されている。

実験に用いた絶縁油は、市販の変圧器油である。油中水分は10ppm以下である。また本報告中の電界の強さあるいは油流速とは油隙間隙2mm(被覆電極系)および2.5mm(裸電極系)中の電界の強さ、油流速のことである。

2.2> 電圧印加法 直流電圧の印加時には外側電極に正極性あるいは負極性の高電圧を印加した。直流電圧は0.5kVの電圧から0.5~5kVのステップで5分間隔で階段上昇させた。また直流/交流電圧重畳時には一定の直流電圧を印加5分後に交流電圧を1~4kVステップ5分間隔で昇圧し、No.2タンクに流れ込む流動電流を計測した。なお絶縁油を流さない状態でのNo.2タンクから対地への漏洩電流は交流電圧印加15kVrmsでもまた直流電圧印加30kVでも $1 \times 10^{-4} \mu A$ 以下であり、油流速時の流動電流に比べて十分小さくなっている。交流課電用にはmax60kVrmsの交流電源を用い、直流と重畳させる場合には直流電源と交流電源の間に $1.5 \mu F$ の直流遮断用コンデンサを入れるとともに交流が直流電源に課電されるのを防ぐために直流電源側に20M Ω の抵抗を挿入している。

3. 実験結果とその考察

3.1> 裸電極系の基本特性 図3に20°Cでの流動電

流と直流電界の関係の正負極性依存性を示す。また図4、図5に正極性の場合の30°C、50°Cの流動電流と直流電界との関係を示す。以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 正極性、負極性課電の両者とも低直流電界(1kV/mm以下)では正極性の流動電流を示し、高直流電界では負極性の流動電流となり2kV/mm以上の電界で急増するが極大値を示した後は減少する傾向を有する。また正極性では負極性より低電界から負極性に反転する。

(2) 負の流動電流は流速とともに増加する。

(3) 流速の増加により負の極大値の電流は大きく増加する。また負の極大値の電界は流速の増加により高電界側にシフトする。

(4) 20°C、30°C、50°Cともに流動電流が正極性から負極性に反転する傾向はほぼ同様である。

以上の特性は低電界では正と負のイオンの移動度の差として説明でき、高電界では陰極からの電子または負電荷の注入によるとして定性的に説明できる。また正と負の課電電圧の違いは内側電極と外側電極の表面電界が約10%内側が高く、正極性課電時に内側電極が陰極になり同一課電電圧では電界が高くなることで説明できる。しかし、実際に数kV/mmの電界で μA オーダーの電子注入が可能かどうか現在のところ十分な説明はできない。

次に正極性直流/交流重畳時の流動帯電特性を直流電圧

図3 流動電流と直流電界の関係(裸電極)
(正負極性依存性, 20°C)

Fig. 3. Relationship between dc field strength and flow current.
(bare electrode) (positive and negative polarity, 20°C)

図4 流動電流と直流電界の関係 (裸電極)

Fig.4. Relationship between dc field strength and flow current. (bare electrode)

図5 流動電流と直流電界の関係 (裸電極)

Fig.5. Relationship between dc field strength and flow current. (bare electrode)

値をパラメータとして交流電界を変化させ測定した結果を示す。20°C, 30°C, 50°Cで測定した結果を図6～図8に示す。図の結果をまとめると以下になる。

(1) 直流電界が2kV/mm以下の低電界では交流電界の増加とともに正から負に流動電流が反転する傾向にあり、20°C～50°Cに昇温するにつれ反転する交流電界値が低下する傾向にある。

(2) 直流電界が2kV/mm以上では交流電界の影響は小さく

図6 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (裸電極)

Fig.6. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (bare electrode)

図7 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (裸電極)

Fig.7. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (bare electrode)

図8 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (裸電極)

Fig.8. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (bare electrode)

なる傾向があり、流動電流は交流電界値によらず直流電界値により決まるほぼ一定値を示す傾向にある。

以上より、直流/交流重畳時の交流電界の効果は電極界面での電子または負電荷の注入に対して影響していると考えられる。すなわち、直流電界が低い場合には負電荷の注入が少ないが、交流重畳により最大電界が大となり高直流電界の場合と同程度に注入が増加するため負の流動電流になると考えられる。また温度上昇にともない流動電流が負極性へ反転する交流電界が低電界に移動するがこれは交流課電重畳の場合には極性が短時間に切り替わるため、陰極側電極が交互にできるが、油に加わる電界が時間的に交互に切り替わるために陰極から発した電子、あるいは負イオンは低温では移動度が小さいため油流の速い位置まで移動できずにすぐに元の電極に戻ることであり、交流電界の効果は、小さくなることが考えられる。

