

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.12.007

植物绝缘油击穿放电故障特征气体分析

蔡胜伟¹, 王飞鹏², 陈程¹, 范帆², 陈江波¹, 文刚², 李剑², 相晨萌², 王吉³

(1. 中国电力科学研究院, 武汉 430074; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要: 对山茶籽植物绝缘油和矿物绝缘油两种变压器用油进行击穿放电故障试验, 采用油中溶解气体分析方法测量并分析两种绝缘油放电故障所产生的油中溶解气体, 分析并对比两种绝缘油纯油及油纸击穿产生气体的种类及百分含量。结果表明: 两种绝缘油在击穿故障后均产生 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 CO 及 CO_2 这 7 种特征气体; 随击穿故障次数的增加, 植物绝缘油中溶解气体总量呈增加趋势, 并且山茶籽植物绝缘油中 CO 和 CO_2 溶解气体含量大于矿物绝缘油; 在两种绝缘油中, C_2H_2 的含量在总烃中始终是最高的, 这说明与矿物油相同, C_2H_2 是山茶籽植物绝缘油击穿故障的主要特征气体。

关键词: 植物绝缘油; 变压器; 击穿故障; 溶解气体; 产气含量

中图分类号: TM214

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)12-052-07

Fault characteristic gas analysis of breakdown discharge of vegetable insulating oil

CAI Shengwei¹, WANG Feipeng², CHEN Cheng¹, FAN Fan², CHEN Jiangbo¹, WEN Gang², LI Jian², XIANG Chenmeng², WANG Ji³

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, P.R.China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 3. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, P.R.China)

Abstract: The electrical breakdown of camellia seed vegetable insulating oil and mineral insulating oil transformer is simulated in experiments, respectively. The dissolved gas characteristics of two kinds of insulating oil are studied by means of dissolved gas analysis method. The type and percentage of gas produced by oil paper breakdown of the two kinds of insulating oil are analyzed and compared. Results show that the two insulating oils produce seven characteristic gases, i.e. H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , CO and CO_2 , under the typical electrical faults. The total amount of gas produced in camellia-seed vegetable insulating oil increases with the increase of the times of breakdown, and the content of CO and CO_2 produced by the insulating oil of camellia seed vegetable is greater than that of mineral insulating oil. The percentage of C_2H_2 is always the highest, which shows that C_2H_2 is the main characteristic gas of camellia-

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家电网公司科技项目(植物绝缘油变压器应用及运维关键技术研究)。

Supported by Science and Technology Project of SGCC (Research on application and operation of transformers immersed vegetable insulation oil).

作者简介: 蔡胜伟(1982—), 高级工程师, 主要从事高压电器试验及新型绝缘材料技术研究, (E-mail) caishengwei@epri.sgcc.com.cn.

seed vegetable insulating oil breakdown.

Keywords: vegetable insulating oil; transformer; breakdown discharge; dissolved gas; gas content

变压器是电力系统中重要和昂贵的设备之一,一旦出现故障不仅会损坏设备,而且可能造成供电中断,影响电网安全运营。绝缘油和绝缘纸构成的绝缘系统是变压器的重要组成部分,但是在设备运行过程中,油纸绝缘系统会受到温度、电场、水分等因素影响而发生绝缘老化,进而导致变压器出现故障。据统计,变压器绝缘问题引起的故障约占总体故障的 80%^[1]。现有的变压器绝缘系统主要是由矿物绝缘油和纤维素绝缘纸构成。矿物绝缘油具有良好的介电性能和低廉的成本,但是容易发生起火或爆炸事故;矿物绝缘油是不可再生资源^[2],其低于 30%的生物降解率也不符合环保要求。植物绝缘油是由天然的油料作物经过压榨、精炼、改性等工艺制备而成的一种新型环保绝缘介质,具有良好的阻燃性、介电性能、油纸绝缘耐老化性能以及高降解率和可再生性^[3-4],越来越成为研究热点并投入实际运行中。

