

# 腐蚀性硫化物对绝缘绕组局部放电特性的影响

陆云才<sup>1</sup>, 张 将<sup>2</sup>, 蔚 超<sup>1</sup>, 廖才波<sup>1</sup>, 杨丽君<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 变压器油在特定条件下会发生硫腐蚀现象, 所生成的腐蚀性硫化物会影响绝缘绕组性能, 进而引发设备故障。文中研究变压器油中腐蚀性硫化物对绝缘绕组局部放电特性的影响, 通过对不同腐蚀情况的绝缘绕组试品进行局部放电测试, 得到腐蚀性硫化物沉积量对绕组局部放电特征的影响规律。结果表明腐蚀性硫化物的沉积会降低绝缘绕组的局部放电起始放电电压, 使得绝缘绕组容易放电, 且放电密度与放电重复率与腐蚀性硫化物沉积量成正比。

**关键词:** 腐蚀性硫化物; 二苳基二硫; 绝缘绕组; 局部放电

**中图分类号:** TM855

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)05-0075-06

## 0 引言

近年来, 变压器油硫腐蚀造成的变压器故障所占比例逐渐增长, 绝缘绕组的绝缘性能因受到腐蚀性硫化物污染而下降, 进一步引发绝缘故障, 该问题受到了国内外学者和有关电力部门越来越多的关注。目前国内外学者对腐蚀性硫的来源、形成机理及其沉积对绝缘性能影响的规律等方面开展了一些试验研究工作, 并取得了一定的进展<sup>[1-4]</sup>, 但还有很多问题有待研究和解决, 尤其是不同腐蚀程度对变压器绝缘绕组绝缘性能的影响至今鲜有研究。

变压器油中的腐蚀性硫主要来源于石油炼制过程中残留的硫成份, 属于活性硫, 能与铜导线发生反应<sup>[5-6]</sup>。文献[4]通过对油硫腐蚀后铜线及绝缘纸上的沉积物质成分进行分析, 初步判定主要成分为硫化亚铜。有文献指出变压器油中最主要的腐蚀性硫化物为二苳基二硫(DBDS)<sup>[7]</sup>。运行经验及研究结果表明, DBDS 在高温下会与变压器中的铜绕组发生反应, 生成导电性较高的铜硫化合物, 沉积于绝缘纸上, 畸变电场并影响绕组的绝缘性能<sup>[8-9]</sup>。这类沉积物在绕组上的逐步沉积与扩散, 会造成绝缘体内部或表面出现某些区域电场强度高于平均电场强度。当这些区域的击穿场强低于平均击穿场强时将会首先发生放电, 而其他区域仍保持绝缘特性, 从而形成局部放电。

局部放电不仅是变压器设备绝缘劣化的先兆和表现形式, 而且能够引起绝缘的进一步劣化, 致

使变压器内部油纸绝缘的电气绝缘性能逐渐降低, 最终导致绝缘击穿或沿面闪络, 局部放电信号的幅度大小、放电次数、相位分布以及其他统计特征包含着变压器的绝缘状态和放电严重程度等综合信息<sup>[10-12]</sup>。腐蚀性硫化物的沉积会使得整个绕组容易起始放电, 且在匝间放电更易发展, 最终导致绝缘故障。因此研究腐蚀性硫化物对变压器绝缘绕组绝缘性能的影响更具实际意义。

文中通过探究沉积在变压器绝缘绕组上的腐蚀性物质对绝缘绕组局部放电特性的影响与变化规律, 深入解析由硫腐蚀问题导致变压器故障发生的原因, 为预防此类事故的发生提供可靠的理论依据, 具有一定的工程实用价值与应用前景。

## 1 绝缘绕组局部放电试验

### 1.1 试验材料

试验采用重庆亚东亚变压器厂提供的变压器纸包铜绕组。铜导线尺寸为 15 mm×2.36 mm(宽×厚), 缠绕两层厚度为 0.45 mm 的普通硫酸木浆盐绝缘纸, 试验时将其截为长度为 90 mm 的纸包铜试品。绝缘油为新疆克拉玛依 25 号变压器油。试验用 DBDS 添加物由成都格雷西亚化学技术有限公司提供, 其分子式为 C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>S<sub>2</sub>, 相对分子质量为 246.38。

