

变压器油流动带电度的微静电测量方法 及其影响因素

任双赞, 钟力生, 刘强, 于钦学, 曹晓珑

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为推动我国变压器油流动带电度测量技术的标准化,在实验室建立了一套微静电测量系统,制定了详细的测量规程,并对影响测量结果的关键因素(温度、流速、滤纸和油流次数)进行了试验研究和讨论. 研究表明:变压器油流动带电度的测量值随温度(10~50 ℃)的升高显著增加,据此推导出带电度随温度变化的校正公式;新油的带电度基本不受流速的影响,老化油的带电度随流速增长下降明显;滤纸和油流次数同样是影响测量结果的重要因素. 该研究对于推动我国变压器油流动带电度测量技术的标准化工作具有积极意义.

关键词: 变压器油;带电度;微静电测量;温度;流速;油流次数

中图分类号: TM933.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0096-05

Mini-Static Test for Streaming Electrification of Transformer Oil and Influence Factors

REN Shuangzan, ZHONG Lisheng, LIU Qiang, YU Qinxue, CAO Xiaolong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To promote the standardization of streaming electrification measuring of transformer oil, a mini-static tester is developed in the laboratory, detailed measuring procedures are scheduled, and some key factors such as temperature, flow rate, filter paper and number of oil flow, which would influence the measurement results are discussed as well. The results indicate that electrostatic charging tendency(ECT) increases significantly with temperature (10~50 ℃), then an emendation formula for ECT changing with temperature is obtained. The ECT of new oil is not influenced by flow rate while ECT of aged oil decreases obviously with the increasing flow rate, and the filter paper and number of oil flow also affect the measuring results.

Keywords: transformer oil; electrostatic charging tendency; mini-static test; temperature; flow rate; number of oil flow

变压器油除了具有绝缘和冷却的作用外,还是变压器内部绝缘信息的携带者^[1]. 在变压器的交接试验和预防性试验中,通过采集油样进行各种分析可以评估变压器内部绝缘状况. 在强迫油循环冷却的高压变压器中,当变压器油流经绝缘油道时,在构成油道的绝缘纸板和绝缘油的界面上会发生电荷分离和累积的现象,即为变压器油流带电^[2],该现象被

认为是造成高压油浸式变压器故障的主要原因之一^[3].

文献[4]最早提出变压器的油流带电问题,此后,在世界各国产生了各种不同的带电度测量方法^[5-11]. 文献[12]提出的微静电测量法具有操作简单、用油量少、可使用标准统一的滤纸及能有效分离电荷等优点,并且具有较高的重复性和再现性,已得

到广泛的应用,并被国际大电网组织推荐为标准测试方法.随后,各国学者对微静电测量法的标准化研究做了大量工作并在本国投入使用^[13-15],而我国对于该方法的系统研究较少,至今仍未建立相关的国家标准.

本文以国产昆仑牌 25 号变压器油为试验对象,在实验室内建立了微静电测量系统,并对影响测量结果的关键因素(温度、流速、滤纸和油流次数)进行了系统的研究,这对于推动我国变压器油流动带电度测量技术标准化具有积极意义.

1 微静电测量方法的建立

1.1 油样制备

在本试验中,所有油样在老化前均经过了严格的脱水及脱气处理,装置如图 1 所示.其中,电磁搅拌系统加热温度为 60 ℃,持续时间为 4 h,整个系统的真空度为 27 Pa,满足《GB/T 14542—2005 运行变压器油维护管理导则》中低于 133 Pa 的要求.经过此番处理,确保了油样中的水分不超过 10 mg/L,油中残余氧气与油样体积比不超过 0.000 5.此外,在老化过程中老化温度控制在 120 ℃,老化时间分别为 0(新油)、50、250、450 和 675 h.