近年来,有许多现代诊断技术用于变压器老化状态的评估,如油中溶解气体分析(dissolved gas-in-oil analysis, DGA)、呋喃衍生物浓度、纸的聚合度(degree of polymerization, DP)和抗拉强度(tensile strength, TS)等^[5]。长期的工程实践证明,变压器油中溶解气体的组分、含量与故障类型密切相关,因此,可以通过分析油中气体组分的变化来判断变压器的状态^[6]。

油中溶解气体分析技术可以有效对变压器内部可能发生或已经发生的故障进行检测。然而,现有的油中溶解气体诊断方法都是以矿物绝缘油为基础建立的,随着植物绝缘油变压器的广泛应用,亟需研究植物绝缘油及油纸在故障下油中溶解气体的特性,建立适合植物绝缘油变压器的油中溶解气体故障诊断方法。

本研究将模拟植物绝缘油和矿物绝缘油的击穿放电故障进行对比,测量两种绝缘油分别在纯油和油纸击穿过程中的产气情况,分析和对比两种绝缘油产气的类别和溶解气体含量,研究击穿放电故障对两种绝缘油产气规律的影响。

1 实验方法及过程

1.1 试样处理

试验采用实验室自制生产的山茶籽绝缘油和中国昆仑润滑剂厂生产的环烷基矿物绝缘油,以及中国河南亚安绝缘材料厂生产的 0.2 mm 厚牛皮绝缘纸作为试验材料。击穿试验前,将油样和纸样于 70 °C 下恒温真空 48 h 以去除水分及其他杂质,随后在真空环境下降低温度至室温,密封保存用于击穿试验。

1.2 实验方法

模拟击穿放电故障测试装置主要由任意波形发生器、高压放大器、高压探头、油杯、电极及数字示波器组成。试验所使用的板电极参考 GB1408.1—2006 标准,采用针板电极,电极材料均为黄铜。如图 1 所示,平板电极为直径 75 mm 的圆盘,高约 10 mm,底部接地。针电极的曲率半径为 200 μm,直径为 1 mm,针电极接高压端。纯油击穿时,针尖至平板电极的距离为 10 mm。

击穿试验前,油杯及电极使用正己烷清洗并干燥后,使用试验用绝缘油润洗,最后将试验用绝缘油倾倒入油杯并静置 10 min,消除倒入时产生的气泡。试验采用升压法,对试品上施加 50 Hz 交流电压,电压从零开始以 2 kV/s 的速度匀速升压直至击穿。纯油及油纸试验在每次击穿后静置 10 min,随后再进行下次击穿试验,分别进行 5 次、10 次、15 次、20 次击穿试验,采集油样并利用气相色谱法测量和分析油中溶解气体成分及溶解气体含量。

1.3 油中溶解气体分析

试验采用 GC-9560-HD 变压器油专用色谱仪,选用震荡脱气法进行气体收集。利用变压器专用色谱分析仪

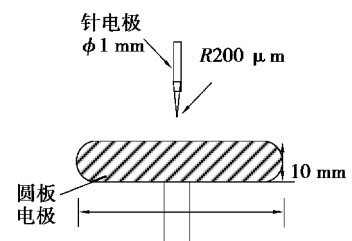


图 1 击穿放电故障试验电极模型

Fig.1 Electrode model of breakdown discharge

中的振荡脱气装置,在装入少量油样的密闭容器中加入一定量的氮气,经充分振荡,使油、气两相建立平衡^[7]。脱气结束后,振荡脱气装置将气体直接送入色谱仪中自动进行气体的分析,并将结果输出到计算机中,生成图谱并标记气体的种类及含量。

2 结果与讨论

2.1 植物绝缘油与矿物油的基本电气性能

植物绝缘油与矿物绝缘油具备不同的成分及结构,因此,两种绝缘油的理化性能和电气性能具有差异性,这些差异性直接关系到植物绝缘油在油浸式电力设备中的应用。表 1 列出了山茶籽植物绝缘油和矿物绝缘油的各项基本性能^[8-9]。