### 1.2 试验流程

试验流程如图 1 所示。对纸包铜绕组试品进行干燥、浸油等预处理, 同时分别在 500 mL 的耐高温玻璃容器中配制 200 mg/kg, 500 mg/kg 两种 DBDS 绝缘油溶液。将预处理好的纸包铜样品浸渍于配制好的绝缘油溶液中, 密封容器并放置于 130 °C 老

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1766217)

化箱中进行热老化试验。同时按照相同流程制备一组空白样以作对比,其绝缘油中的 DBDS 添加量为  $0 \text{ mg/kg}$ 。分别在老化 7 d, 20 d, 38 d 时取出样品进行局部放电测试。

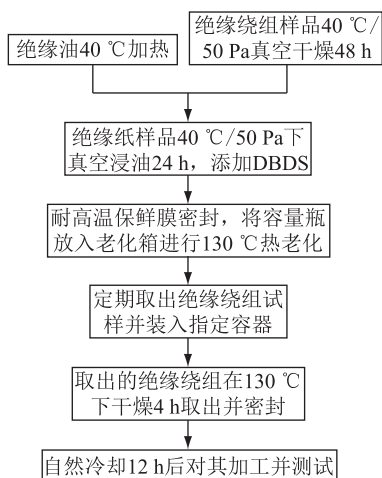


图 1 试验流程

Fig.1 The flow chart of test

### 1.3 试验平台与方法

试验采用脉冲电流法对试品的局部放电信号进行测试,系统回路如图 2 所示。高压电源主要包括自耦调压器(TDZ-50 柱式调压器;输入柱式调压器,输入 380 V,输出  $0 \sim 420 \text{ V}$ )和无晕试验变压器( $50 \text{ kV} \cdot \text{A}/50 \text{ kV}$ )组成, $C_1$ 和  $C_2$ 构成电容分压器, $C_x$ 为试品, $D$ 为检测阻抗。数据采集使用 Wavepro7100 数字示波器,试验中数据采样率设置为  $100 \text{ MS/s}$ 。

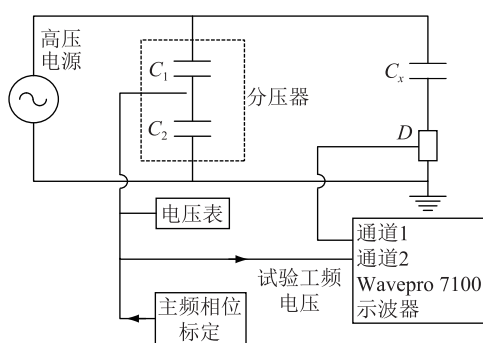


图 2 局部放电测量回路

Fig.2 The measurement circuit of partial discharge

试验在电磁屏蔽室里开展,试验温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将预处理过的绝缘绕组试品接入如图 2 所示回路并静置 12 h。静置完成后首先采用直接校准法对系统进行放电量的校准工作,然后对样品缓慢加压,观察示波器出现明显的局放信号,记录试品的起始放电电压,采集此电压下的 500 个工频周期的局部放电脉冲序列数据。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 绕组模型起始放电电压测试结果

对分别老化了 7 d, 20 d, 38 d 的绝缘绕组试品分别测试起始放电电压,测试同种控制条件下的 3 个试品起始放电电压的平均值作为表征该种控制条件下试品的起始放电电压,测试结果如表 1 所示。

表 1 绝缘绕组试品局部放电起始电压

Tab.1 The PDIV of the test sample

DBDS 添加量/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	老化时间/d	平均起始放电电压/kV
0	0	7.5
	7	16.3
	20	16.1
	38	13.8
200	0	7.8
	7	11.3
	20	12.6
	38	7.8
500	0	8.1
	7	11.7
	20	10.7
	38	9.8

