

基于多特征指标综合评价的变压器油硫腐蚀程度定量表征方法

舒 想^{1,2}, 杨 贤^{1,2}, 周 丹^{1,2}, 丛浩熹³, 李庆民³

- (1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;
2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广东 广州 510080;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:近十几年来,由变压器油中的腐蚀性硫导致的变压器故障时有发生,因此研究定量表征变压器油硫腐蚀程度的方法,预防变压器故障的发生具有重要意义。在实验室环境下模拟了含不同腐蚀性硫的变压器油纸绝缘系统的老化过程,研究了腐蚀性硫对铜片、绝缘纸聚合度以及绝缘油介损的影响。研究表明:腐蚀性硫不仅会腐蚀铜片,还会在老化过程中加速绝缘纸的降解,增加绝缘油的介损。二苳基二硫对铜片腐蚀严重,硫醇对铜片腐蚀较轻但对绝缘油介损影响更大,因此单纯考虑对铜片的影响来判断变压器油硫腐蚀程度不够准确。在老化实验的基础上,根据变压器运行的相关标准,分别确定了表征变压器油硫腐蚀对铜、绝缘纸以及绝缘油影响的参量的计算方法。再结合德尔菲法确定的权重,建立了一个综合定量表征变压器油硫腐蚀程度的方法。相比于现有的方法,此方法更为全面,对于一些非二苳基二硫造成的硫腐蚀也能正确判别,对于预防硫腐蚀故障的发生具有重要意义。在实际工程中,可采用此方法定期取油测试变压器油硫腐蚀程度,当硫腐蚀程度较高时需引起关注,及时处理避免硫腐蚀导致的变压器故障的发生。

关键词:电力变压器;腐蚀性硫;德尔菲法;定量表征

DOI: 10.12067/ATEEE2002001

文章编号: 1003-3076(2020)09-0006-07

中图分类号: TM85

1 引言

电力变压器承担着电能转换的功能,在电力行业拥有举足轻重的地位。变压器的故障可能会导致负荷的损失以及设备的损坏,危及电网的安全。因此预防变压器故障的发生,保障电网的安全运行具有重要意义^[1,2]。变压器油作为油浸式变压器的绝缘介质,在变压器内起到绝缘和散热的作用^[3]。近十几年来,国内外均有报道由变压器油中腐蚀性硫所导致的变压器故障,引起了学者们的广泛关注。

腐蚀性硫对变压器油纸绝缘系统的影响可以总结为以下两个方面。一方面是腐蚀铜绕组,腐蚀产物沉积在铜绕组以及绝缘纸的表面,降低油纸绝缘系统的电气性能。现有腐蚀机理主要包括二苳基二

硫(Dibenzyl Disulfide, DBDS)腐蚀机理^[4]以及硫醇-硫化亚铜腐蚀机理。其中,硫醇-硫化亚铜腐蚀机理的反应过程中还伴随着水分的生成。另一方面是影响变压器油纸绝缘系统的热老化特性。华北电力大学的李庆民团队研究表明腐蚀性硫会促进油纸绝缘系统的热老化过程,降低变压器的绝缘寿命,主要包括加速绝缘纸聚合度的裂解、增加绝缘油的酸值和介损等。这种促进作用会随着腐蚀性硫的种类和浓度不同而有所不同^[5-7]。也就是说可能会存在某些腐蚀性硫对铜绕组的腐蚀能力较弱,但对绝缘纸和绝缘油的影响较大的情况。因此,将腐蚀性硫对铜绕组的腐蚀作为其腐蚀性的唯一判据不够准确,要准确评估变压器油硫腐蚀程度,需要综合考虑其对变压器油、绝缘纸、铜绕组的影响。

收稿日期: 2020-01-22

基金项目: 中国南方电网科技项目(GDKJXM20172901)、国家自然科学基金项目(51807061)

作者简介: 舒 想(1994-),男,苗族,湖南籍,助理工程师,硕士,研究方向为高电压与绝缘技术;