表 1 山茶籽绝缘油与矿物绝缘油的基本性能
Table 1 Basic properties of vegetable oil and insulating oils

参数	山茶籽	矿物油
运动粘度(40 °C)/(mm ² · s ⁻¹)	43	3~16
酸值/(mgKOH · g ⁻¹)	0.03	≤0.03
凝点/°C	-18	-60~-30
闪点/°C	325	100~170
密度(20 °C)/(kg · dm ⁻³)	0.90	0.83~0.89
界面张力/(mN · m)	30	—
21 天生物降解率/%	98	30
工频击穿电压(2.5 mm)/kV	73	60
介质损耗角正切(90 °C)/%	2	<0.5
体积电阻率(90 °C)/(Ω · cm)	10 ¹²	—
相对介电常数	2.9(90 °C)	2.2(25 °C)

从表 1 中数据可见,山茶籽植物绝缘油大于 300 °C 的闪点明显高于矿物油的闪点,因此,植物绝缘油可以应用于安全要求更高的场合;山茶籽植物绝缘油的生物降解率在 21 天后就可以达到 98%,远高于矿物绝缘油 30% 的数值^[10];同时,较高的击穿电压也可以保证山茶籽植物绝缘油在高压变压器中安全运行。但是与矿物油相比,山茶籽绝缘油的运动粘度较大、相对介电常数与介质损耗因数较高,这主要是因为其分子结构的不对称。山茶籽植物绝缘油可以与绝缘纸更好地配合组成绝缘系统,有效延缓绝缘纸的老化速率,延长油纸绝缘系统的寿命^[11]。

2.2 纯油故障气体分析

绝缘系统在制备过程中或者长时间运行后会存在缺陷,导致其在高电场强度作用下容易发生击穿等故障。同时,绝缘系统在运行过程中可能发生局部放电现象,这些微弱的放电将产生累积效应并导致绝缘的介电性能逐渐劣化并使局部缺陷扩大,最后导致整个绝缘击穿^[12]。

图 2 是纯油针-板间隙击穿放电 10 次的植物绝缘油和矿物绝缘油故障后的油中溶解气体含量图。两种绝缘油在击穿故障后均产生 H₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂、CO 及 CO₂ 这 7 种特征气体。在矿物绝缘油中,CO、CO₂ 主要在绝缘纸放电过程中才会产生^[13],因此,在纯油击穿放电故障时,重点比较氢气与烃类气体的变化。击穿故障后,两种绝缘油的 H₂ 和 C₂H₂ 的溶解气体含量均为最高,其次是 C₂H₄,而 CH₄ 和 C₂H₆ 溶解气体含量最少。总烃指的是所有碳氢化合物,在绝缘油中通常将油中溶解的甲烷、乙烯、乙炔、乙烷等气体统计为总烃含量,而矿

物绝缘油的总烃要高于山茶籽植物绝缘油。

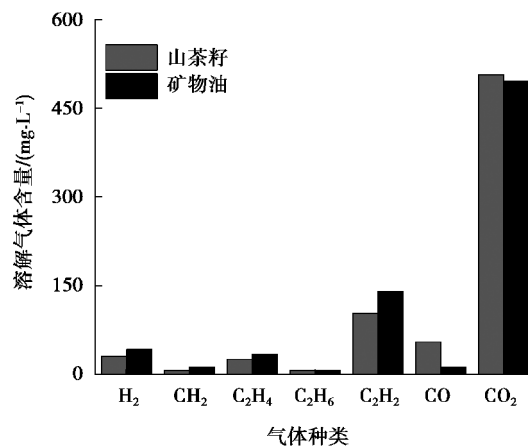


图 2 纯油击穿放电故障的溶解气体含量

Fig.2 Dissolved gas content of pure-oil breakdown discharge fault

分子中化学键在受到足够大的初始能量时将会被破坏,并生成低分子结构的氢气、烃类、一氧化碳、二氧化碳等气体,而且化学键强度可以影响产气速率,化学键的键能越高,产气速率越低。在击穿放电故障时,绝缘油受到能量比较高的电场作用时,容易产生 C₂H₂ 气体,这是因为 C-H 键(99 kcal/mol)或者 C-C 键(83 kcal/mol)的键能相对较低,导致其容易发生断裂,并游离出 H 原子和 CH₃ 原子从而形成游离基,这些游离基在经过一系列反应后最终产生 H₂ 和 C₂H₂ 气体。