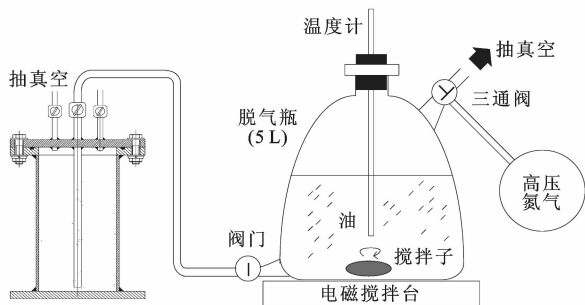


图 1 油样脱水与脱气系统

1.2 测量系统

在实验室中建立的微静电测量系统主要由加压装置、试样油罐、储油腔、电荷分离器、屏蔽箱和微电流测试仪(Keithley6517A)构成,如图 2 所示.在测试时形成了 3 个主要回路:①试样油罐加压回路;②储油腔注油回路;③测量回路.电荷分离器是微静电测量系统的核心装置,主要由滤纸和过滤器构成,如图 3 所示.其中,滤纸采用的是 Whatman 541 型滤纸,微孔直径约为 22 μm,具有较好的流通性,并在油样流过时能够有效地分离电荷^[2].整套系统密封性能良好,采用高纯氮气($\varphi(\text{N}_2) > 99.99\%$)作为加压气体和保护气体,避免了空气及其他杂质对测量

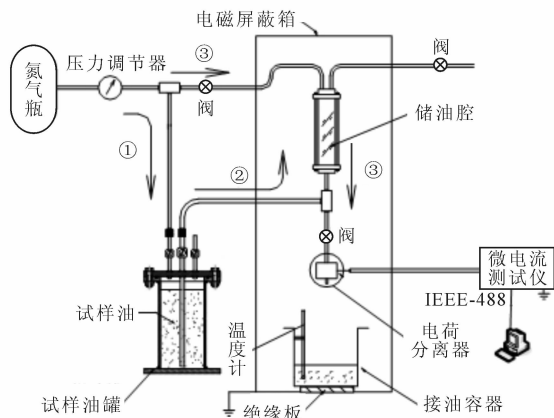


图 2 微静电测量系统

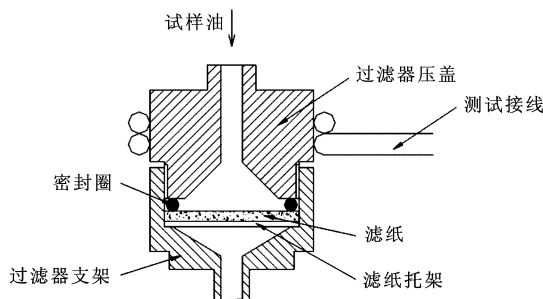


图 3 电荷分离器

结果的影响.

1.3 测量方法

测量前,先用氮气冲洗管道回路从而排除内部滞留的空气,再用新油和试样油分别对系统的油路清洗两遍.测量中,首先用高压氮气对试样油罐加压(回路①),其次利用罐内压力向储油腔内注入 50 mL 试样油(回路②),最后利用高压氮气的推动使试样油以 1.2 mL/s 的速度流过滤纸(回路③),同时利用微电流测试仪测量泄漏电流,并在计算机上保存自动采集的电流波形.重复上述步骤,利用同一滤纸连续测量 5 次.测量后,按下式计算带电度

$$\rho = q/V \quad (1)$$

$$q = \int_0^{t^*} i dt^* = \bar{i} t^* = I t^* \quad (2)$$

式中: q 为被测油样流过滤纸时产生的总电荷量; V 为被测试样油的总体积; I 为被测泄漏电流的中点值; t^* 为被测试样油流尽所用的时间.舍弃第 1 次的测量值 ρ_1 ,取后 4 次测量的平均值作为带电度的测量结果

$$\rho = \frac{\rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5}{4} \quad (3)$$

2 变压器油流动带电度的影响因素

2.1 温度的影响

变压器油流动带电度随温度的变化较为敏感,温度的小幅度改变都会导致带电度的明显变化,而通常的测量都是在室温(15~30 ℃)下进行的,所以有必要将测量值校正到某一规定温度(20 ℃)进行分析比较。