丛浩熹(1989-),男,山东籍,副教授,硕士生导师,研究方向为高压开关状态监测与故障诊断。

目前国内外评估变压器油中硫腐蚀程度的方法包括定性分析和定量分析两种。定性分析主要是参照标准 ASTM D 1275B 以及 DL/T 285—2012,都是采用 150 ℃ 的老化温度进行试验,试验后与比色卡进行比色来判断硫腐蚀程度,区别是前者采用裸铜而后者采用纸包铜。该方法只能进行定性分析,容易受到主观因素的影响,无法准确地评估变压器油硫腐蚀程度。任双赞、欧阳旭东等人^[8,9]提出了使用气相色谱仪对变压器油中的 DBDS 含量进行测试,采用 DBDS 的含量来定量表征变压器油硫腐蚀程度。万涛等人进一步提出了采用乙腈作为萃取剂能够实现更加准确的测试^[10]。上述研究均以 DBDS 的含量来表征变压器油硫腐蚀程度,但 DBDS 虽作为油中的主要腐蚀性硫但并非唯一,例如硫醇-硫化亚铜腐蚀机理表明变压器油中的硫醇、硫醚也具有腐蚀性,除此之外还需要考虑不同硫化物之间的相互转换^[11]。在实际工程中也出现过发生硫腐蚀故障的变压器油中检测不到 DBDS 的情况。因此,将 DBDS 的含量作为定量表征变压器油硫腐蚀程度的判据不够准确。此外,国内外学者还尝试使用测试硫化亚铜(Cu₂S)附着量与 Cu²⁺ 浓度^[12]、总硫浓度^[13]、铜失重^[14]等方法来实现变压器油硫腐蚀程度的定量表征,但均未同时考虑腐蚀性硫对变压器油、绝缘纸以及铜绕组的影响。

本文选取了二苄基二硫(Dibenzyl disulfide, DBDS)以及十二硫醇(Dodecyl mercaptan, DDM)两类具有代表性的硫化物,参照 IEEE 相关老化实验标准,在 150 ℃ 的温度下进行老化实验。研究了不同种类腐蚀性硫对铜片质量、绝缘纸聚合度以及绝缘油介质损耗因数的影响,再结合德尔菲法得到了基于多特征指标综合定量表征变压器油硫腐蚀程度的方法。该方法同时考虑腐蚀性硫对变压器油、绝缘纸以及铜绕组的影响,对于一些非 DBDS 造成的硫腐蚀也能正确判别,准确度更高,对于预防硫腐蚀故障的发生具有重要意义。

2 腐蚀性硫对铜片质量、绝缘纸聚合度、绝缘油介质损耗因数的影响

2.1 实验设计

主要试验材料如表 1 所示。

本实验采用 150 ml 的三角烧瓶作为容器,三角烧瓶中装有 150 ml 变压器油、8 g 绝缘纸以及 4 片变压器绕组铜片。其中每个铜片外层包裹 2 g 绝缘

表 1 主要试验材料
Tab.1 Main test material

名称	备注
绝缘绕组	铜扁线
牛皮绝缘纸	尺寸为 30 mm×11 mm×1 mm
变压器油	昆仑#25
二苄基二硫醚	分子式为 C ₁₄ H ₁₄ S ₂
十二硫醇	分子式为 C ₁₂ H ₂₆ S

纸,用细铜丝捆绑固定,制备得到纸包铜试样。在不同三角烧瓶中加入不同硫化物,添加浓度如表 2 所示,A 组为 DBDS 组,B 组为 DDM 组,C 组为空白对照组。由于 DBDS 为二硫化物,相同物质的量的 DBDS 的硫含量为 DDM 的 2 倍,因此为保证不同组制备油样中总硫含量相同,DDM 添加量为 DBDS 的 2 倍。

表 2 各组制备油样中硫化物浓度
Tab.2 Sulfide concentration of each oil sample

硫化物	各组制备油样中硫化物浓度/(mmol·L ⁻¹)						
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C
DBDS	0.5	1	1.5				
DDM				1	2	3	