2.3 油纸故障气体分析

变压器中绝缘系统是由绝缘油和绝缘纸共同组成的,由于变压器油可更换,变压器寿命主要受绝缘纸的寿命影响^[14],因此,研究油纸击穿放电故障十分重要。图 3 是油纸针-板间隙击穿放电 10 次的植物绝缘油和矿物绝缘油故障后的油中溶解气体含量图。在油纸击穿故障后,两种绝缘油中均溶解有大量的 H₂ 和 C₂H₂ 气体,其次是 C₂H₄,而 CH₄ 和 C₂H₆ 溶解气体含量最少。

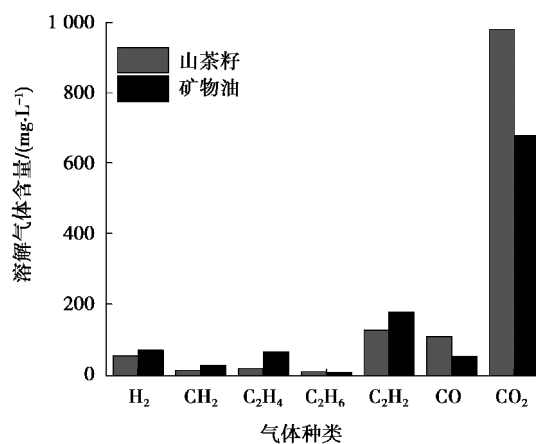


图 3 油纸电击穿故障的溶解气体含量

Fig.3 Dissolved gas content of Oil-paper breakdown discharge fault

油纸击穿放电故障下油中溶解气体与纯油情况相比,油中溶解气体含量明显增多。同时,变压器中固体绝缘材料发生放电性故障时容易产生更多的 CO 和 CO₂ 气体,这是由于参与变压器固体绝缘材料为绝缘纸,其主要成分是纤维素,化学通式为(C₆H₁₀O₅)_n。绝缘纸具有很大的强度和弹性,机械性能良好,但是变压器在长期工作过程中,油纸绝缘系统受到温度、电场等影响因素的作用,纤维中大分子会发生裂解反应^[15],纤维素中的

C-O键断裂,产生较多的 O_2 ,并与纤维中 C 反应产生较多的 CO 和 CO_2 气体。

在纯油和油纸击穿放电故障后,山茶籽植物绝缘油中溶解的 CO 和 CO_2 气体含量均高于矿物绝缘油,这主要是由于植物油的分子结构中含有羧基($-COO$),在击穿放电故障下容易分解出 CO 和 CO_2 。植物绝缘油和矿物绝缘油的分子组成和结构不同、理化性能差异大,导致植物绝缘油与绝缘纸的相容性和劣解产物等方面与矿物油存在差异。植物绝缘油中含有脂肪酸甘油三酯,与绝缘纸能够发生酯交换反应,导致纤维素的活性羟基变得稳定,提高了绝缘纸的稳定性,从而减缓油纸绝缘系统的老化^[16]。

图 4 为山茶籽绝缘油的纯油及油纸针-板击穿放电故障 10 次后的油中溶解气体含量图,并与未老化油样进行对比分析。从图中可见,在原始油样中几乎没有溶解 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_2H_2 气体,并且也仅有少量的 CO 和 CO_2 气体。纯油击穿放电故障后,山茶籽植物绝缘油中所有特征气体含量均有明显增加,其中 H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、CO 和 CO_2 增加最为明显,而 CH_4 和 C_2H_6 的溶解气体含量增加不明显。油纸电击穿故障的溶解气体含量虽然与纯油电击穿故障的规律相似,但是总烃的产气量要明显高于纯油击穿油样,同时生成更多 H_2 、 C_2H_2 、CO 和 CO_2 气体。