将试样油罐放入烘箱中,把同一油样加热到不同温度后进行了带电度的测量,结果如图 4 所示。

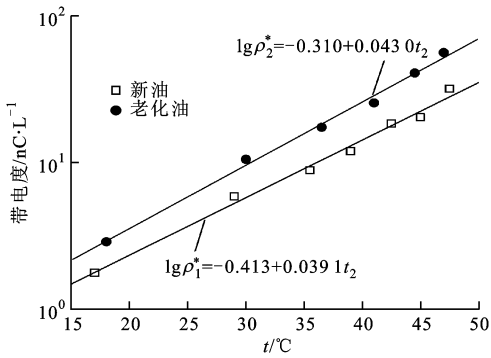


图 4 带电度的温度特性

从图 4 可以看出,新油和老化油(老化 50 h)具有相似的温度特性,即带电度随着油样温度的升高(10~50 ℃)而快速增加,并且带电度的对数与温度 t 呈正线性相关,得

$$\lg \rho_1^* = -0.413 + 0.039\ 1t_1 \tag{4}$$

$$\lg \rho_2^* = -0.310 + 0.043\ 0t_2 \tag{5}$$

式中: ρ_1^* 为新油的带电度; t_1 为新油油样温度. ρ_2^* 为老化油的带电度; t_2 为老化油油样温度。

由式(4)和式(5)可知, $\lg \rho$ 正比于温度 t ,又因两式中斜率平均值为 0.041,所以可知 $\lg \rho \propto 0.041t$,进而可得一般情况下的温度特性公式

$$\lg \rho_t = A + 0.041t \tag{6}$$

式中: A 为温度特性拟合直线在温度轴上的截距; ρ_t 为带电度在温度 t 下的测量值。

当 $t=20\text{ ℃}$ 时,有

$$\lg \rho_{20} = A + 0.041 \times 20 \tag{7}$$

式(6)和式(7)相减,两边取反对数可得

$$\rho_{20} = 6.61\exp(-0.094\ 4t)\rho_t \tag{8}$$

2.2 电荷分离滤纸的影响

即便是同一品牌、型号和批次的滤纸,其微孔结构和分布也不可能完全相同,所以滤纸也是影响带电度测量结果分散性的重要因素.将 Whatman 541 型滤纸和国内某品牌的快速、中速和慢速定量分析

滤纸进行流通性对比,结果发现快速定量滤纸与 Whatman 541 型滤纸最为接近,但相差依然很大,同样的压力(0.1 MPa)下流完 50 mL 新油所用的时间,快速定量滤纸约为 Whatman 541 型滤纸的 2.5 倍,见表 1。

对 Whatman 541 型滤纸和国产快速定量滤纸各抽取 5 个试样进行新油的带电度测试,并保持其他条件不变(温度为 20 ℃,流速为 1.2 mL/s).结果表明,对相同的新油进行测量,使用国产快速定量滤纸的带电度约为使用 Whatman 541 型滤纸的 3.8 倍,见表 2.使用 Whatman 541 滤纸的带电度标准差为 14.2%,而使用快速滤纸时仅为 5.5%。

表 1 不同滤纸流通性的对比

滤纸	Whatman 541	快速	中速	慢速
t^*/s	40	103	200	370

表 2 不同滤纸带电度测量结果的对比

测量顺序	1	2	3	4	5
$\rho_w/nC \cdot L^{-1}$	2.45	2.92	3.23	3.35	3.00
$\rho_k/nC \cdot L^{-1}$	10.57	10.63	10.93	9.55	10.97

注: ρ_w 、 ρ_k 分别为使用 Whatman 541 及快速滤纸时的带电度。

综上所述,与 Whatman 541 型滤纸相比,国产快速定量滤纸测量分散性小,但是流通性较差,在对老化过的油(黏度较大且杂质多)进行带电度测量时,需要较大的压力推动,既不利于流速控制,又容易改变滤纸状态,从而会带来较大的测量误差.所以,我们仍然推荐使用国际上统一的标准 Whatman 541 型滤纸,这样也有利于试验数据间的对比。

2.3 油流速度的影响

流速对带电度的影响较为复杂,对同一油样在相同温度、不同流速下进行测量,结果发现新油和老化油(老化 50 h)具有不同的流速特性,如图 5 所示.无论是新油还是老化油,泄漏电流都随着流速的升高而增大,但是从带电度的角度来考虑,新油和老化油却具有完全不同的流速特性:新油的带电度较小且基本不受流速的影响,老化油的带电度随着流速的增长而减小.文献[14]也报道了类似的试验现象。