按表 2 制备得到含有不同浓度单一硫成分的变压器油试样,按照图 1 所示流程进行预处理及老化试验。

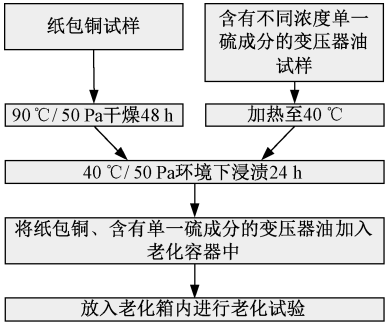


图 1 试验过程
Fig.1 Process of experiment

由于腐蚀性硫对变压器的腐蚀是一个逐渐发展的过程,当腐蚀程度过低时,检测效果可能不太理想,无法准确表征变压器的油硫腐蚀程度。研究表明,温度对变压器绝缘性能的影响包括直接作用^[15]和间接作用^[16],间接作用包括对变压器油中的硫腐蚀起到促进作用,温度越高促进作用越明显。当老化温度过低时所需试验周期较长,不利于工程上的应用。选用 150 ℃ 的老化温度,老化时间为 5 天即

可看到较为明显的试验效果。因此选用 150 ℃ 作为试验的老化温度,试验周期为 5 天。

2.2 铜片表面颜色与铜片失重质量

老化实验完成后,根据 IEC62535—2008 标准方法,将铜片表面颜色与标准比色卡(如图 2 所示)进行对比,判断铜片腐蚀程度。铜片表面颜色如表 3 所示,A、B 两组铜片表面腐蚀程度均随着腐蚀性硫浓度的增加而增强。相比于 B 组而言,A 组对铜片的腐蚀更为严重,说明 DBDS 对铜片的腐蚀要强于 DDM。

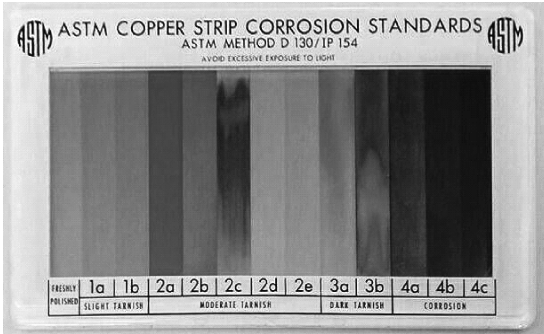


图 2 ASTM 铜片腐蚀标准比色卡

Fig.2 ASTM copper sheet corrosion standard colorimetric card

表 3 铜片表面颜色变化情况

Tab.3 Color of copper sheet surface

分组	铜片表面颜色		
	A	B	C
1			
2			
3			

将铜片放入稀硝酸中进行清洗,去除铜片表面附着的氧化铜以及铜的硫化物^[14],清洗完成后的

铜片采用高精度天平称重,计算铜片失重质量。本次试验得到的铜片失重质量如表 4 所示,其中初始质量 M_0 为老化试验前铜片的质量,最终质量 M_1 为老化试验完成经稀硝酸清洗以后铜片的质量,由式 (1) 可以得到失重质量 M 。

$$M = M_1 - M_0 \tag{1}$$

由于 C 组绝缘油不含腐蚀性硫,其铜片失重质量 M_c 为参与氧化反应的铜片质量。其他组铜片的失重质量 M 减去 C 组铜片失重质量 M_c 即可得到参与硫腐蚀反应的铜片质量 M_s 。即:

$$M_s = M - M_c \tag{2}$$

表 4 添加不同硫化物的绝缘油中铜片失重质量

Tab.4 Mass loss of copper sheets in insulating oil with different sulphides

绝缘油样	初始质量 M_0/mg	最终质量 M_1/mg	失重质量 M/mg	硫腐蚀反应失重质量 M_s/mg
A1	4 253.1	4 249.4	3.7	3.1
A2	4 217.7	4 213.3	4.4	3.8
A3	4 235.8	4 230.3	5.5	4.9
B1	4 281.4	4 280.5	0.9	0.3
B2	4 205.3	4 204.2	1.1	0.5
B3	4 234.8	4 232.9	1.9	1.3
C	4 293.1	4 292.5	0.6	0