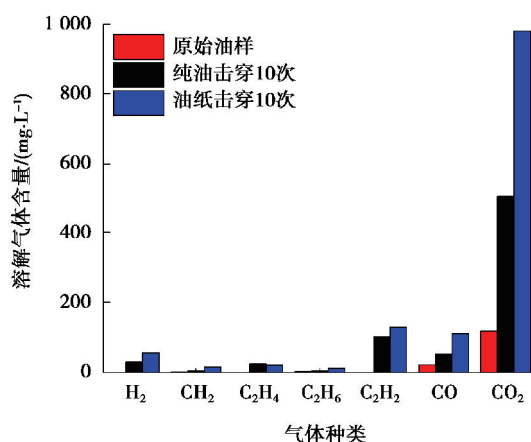


图 4 山茶油原始油样与电击穿故障的溶解气体含量

Fig.4 Dissolved gas content of original oil and breakdown discharge fault

2.4 主要特征气体含量与击穿次数的关系

与矿物绝缘油的油纸绝缘系统相比,植物绝缘油的油纸绝缘系统具有更为复杂的老化过程,因此,不能简单地套用矿物绝缘油的油纸绝缘老化诊断方法和标准。

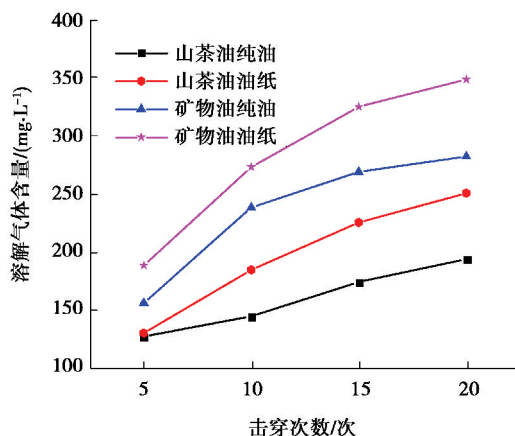


图 5 两种绝缘油中总烃气体含量与击穿次数之间的关系

Fig.5 Relationship between total hydrocarbon gas content and breakdown times in camellia oil

图 5 为两种绝缘油中总烃的产气量与击穿次数之间的关系。从图中可见,在本次实验中,两种绝缘油中总烃气体含量随击穿次数的增加而增加,并且矿物油的总烃含量要高于植物绝缘油。纯油或油纸绝缘系统产生故障初期,由于油中溶解气体含量较少,所以故障气体会迅速溶解于油中,导致溶解气体含量在短时间内达到较高的水平,但伴随着故障次数的增加,造成纯油或油纸绝缘性能劣化,溶解气体含量达到一定值,油中溶解气体含量的增速将趋于平缓。

经过计算,山茶籽绝缘油在纯油击穿或油纸击穿 5 次、10 次、15 次、20 次后产生的故障气体 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 及 C_2H_2 中, C_2H_2 所占的体积分数始终大于 55%,因此, C_2H_2 可以被看作是山茶籽植物绝缘油击穿放电故障的特征气体。

3 结 论

1) 在击穿放电故障试验后,山茶籽植物绝缘油与矿物绝缘油相同,均产生 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、CO 及 CO_2 这 7 种特征气体。山茶籽植物绝缘油和矿物油在击穿放电故障下产生的 C_2H_2 在总烃中占比最高,因此,可以看作是两种绝缘油的特征气体。

2) 在纯油击穿放电故障试验后,矿物绝缘油的 CO 和 CO_2 气体含量基本不变,而山茶籽植物绝缘油会产生更多的 CO 和 CO_2 气体;在油纸击穿放电故障试验后,两种绝缘油均产生 CO 和 CO_2 气体,同时山茶籽植物绝缘油产生的 CO 和 CO_2 气体含量明显多于矿物绝缘油。