对于测量而言,要想达到理想的流速,就需要外界有较高的气压来推动,但压力太大又会对滤纸的微孔结构造成一定破坏,从而加大在连续测量中保证流速恒定的难度,并会导致测量结果的分散性较

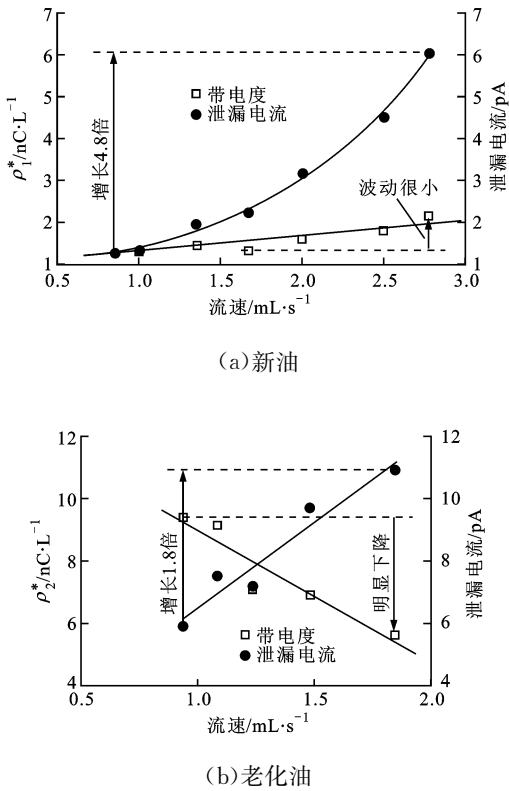


图 5 带电度的流速特性

大. 在本试验中,采用日本学者推荐的 1.2 mL/s 作为标准流速,并通过不断调整氮气压力保证了油样流速的恒定.

2.4 油流次数的影响

油流次数是指在带电度测量的整个过程中油样流过同一滤纸的次数. 对不同油样和油流次数的关系进行试验,结果表明:无论是新油还是老化油,第 1 个试验数据与后面的测量结果差别较大. 这是因为油样和滤纸第 1 次接触时,需要一个适应稳定的过程,并且在第 1 次测量时,很难保证油样流速为设定的 1.2 mL/s,所以导致第 1 个数据可靠性较差,应予去除,如图 6 中虚框所示.

随着油流次数的增加,滤纸还会出现不同程度的堵塞现象,流速稳定同样难以保证. 本文建议采用

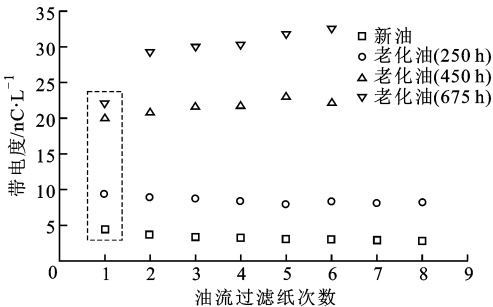


图 6 带电度和油流次数的关系

同一滤纸前 5 次的测量结果作为有效数据,舍弃第 1 个测量数据,取第 2~5 次测量数据的平均值作为最终的测量结果. 此外,通过对 20 个老化程度不同的油样进行带电度测量,发现测量结果包含第 1 个数据时的标准差明显偏大,而不包含第 1 个数据时 20 个油样中 85% 的测量数据标准偏差均小于 10%,由此说明微静电测量法连续测量结果稳定,如图 7 所示.

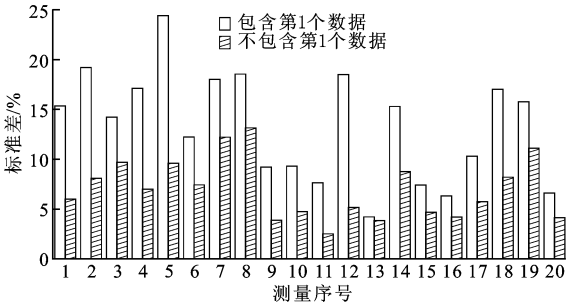


图 7 两种数据处理方法的标准差对比

3 结 论

本文建立了一套微静电测量系统,并提出了详细的测量条件:温度为 15~30 ℃,流速为 1.2 mL/s,滤纸采用 Whatman 541,同一滤纸连续测量 5 次,取后 4 次的平均值为带电度测量结果. 通过对上述测量条件的进一步分析得出以下结论.