从表 1 可以看出,老化开始前,没有添加 DBDS 的试品即空白样在  $6.9 \sim 8.2 \text{ kV}$  时观测到起始放电,而随着老化时间的增加,正常老化试品的起始放电电压呈先增大后减小的趋势,这是由于绝缘纸在老化初始阶段老化迅速,浸油率短时间内变大所致。在老化 20 d 后,绝缘纸中纤维素由于热应力的作用,分子链间发生了键的交联,纤维素间的相互作用力变大,绝缘纸变得更加紧密,使绝缘纸的浸油率变小,导致油纸绝缘绕组的整体起始局放电压开始下降。

在老化 7 d 时,添加了  $200 \text{ mg/kg}$  和  $500 \text{ mg/kg}$  DBDS 的试品分别在  $11.3 \text{ kV}$  和  $11.7 \text{ kV}$  时监测到明显的放电信号,空白样试品在电压施加到  $16.3 \text{ kV}$  时才开始出现放电信号。随着老化时间的增长,老化 20 d 时,添加了  $200 \text{ mg/kg}$  DBDS 的试品在低于空白样试品  $3.5 \text{ kV}$  时监测到放电信号;老化 38 d 时,添加了  $200 \text{ mg/kg}$  DBDS 的试品在低于空白样试品  $6 \text{ kV}$  时监测到放电信号,这表明腐蚀性硫化物的沉积对绝缘绕组模型的局部放电起始放电电压具有一定的影响,在一定程度上降低了局部放电的起始放电电压。对比 DBDS 添加量为  $200 \text{ mg/kg}$  和  $500 \text{ mg/kg}$  试品的起始放电电压,随着绝缘油中 DBDS 含量的增加,在相同老化时间下,其局部放电起始放电电压之间的差距并没有明显的规律。

## 2.2 绕组模型放电谱图规律分析

对每一组绕组试品在起始放电电压下的放电情况进行分析,研究不同老化阶段与不同腐蚀性物质沉积的试品放电脉冲幅值 $q$ 与相位角 $\varphi$ 的 $q-\varphi$ 谱图规律。试验结果表面,空白样试品在缓慢加压至16.3 kV时,其 $q-\varphi$ 图谱已经出现相位偏移,说明该试品已到达预击穿阶段,但并没有监测到明显的放电信号,放电量相对较小,放电不太稳定,正负半周放电不对称。而添加了200 mg/kg和500 mg/kg DBDS的试品分别在11.3 kV和11.7 kV就已经可以观察到明显的放电信号,图谱特征显示放电信号正负半周比较对称,放电量相比空白样有所增加,且放电主要集中在 $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处,在其他相位处并没有监测到明显放电信号。说明在老化初始阶段,腐蚀性硫化物的沉积使得绕组试品在低于空白样5 kV左右的电压下就开始有明显放电信号产生,图谱特征也表明在相同老化时间下其放电密度随着绝缘绕组中腐蚀性物质沉积量的增加逐渐增大。

图3为老化38 d时3种不同DBDS添加量下试品的 $q-\varphi$ 谱图。可看出空白样试品在老化第38 d时放电密度与最大放电量相对较低,老化末期试品的放电密度随着DBDS添加量的增加呈明显增长趋势。对比老化7 d与38 d添加了500 mg/kg DBDS试品的 $q-\varphi$ 谱图,可以看出随着绝缘绕组试品上腐蚀性物质沉积量的增加,在 $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处放电重复率明显升高。

放电谱图结果表明,腐蚀性硫化物的沉积使得绕组更容易发生放电,其放电密度随着绝缘绕组中腐蚀性物质沉积量的增加逐渐增大,即腐蚀性硫化物的存在会降低绕组的放电起始电压,增大放电频率,使绕组所受损伤加剧,进而损害油纸绝缘。

## 2.3 绕组模型放电 PRPD 统计谱图分析

为研究腐蚀性硫化物的沉积量对绝缘绕组模型放电量、放电相位以及放电次数的变化情况,试验给出老化初始阶段与老化末期试品放电 PRPD 模式的最大放电量相位分布 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ ,平均放电量相位分布 $H_{q_{\text{ave}}}(\varphi)$ ,放电次数相位分布 $H_n(\varphi)$ 和放电幅值分布 $H_n(q)$ 4个二维图谱。在老化7 d初期,随着腐蚀性物质沉积量的增加,各个相位开窗的最大放电量与平均放电量均逐渐增大,放电相位变宽。相比于空白样最大放电量的分散性,受硫腐蚀的试品放电相位相对集中,主要位于 $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处,且随着腐蚀性硫浓度的增加,各相位下的最大放电量的值趋于平稳,500 mg/kg DBDS添加量