与表 3 得出的结论一致,DBDS 对铜片腐蚀严重,DBDS 浓度越高,铜片失重质量越大,腐蚀越严重。由于在实际运行中,变压器油中 DBDS 的浓度很难达到 1.5 mmol/L,因此取 $M_{\text{max}} = 4.9 \text{ mg}$,由式 (3) 来计算变压器油中腐蚀性硫对铜的影响。

$$X_{\text{Cu}} = \frac{M_s}{M_{\text{max}}} \tag{3}$$

式中, M_s 为待测油样硫腐蚀反应失重质量; M_{max} 表示含 1.5 mmol/L DBDS 的变压器油样中的硫腐蚀反应失重质量,根据实验可知其值为 4.9 mg; X_{Cu} 表示变压器油中腐蚀性硫对铜的影响程度为,变压器油对铜的硫腐蚀程度越高,则 X_{Cu} 越大。若 $X_{\text{Cu}} < 0$,令 $X_{\text{Cu}} = 0$; $X_{\text{Cu}} > 1$,令 $X_{\text{Cu}} = 1$ 。

由于 DDM 对铜片腐蚀较轻,尤其当 DDM 浓度较低时,说明铜失重对硫醇造成的腐蚀检测效果不佳,需要结合其他参量来综合表征变压器油硫腐蚀程度。

2.3 绝缘纸聚合度

绝缘纸聚合度(简称 DP)能有效表征变压器的老化程度^[17]。老化实验完成后,对各组 DP 进行测试,测试结果如图 3 所示。各组试样的绝缘纸聚合

度有所下降,其中含有腐蚀性硫的油样中,绝缘纸聚合度下降更多。说明腐蚀性硫会对绝缘纸中纤维素的降解起促进作用。将 A 组和 B 组进行比较,DDM 对绝缘纸纤维素降解的促进作用略强于 DBDS。

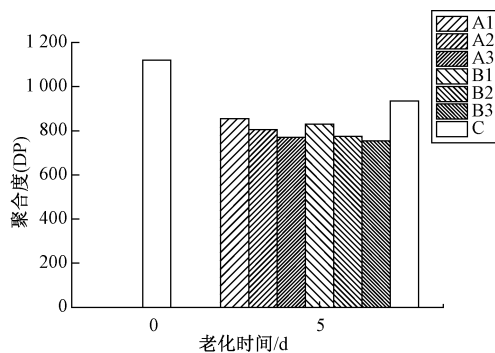


图3 绝缘纸聚合度测试结果

Fig.3 Polymerization degree test result of insulating paper

根据 DL/T 984—2005 油浸式变压器绝缘老化判断准则给出的判据,当 DP 低于 150 时变压器需退出运行。因此取 $D_{\min} = 150$ 。根据式(4)计算变压器油中腐蚀性硫对绝缘纸聚合度的影响。

$$X_D = \frac{D_0 - (D - D_C)}{D_0 - D_{\min}} \quad (4)$$

式中, D_0 表示老化前绝缘纸的聚合度; D 表示老化后待测变压器油样绝缘纸聚合度; D_C 表示老化后空白对照组油样(在该实验中为 C 组)绝缘纸聚合度; $D - D_C$ 表示硫腐蚀引起的绝缘纸聚合度下降值; D_{\min} 表示绝缘纸寿命终点聚合度的值; X_D 表征变压器油中腐蚀性硫对绝缘纸聚合度的影响程度, X_D 越大说明变压器油对绝缘纸硫腐蚀程度越高。

2.4 绝缘油介质损耗因数

绝缘油介质损耗因数是判断绝缘油劣化的有效指标^[18]。对老化前后绝缘油介损进行测试,结果如图 4 所示。在老化过程中,腐蚀性硫会增加绝缘油的介损,且介损随着腐蚀性硫的浓度增加而增加,因此绝缘油介损能在一定程度上反应绝缘油中腐蚀性硫的浓度。DBDS 对介损影响较小,即绝缘油介损对 DBDS 的检测灵敏度较低。DDM 的存在会导致绝缘油介损大幅度上升,这是由于硫醇与铜的反应过程中有水分生成,水分会影响变压器油纸绝缘系统的老化。因此引入绝缘油介损也弥补了采用铜失重表征变压器油硫腐蚀程度灵敏度不高的不足。