- (1)带电度随油样温度的升高而快速增加,lgρ 与温度 t 呈正线性相关,并且得出实用温度校正公式为 $\rho_{20}=6.61\exp(-0.094\ 4t)\rho_t$.
- (2)新油和老化油具有不同的流速特性,新油带电度较小且基本不受流速的影响,而老化油带电度则随流速增长而减小.
- (3)与 Whatman 541 型滤纸相比,虽然国产快速定量分析滤纸的均匀性更好,但是其流通性较差,不适合于老化油带电度的测量.

参考文献:

[1] HOSIER I L, VAUGHAN A S, DAVIS F J, et al. Ageing of insulating oils: chemistry and electrical properties [C/CD] // Proceedings of XIV th International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, China; [s. n.], 2005.

[2] OOMMEN T V. Static electrification properties of transformer oil [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 23(1):123-128.

[3] KANNO M, OOTA N, SUZUKI T, et al. Changes in

- ECT and dielectric dissipation factor of insulating oils due to aging in oxygen [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1048-1053.
- [4] TAKAGI T, ISHI T, OKADA T, et al. Reliability improvement of 500 kV large capacity power transformers [C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 1978.
- [5] KEDZIA J. Investigation of transformer oil electrification in a spinning disk system [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(1): 59-66.
- [6] HOWELLS E, ZAHN M, LINDGREN S R. Static electrification effects in transformer oil circulating pumps [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 1000-1006.
- [7] MORIN A J, ZAHN M, MELCHER J R, et al. An absolute charge sensor for fluid electrification measurements [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(2): 181-190.
- [8] BOURGEOIS A, PAILLAT T, MOREAU O, et al. Flow electrification in power transformers: study of a potential remedy [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3): 650-656.
- [9] SIEROTA A, RUNGIS J. Electrostatic charging in transformer oils, testing and assessment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 840-868.
- [10] 王文端, 王淑娟, 于德明, 等. 圆筒式油流带电模型的研制 [J]. 高电压技术, 1994, 20(1): 8-12.
WANG Wenduan, WANG Shujuan, YU Deming, et al. Development of rotating cylinder electrification model [J]. High Voltage Engineering, 1994, 20(1): 8-12.
- [11] 于钦学, 任文娥, 谢恒堃. 变压器油流带电电荷分离过程的研究 [J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 36-37.
YU Qinxue, REN Wen'e, XIE Hengkun. Study on the process of charge separation at solid-liquid interface due to flow electrification [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 36-37.
- [12] OOMMEN T V, PETRIE E M. Electrostatic charging tendency of transformer oils [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1984, 103(7): 1923-1931.
- [13] ISAKA S, MIYAO H, TSUCHIE M, et al. Investigation for standardization of electrostatic charging tendency measurement of transformer oil in Japan [C]//Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 495-498.
- [14] MAS P, PAILLAT T, TOUCHARD G, et al. Investigation in order to improve the E. C. T. measurement protocol of large power transformer oil [C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York: NY, USA: IEEE, 2000: 65-68.
- [15] Kobayashi T, Yajima K, Tsukao S, et al. Major factors influencing static electrification in an aged transformer [C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York: NY, USA: IEEE, 2005: 474-477.

[本刊相关文献链接]

- 纳米颗粒/矿物冷冻油的流变特性研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 27-30.
- 用非线性电阻模拟变压器损耗进行铁磁谐振过电压研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 109-113.
- 变压器油的热分解动力学研究及其寿命预测. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 112-115.
- 基于分层遗传算法的电力变压器优化设计. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 113-117.
- 水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 111-115.
- 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 718-722.
- 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 481-486.
- 变压器漏电感参数在线辨识方法研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 199-203.
- 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1214-1218.
- 支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(6): 722-726.
- 求解三维准静态矢量磁位的快速多极方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 489-492.
- 静电场作用下 H_2O 偶极极化对冰晶形成过程的影响. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 232-235.

(编辑 杜秀杰)