3) 随着击穿放电次数的增加,两种绝缘油的油中溶解气体含量也逐步增加,并逐步趋于稳定;无关击穿放电的次数, C_2H_2 在总烃气体含量中的占比始终是最高的。

参考文献:

- [1] 李剑,姚舒瀚,杜斌,等.植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J].高电压技术,2015,41(2):353-363.
LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to Principle Problems and Future Prospect of Research on Vegetable Insulating Oils and Their Applications [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 353-363. (in Chinese)
- [2] Tenbohlen S, Koch M. Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 825-830.
- [3] 邹平,李剑,孙才新,等.植物绝缘油中含水量对其绝缘性能的影响[J].高电压技术,2011,37(7):1627-1633.
ZOU Ping, LI Jian, SUN Caixin, et al. Influences of Moisture Content on Insulation Properties of Vegetable Insulating Oil [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1627-1633. (in Chinese)
- [4] Li J, Du B, Wang F. The effect of nanoparticle surfactant polarization on trapping depth of vegetable insulating oil-based nanofluids[J]. Physics Letters A, 2016, 380(4): 604-608.
- [5] Bakar N, Abu-Siada A, Islam S. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30(3): 39-49.
- [6] 陈伟根,许庭,谢波,等.油纸绝缘气隙放电与油中产气规律的相关—回归分析[J].重庆大学学报,2013,36(3):59-64.
CHEN Weigen, XU Ting, XIE Bo, et al. Correlation and regression analysis of air-gap discharge and gas generation law in oil-paper insulation[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(3): 59-64. (in Chinese)
- [7] 李剑,党剑亮,杨丽君,等.三种植物绝缘油的理化与电气性能的比较[J].重庆大学学报,2007,30(9):42-45.
LI Jian, DANG Jianliang, YANG Lijun, et al. Comparison on Physical and Chemical Characteristics and Electric Properties of Three Types of Vegetable Insulating Oil [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(9): 42-45. (in Chinese)
- [8] Li J, Zhang Z, Zou P, et al. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties[J]. Electrical Insulation Magazine IEEE, 2012, 28(5): 43-50.

- [9] Wilhelm H, Santos C, Stocco G. Dissolved gas analysis (DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(3):1071-1078.
- [10] Meshane C P. Natural and synthetic ester dielectric fluids; their relative environmental, fire safety, and electrical performance[C]// Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference. IEEE, 1999:8.
- [11] Yang L, Deng B, Liao R, et al. Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging Rate of Kraft Paper and its Mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):2059-2067.
- [12] Huang D, Li J, Zhang J, et al. Metallic particle effect on the AC breakdown strengths of vegetable insulating oil[C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2015:605-608.
- [13] 陈伟根, 杨剑锋, 凌云, 等. 变压器油纸绝缘沿面放电特性及其产气规律[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1):94-99.
CHEN Weigen, YANG Jianfeng, LING Yun, et al. Surface discharge characteristics and gas generation law in oil-paper insulation of transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(9):42-45. (in Chinese)
- [14] Pahlavanpour P, Eklund, Martins M A. Insulating paper ageing and furfural formation[C]// Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003. Proceedings. IEEE, 2003:283-288.
- [15] 廖瑞金, 周旋, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘热老化过程的中红外光谱特性[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2):1-6.
LIAO Ruijin, ZHOU Xuan, YANG Lijun, et al. The mid-infrared spectra characteristic of the transformer oil-paper insulation in thermal ageing process[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2):1-6. (in Chinese)
- [16] 杨丽君, 廖瑞金, 孙才新, 等. 植物油对油浸绝缘纸老化速率的影响及机理[J]. 电工技术学报, 2012(5):26-33.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Caixin, et al. Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging Rate of Kraft Paper and Its Mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012(5):26-33. (in Chinese)

(编辑 王维朗)