＜3.2＞ 被覆電極系の基本特性 図9に10°C, 30°C及び50°Cにおける正極性直流電圧課電時の流動電流の電界特性を示す。直流電界は抵抗率の大きい油浸紙に集中するため油浸紙の絶縁破壊を避けるため印加電圧はDC30kVに抑えた(この時油隙間隙の電界は50°Cの場合で約3kV/mm)。ここで油隙間隙の電界値は各温度、印加電圧に対し油と油浸紙(プレスボード)の電界依存性を考慮した非直線性電

図9 流動電流と直流電界の関係 (温度依存性) (被覆電極)
Fig. 9. Relationship between dc field strength and flow current. (temperature dependence) (covered electrode)

界解析¹⁾を行い求めた値である。結果を以下にまとめる。

(1) 10°C, 30°C及び 50°Cで流動電流が直流電界の増加により正極性から負極性に反転する傾向は裸電極系の場合と同様である。

(2) 流動電流が正から負に反転する電界は10°Cから30°C, 50°Cと高温になるに従い高電界になる傾向にある。

次に負極性課電時の 30°Cにおける流動帯電特性を図 10 に示す。その結果, 負極性課電では正極性課電時と異なり流動電流は直流電界の大きさにほぼ比例して正極性に増加している。

以上より被覆電極系では裸電極系の場合と異なり, 正極性課電時と負極性課電時には直流電界に対する流動電流の依存性が異なることがわかった。すなわち, 正極性課電時には流動電流は正から負極性に流動電流の極性が電界とともに反転するが, 負極性では反転せず正極性のまま増加する。

次に図 11~図 13 に被覆電極系における 10°C, 30°Cおよび 50°Cでの正極性直流/交流重畳時の流動帯電特性を示す。その結果を以下にまとめる。

(1) 正極性直流電界が 1kV/mm 以下の低電界では 50°Cの場合, 交流電界の増加とともに正極性の流動電流は増加する。10°C, 30°Cでは正極性の流動電流は交流電界に対する依存

図10 流動電流と直流電界の関係 (被覆電極)
Fig. 10. Relationship between dc field strength and flow current. (covered electrode)

図 11 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (被覆電極)
Fig. 11. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (covered electrode)

図12 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (被覆電極)
Fig. 12. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (covered electrode)

図13 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (被覆電極)
Fig. 13. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (covered electrode)

性が小さい。

(2) 直流電界が 1kV/mm 以上の領域では負の流動電流となるが, 交流電界に対する依存性は小さい。

また図 14 に負極性直流/交流重畳時の 30°Cでの流動帯電特性を示し, 以下にその結果を述べる。

(1) 負極性直流電圧課電時には交流単独課電の場合と同様に交流電界の上昇とともに正極性流動電流は増加する傾向にある。

(2) 直流電界が 1kV/mm 以上でも正極性の流動電流を示し,

図14 直流/交流重畳時の流動帯電特性 (被覆電極)

Fig. 14. Flow electrification characteristics at dc/ac composite field. (covered electrode)

交流電界とともに増加する。

〈3.3〉 考察 このように正負の直流電圧の極性の違いにより被覆電極系で流動帯電特性が異なる原因を以下に考察する。裸電極系の正極性から負極性への流動電流の極性反転に対しては、低電界では油中のイオンの移動度が正イオン<負イオンによること、また高電界では電極からの負電荷の注入によりある程度説明可能と考えられた。³⁾ しかしながら、被覆電極系の場合には被覆があることにより電子の注入は困難と考えられる。そこで今回用いた被覆電極系での負電荷の注入の可能性を検討した。図15に同軸円筒被覆電極系の端部の直流電界計算結果を示す。同軸円筒電極内ではプレスボード被覆絶縁物の抵抗率が高いため絶縁被覆が油隙より多くの電圧を分担するため油隙の電界は低い、電極端部の○印をつけた裸の部分の電界は高い電界となっていることがわかった。そこで正極性印加時に負極性となる、この○印の電極端部の電界で図9の被覆電極系の流動電流と直流電界との関係を整理し直した結果を図16に示す。図9で電極間油隙の電界で整理していた時には、10℃から50℃で油温の上昇とともに正から負に反転する電界が高電界に移動する傾向がみられたが、端部の電界で整理すると10℃から50℃までほぼ同じ電界で極性反転しほぼ同一の曲線で整理できるようになった。この結果は図

図15 被覆電極系端部の直流電位分布

Fig. 15. dc field distribution at covered electrode end.