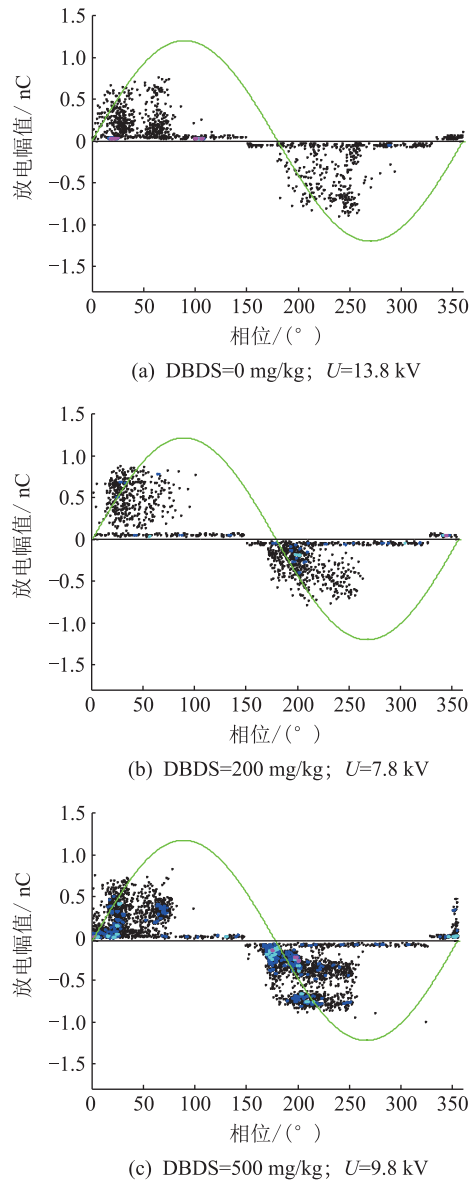


图3 老化38 d时不同DBDS添加量试品放电 $q-\varphi$ 谱图

Fig.3 The  $q-\varphi$  spectrogram of different DBDS concentration under ageing 38 days

下最大放电量稳定在800 pC左右。

老化7 d时试品的 $H_n(\varphi)$ 图谱显示老化初期随着腐蚀性硫化物沉积量的增加, $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处放电密度逐渐增加。空白样试品偶尔能观察到一些稀疏、不稳定放电脉冲。老化7 d 3种DBDS添加量下试品的 $H_n(q)$ 图谱显示最大放电量逐渐随着腐蚀性硫化物沉积量的增加逐渐增大,且放电越密集处的放电量越大,其中空白样放电最密集处的放电量为120 pC左右,200 mg/kg和500 mg/kg试品放电最密集处的放电量分别为240 pC和700 pC左右。

图4为老化38 d时3种DBDS添加量下试品放电信号的 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 与 $H_{q_{\text{ave}}}(\varphi)$ 谱图。可以看出,

老化末期各试品的最大放电量和平均放电电量变化不大,但随着腐蚀程度的增加,放电分布相位向左移动。相比于空白样,受硫腐蚀试品在各个相位下的最大放电量与平均放电电量波动范围也相对稳定。