GB/T 7595—2008《运行中变压器油质量指标》中规定介质损耗因数 ≤ 0.04 (针对 330 kV 及以下电压等级的变压器)。因此取 $T_{\max} = 0.04$ 。根据式(5)

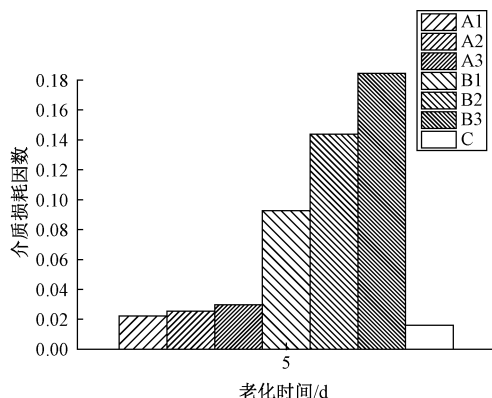


图4 老化实验后绝缘油介质损耗因数

Fig.4 tanδ of insulating oil after aging test

计算变压器油中腐蚀性硫对绝缘油介损的影响。

$$X_T = \frac{T_{\max} - (T - T_C)}{T_{\max} - T_0} \quad (5)$$

式中, T_0 表示老化前绝缘油的介损; T 表示老化后待测变压器油样的介损; T_C 表示老化后空白对照组油样(在该实验中为 C 组)的介损; $T - T_C$ 表示硫腐蚀引起的绝缘油介损增大值; T_{\max} 表示规程中允许的介损最大值; X_T 表征变压器油中腐蚀性硫对绝缘油介损的影响程度, X_T 越大说明变压器油对绝缘油硫腐蚀程度越高。若 $X_T < 0$, 令 $X_T = 0$; $X_T > 1$, 令 $X_T = 1$ 。

3 基于多特征指标综合定量表征变压器油硫腐蚀程度的方法

3.1 多特征指标的选择

在变压器的油纸绝缘系统中,铜绕组、绝缘纸和绝缘油作为一个统一整体,共同影响变压器的安全运行。研究表明,绝缘油中的腐蚀性硫会腐蚀铜绕组,其腐蚀产物附着在铜绕组和绝缘纸表面,影响变压器的电气性能;腐蚀性硫还会加速绝缘纸纤维素的降解,导致绝缘纸聚合度下降,当聚合度下降到一定程度,变压器将无法运行;腐蚀性硫还会导致老化过程中绝缘油介损的上升,危及变压器的绝缘。

由上述实验可知,DBDS 对变压器铜绕组腐蚀严重,硫醇对变压器油腐蚀严重,且两者都会加速绝缘纸的降解。因此选择铜失重、绝缘纸聚合度以及绝缘油介损三个指标来综合表征变压器油硫腐蚀程度。

3.2 德尔菲法确定权重

德尔菲法、D-S 评价法等方法常用于多特征指标综合评价。德尔菲法在决策过程中通过征求和总结多方专家的建议来做出最终决策,相比于 D-S 评

价法,消除了专家之间的相互影响,也避免了盲从和权威效应所导致决策面过窄的问题。此外,决策过后返回专家意见以及补充资料进行再决策的方式,让决策者能通过借鉴其他专家见解达到启发和拓展自己思路的目的,使得决策更加准确。因此本文选择德尔菲法来确定权重^[19-21]。

为确定不同指标的权重,选择 10 位从事变压器油硫腐蚀研究以及变压器老化评估工作的学者以及具有丰富实践经验的工程师进行咨询。首先将待定权数的三个指标、指标选择的原因以及权重确定的规则发给专家。专家参照表 5 分别对不同指标进行打分,根据式(6)计算各指标平均分。

$$\overline{C_i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (C_a * C_b) * C_{ij} \tag{6}$$