図16 流動電流と直流電界の関係 (温度依存性) (被覆電極, 端部裸電極部の電界で整理)

Fig. 16. Relationship between dc field strength and flow current. (temperature dependence) (replotted by the field strength of bare part of electrode end)

図17 流動電流と直流電界の関係 (温度依存性) (裸電極)

Fig. 17. Relationship between dc field strength and flow current. (temperature dependence) (bare electrode)

17に示す裸電極系での20℃~50℃の流動電流と直流電界との関係と同様である。すなわち被覆電極系における正極性印加時の正極性流動電流の高直流電界での負極性への反転現象は主として被覆電極系の内側電極端部の裸電極部からの負電荷の注入が大きく影響したと考えられることがわかった。一方、外側電極に負極性電圧を印加した場合には内側電極端部の裸電極部は相対的に正極性となるため負電荷の注入がなく本来の油隙部の正電荷発生特性が現れたと考えられる。

すなわち、被覆により、電極からの負電荷注入が抑制されるといえる。以上のことから、被覆電極系では基本的には直流課電時には正極性の静電荷が発生し、また直流/交流重畳課電時にも正極性の静電荷が発生し、交流重畳により電荷発生が増大すると考えられることがわかった。

4. まとめ

裸電極系と被覆電極系における直流および直流/交流重畳課電状態の変圧器油の流動帯電特性を調べ以下のことが明らかになった。

(1) 裸電極系では直流課電時の正負極性差は小さく、高電界時には負電荷が発生すること、また交流重畳は低直流電界

下では負電荷の発生を増大させる効果を有する。

(2) 被覆電極系では正負の直流電圧の極性により見かけの電荷発生特性が異なるが、基本的電荷発生特性は直流課電により正電荷の発生が増加すること、また交流重畳によりさらに正電荷の発生を増加させる。

(平成 9 年 10 月 3 日受付, 平成 9 年 12 月 19 日再受付)

文 献

- 1) 平石, 桧垣, 大谷, 川田: 「送油式変圧器における流動帯電現象」, 日立評論, Vol.62 No.2, p59 (1980)
- 2) 白根, 田畑: 「交流課電下での流動帯電特性」, 平 5 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.591
- 3) 檜垣, 他: 「絶縁油の流動帯電特性に及ぼす交流, 直流電界の影響」, 静電気学会誌, 8, 2 (1984)
- 4) 吉田 他: 「直流油浸絶縁における流動帯電現象」, 平 8 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.54
- 5) 高橋, 小林: 「非線形電界解析による油浸複合絶縁の直流フラッシュオーバー電圧の考察」, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-33, 1982
- 6) 大植 他: 「変圧器油の流動帯電特性に及ぼす直流電界と直流/交流重畳電界の影響」, 平 8 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.478
- 7) H. Wu and S. Jayaram: "dc Field Effects on Streaming Electrification in Insulating oils", IEEE Trans.DEI Vol.3, No.4, August 1996, pp499-506
- 8) 吉田 他: 「直流油浸絶縁における流動帯電現象」, 電気学会論文誌 Vol.117-B, No.6, 1997, pp806-812

田中 誠

(非会員) 1961 年 1 月 18 日生まれ。80 年 3 月大分県立中津工業高校卒業。同年関西電力(株)入社。92 年より直流機器、制御装置の開発に従事。現在同室電力システム室大電力送電チーム副長。

中越 吉彦

(非会員) 1956 年 11 月 23 日生まれ。80 年 3 月同志社大学電気工学科卒業。同年四国電力(株)入社。主として変電設備の設計に従事。現在、同社電力部橘湾系統プロジェクトチーム副主査。

畑野 雅幸

(正員) 1961 年 4 月 2 日生まれ。84 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年電源開発(株)入社。直流送電システムの設計、研究開発、北本連系設備Ⅲ期工事の設計、施工管理に従事。現在同社工務部変電グループ課長代理。

宮尾 博

(正員) 1949 年 8 月 21 日生まれ。74 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。主として、超高圧大容量変圧器および高圧回転機の絶縁に関する研究に従事。

小島 啓明

(正員) 1958 年 11 月 28 日生まれ。86 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年(株)日立製作所入社。直流高電圧機器の絶縁に関する研究に従事。工学博士。

古川 貞夫

(正員) 1944 年 7 月 2 日生まれ。72 年茨城大学工業短期学部電子工学科卒業。63 年(株)日立製作所入社。油入変圧器の絶縁に関する研究に従事。

小幡 俊光

(正員) 1950 年 3 月 4 日生まれ。68 年 3 月富山県立高岡工芸高校卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。以来、国分工場変圧器設計部にて主に超高圧大容量変圧器、分路リアクトルの設計に従事。現在に至る。

門脇 慎

(正員) 1969 年 11 月 23 日生まれ。93 年 3 月東北大学工学部精密工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。以来、国分工場変圧器設計部にて主に超高圧大容量変圧器、特に HVDC 用変換用変圧器の設計に従事。現在に至る。