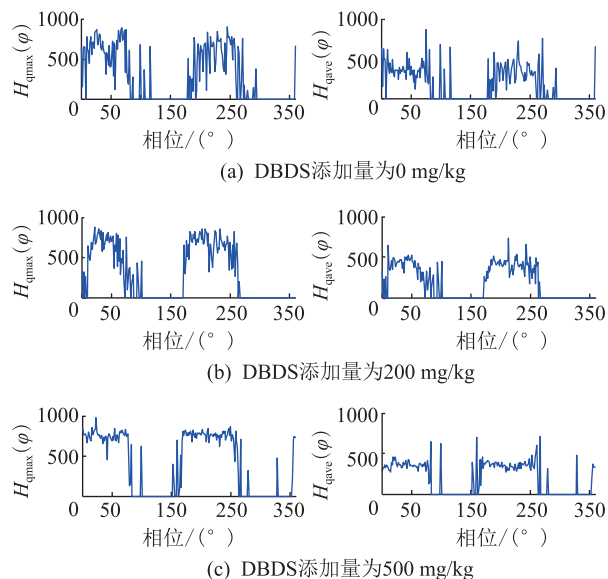


图4 老化38 d 3种DBDS添加量下试品的 $H_{qmax}(\varphi)$ 与 $H_{qave}(\varphi)$ 图谱

Fig.4 The  $H_{qmax}(\varphi)$  and  $H_{qave}(\varphi)$  spectrogram of three different DBDS concentration under ageing 38 days

老化38 d时3种试品的 $H_n(\varphi)$ 图谱,如图5所示。

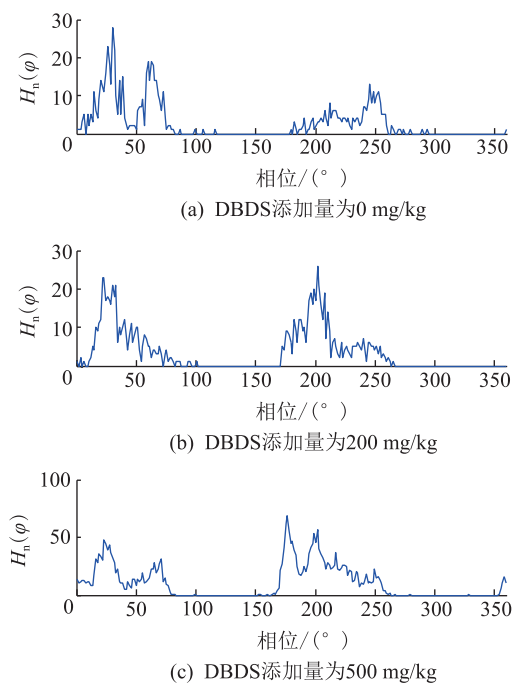


图5 老化38 d时3种DBDS添加量下试品的 $H_n(\varphi)$ 图谱

Fig.5 The  $H_n(\varphi)$  spectrogram of three different DBDS concentration under ageing 38 days

可以看出在老化末期,3种不同腐蚀程度试品的 $H_n(\varphi)$ 图谱形状相似,随着腐蚀性硫化物沉积量的增加,在 $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处试品的放电次数呈逐渐上升趋势,其中在负半周放电次数变化尤为明显。空白样试品不再是仅偶尔观察到一些稀疏、不稳定放电脉冲,而是在 $0\sim 90^\circ$ 和 $180\sim 270^\circ$ 相位处均有类似的放电信号产生,放电相位宽度相对较窄,放电密度较小。

老化38 d时3种试品的 $H_n(q)$ 图谱,如图6所示。

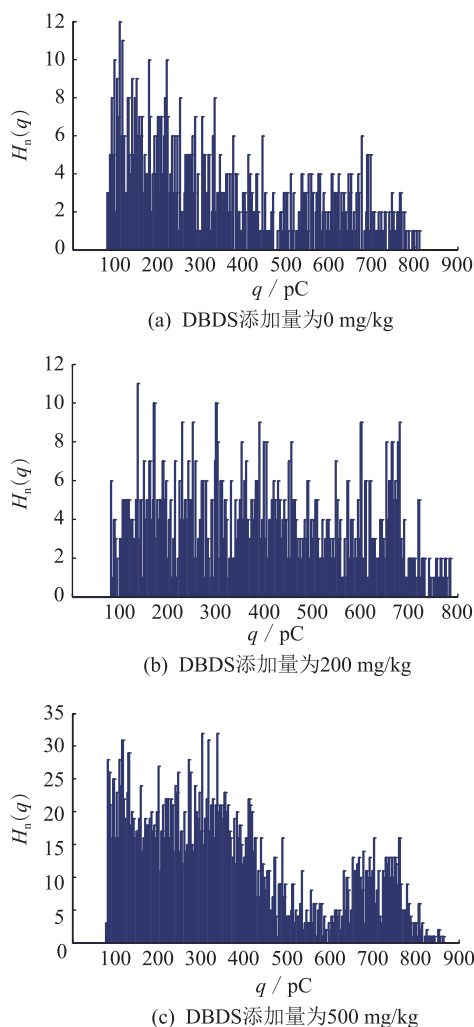


图6 老化38 d时3种DBDS添加量下试品 $H_n(q)$ 图谱

Fig.6 The  $H_n(q)$  and spectrogram of three different DBDS concentration under ageing 38 days

可以看出在老化末期,试品的最大放电电量逐渐随着腐蚀性硫化物沉积量的增加逐渐增大。3种试品的放电次数最大处均处在正半周区域,空白样与200 mg/kg DBDS试品放电最密集处的放电电量均在120 pC左右,而500 mg/kg DBDS试品放电最密集处的放电电量在320 pC左右。200 mg/kg DBDS和

500 mg/kg DBDS 试品同时在高放电量处有较大的放电密度,说明在老化末期,空白样由于长时间老化的作用,绕组中绝缘纸性能下降,导致整个绝缘绕组中形成局部缺陷。添加了 DBDS 的绝缘绕组试品一方面因为受腐蚀较为严重,沉积的腐蚀性硫化物较多,另一方面也受到长时间老化的影响,因此在各放电量下均有很高的放电重复率。在老化末期腐蚀性硫化物的沉积对绝缘绕组试品的最大放电量 and 平均放电量影响不太明显,但随着腐蚀性硫化物沉积量的增加,试品在  $0\sim 90^\circ$  和  $180\sim 270^\circ$  相位处的放电密度逐渐增大。

实验结果表明,腐蚀反应的发生对绝缘绕组模型放电量、放电相位以及放电次数有较大影响,腐蚀性硫化物的沉积使得绝缘绕组局部放电最大放电量 and 平均放电量增加,放电次数显著升高,并且在各放电量下均有很高的放电重复率,低放电量下的放电主要由绝缘绕组老化导致的,高放电量下的放电主要由腐蚀性硫化物的沉积引起。过高的放电量会使绕组受到损伤,随着放电次数的增加,逐步累积的损伤会降低绕组绝缘性能,增大绝缘故障的可能性,进而威胁设备的安全运行。

### 3 结论

文中通过在实验室探究沉积在变压器绝缘绕组上的腐蚀性物质对绝缘绕组局部放电特性的影响与变化规律,深入解析由硫腐蚀问题导致变压器故障发生的原因,得出以下结论:

(1) 腐蚀性硫化物的沉积对绝缘绕组模型局部放电的起始放电电压具有一定的影响,它在一定程度上降低了局部放电的起始放电电压。

(2) 腐蚀性硫化物能使得绕组试品容易放电,放电密度与放电重复率与腐蚀性硫化物沉积量成正比,绝缘油中 DBDS 添加量越高,试品的放电变化规律越明显。

(3) 腐蚀反应的发生使放电量与放电次数增大,损害绕组绝缘,影响设备的安全可靠运行。在老化初期腐蚀性硫化物的沉积使得绝缘绕组试品局部放电最大放电量 and 平均放电量增加,且硫腐蚀越严重,其放电在高放电量下放电密度越大;在老化末期,腐蚀性硫化物的沉积使  $0\sim 90^\circ$  和  $180\sim 270^\circ$  相位处的放电密度呈增大趋势;在整个老化过程中试品绝缘绕组模型的放电量与腐蚀性物质沉积量成正比,在高放电量处的放电重复率增大。

#### 参考文献:

[1] 胡治平,池华建. 阴极保护防腐蚀技术在变电所及发电厂的

应用[J]. 江苏电机工程,2006,25(2):82-84.

HU Zhiping, CHI Huajian. Application of cathodic protection technology in substations and power plants [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(2): 82-84.

[2] LEWAND L R. Corrosive sulfur in oils, and transformers: why it is such a problem [J]. Doble Presentation at IEEE/PES transformers committee 2005 fall meeting, Memphis, America, 2005, 23-27.

[3] 钱艺华,胡红红,姚唯建. 腐蚀性硫导致变压器故障的综合分析及处理[J]. 变压器,2008,45(1):28-30.

QIAN Yihua, HU Honghong, YAO Weijian. Analysis and treatment of transformer fault caused by corrosivesulfu [J]. Transformer, 2008, 45(1): 28-30.

[4] 任双赞,曹晓珑,钟力生. 变压器油中腐蚀性硫对铜导线及油浸绝缘纸特性影响[J]. 电工技术学报,2011,26(10):129-135.

REN Shuangzan, CAO Xiaolong, ZHONG Lisheng. Influence of corrosive sulfur in transformer oil on the copper wire and oil immersed insulation paper [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 129-135.

[5] 杨波,田松柏,赵杉林. 不同形态硫化物腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2004,16(6):385-388.

YANG bo, TIAN Songbai, ZHAO Shanlin. Study of corrosivity of different sulfur compounds of crude oil [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(6): 385-388.

[6] ATANASOVA-HÖHLEIN I. Corrosive sulfur in transformer insulation [C] // Diagnostic Conference, Siofok, Hungary, 2009.

[7] AMIMOTO T, HOSOKAWA N, NAGAO E, et al. Concentration dependence of corrosive sulfur on copper-sulfide deposition on insulating paper used for power transformer insulation [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2009, 16(5): 1489-1495.

[8] AMIMOTO T, NAGAO E, TANIMURA J, et al. Duration and mechanism for suppressive effect of triazole-based passivators on copper-sulfide deposition on insulating paper [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2009, 16(1): 257-264.

[9] KAWARAI H, FUJITA Y, TANIMURA J, et al. Development of quantitative evaluation of copper sulfide deposition on insulating paper [C] // Proceedings of the Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008 CEIDP 2008 Annual Report Conference on, 2008.

[10] 甘强,吉亚民,陈轩. 一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):10-12.

GAN Qiang, JI Yamin, CHEN Xuan. Analysis of abnormal result of partial discharge test in a 220 kV transformer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(3): 10-12.

[11] 蔚超,陆云才,高晓军,等.  $\pm 800$  kV 特高压换流变压器现场局放试验关键技术研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(4):28-31.

WEI Chao, LU Yuncai, GAO Xiaojun, et al. Research on key technology of partial discharge testing for  $\pm 800$  kV UHVDC

- converter transformer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(4):28-31.
- [12] 蔚超, 刘阳. 无级调感技术在特高压变压器局放试验中的应用研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4):113-118.  
WEI Chao, LIU Yang. Partial discharge experiment of UHV transformer based on stepless adjustment technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4):113-118.
- [13] 孙雷, 周健, 张宇. 串联变压器现场局部放电试验[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6):65-69.  
SUN Lei, ZHOU Jian, ZHANG Yu. Discussion on site partial discharge test of series transformers[J]. Jiangsu Electrical En-

gineering, 2015, 34(6):65-69.

作者简介:



陆云才

陆云才(1982—),男,高级工程师,硕士研究生,从事高电压技术研究及设备状态评价工作(E-mail:sixhair@163.com);

张将(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断(E-mail:2544723715@qq.com);

蔚超(1984—),男,高级工程师,从事变压器状态评价及诊断技术研究工作。

## Influence of Corrosive Sulfide on Partial Discharge Characteristics of Insulation Winding

LU Yucan<sup>1</sup>, ZHANG Jiang<sup>2</sup>, WEI Chao<sup>1</sup>, LIAO Caibo<sup>1</sup>, YANG Lijun<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China ;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Sulfur corrosion is widespread in transformer oil. The generation of corrosive sulfide can affect the performance of insulation winding and cause equipment failure. In this paper, the influence of corrosive sulfide in transformer oil on the partial discharge characteristics of insulation winding is studied. Through partial discharge test of insulation winding samples with different corrosion conditions, the influence of the corrosive sulfide deposition on the partial discharge characteristics of winding is obtained. The results show that the deposition of corrosive sulfide reduces the initial discharge voltage of the insulation winding, which makes the insulation winding easy to discharge, and the discharge density and discharge repetition rate are proportional to the deposition of corrosive sulfide.

**Key words:** corrosive sulfide; benzyl disulfide; insulated winding; partial discharge

(编辑 方晶)