式中, C_a 是专家熟悉程度的量化分数; C_b 是判断等级的量化分数; $C_a * C_b$ 代表了专家对于该项指标的权威程度; C_{ij} 是专家 j 对第 i 个指标评价等级的量化分数; $\overline{C_i}$ 代表了第 i 个指标的平均分。

表 5 评价因素量化表

Tab.5 Quantitative table of evaluation factors

评价等级	量化值	熟悉程度	量化值	判断依据	量化值
很重要	10	很熟悉	1.0	实践经验	0.8
重要	8	熟悉	0.8	理论分析	0.6
比较重要	6	比较熟悉	0.6	同行了解	0.4
一般重要	4	不太熟悉	0.4	直觉	0.2
不太重要	2	不熟悉	0.2		
不重要	0				

根据式(7)计算各项指标的变异系数,当变异系数大于 0.3 时将专家评分结果、理由以及相关补充资料返还给专家,进行下一轮评审,重新确定权数。

$$V_i = \frac{S_i}{\overline{C_i}} \tag{7}$$

式中, S_i 代表第 i 个指标评分的标准差; $\overline{C_i}$ 代表第 i 个指标的平均评分; V_i 代表第 i 个指标的变异系数。

经过两轮咨询,专家意见基本达成一致,专家咨询结果如表 6 所示。

表 6 专家咨询结果

Tab.6 Experts consultation results

指标	平均分	标准差	变异系数
铜失重	6.07	1.44	0.24
绝缘纸聚合度	3.24	0.83	0.25
绝缘油介损	4.84	1.01	0.21

依据各项指标平均得分所占总分的百分比数,进行归一化处理,得到各指标的权重。铜失重、绝缘纸聚合度、绝缘油介损的权重系数分别为 0.43、0.23、0.34。

3.3 多指标综合评估方法

基于多特征指标综合评估变压器油硫腐蚀程度的方法总结如下:

(1)依据文中所述实验方法,选取待测油样以及空白油样(不含腐蚀性硫)开展为期 5 天的老化实验。

(2)老化前后分别测量两组试样铜片的质量、绝缘纸聚合度以及绝缘油介损。根据式(3)~式(5)分别计算表征变压器油硫腐蚀对铜影响的参量 X_{Cu} 、表征变压器油硫腐蚀对绝缘纸影响的参量 X_D 以及表征变压器油硫腐蚀对绝缘油影响的参量 X_T 。

(3)根据德尔菲法确定的权重,将以上三个参量做加权平均求和得到关于变压器油硫腐蚀程度的综合算式:

$$X = w_1 X_{Cu} + w_2 X_D + w_3 X_T \tag{8}$$

式中,权重系数 w_1 、 w_2 、 w_3 分别为 0.43、0.23、0.34。 X 反应了变压器油硫腐蚀对铜绕组、绝缘纸以及绝缘油的影响,其值越大则腐蚀越严重,实现了对变压器油硫腐蚀程度的综合定量评估。

4 结论

(1)变压器油纸绝缘系统中,油、纸、铜作为一个统一整体,均会影响变压器的安全运行。本文在实验室环境下模拟了含不同腐蚀性硫的变压器油纸绝缘系统的老化过程,研究了腐蚀性硫对铜片、绝缘纸聚合度以及绝缘油介损的影响。结果表明,DBDS 对铜片腐蚀严重,硫醇对铜片腐蚀较轻但对绝缘油介损影响更大,因此单纯考虑腐蚀性硫对铜片的影响来判断变压器油硫腐蚀程度不够准确。

(2)在老化实验的基础上,根据变压器运行的相关标准,分别确定了表征变压器油硫腐蚀对铜、绝缘纸以及绝缘油影响的参量的计算方法。再结合德尔菲法确定的权重,建立了一个基于多特征指标综合评价的变压器油硫腐蚀程度定量表征方法。相比于现有的方法,此方法更为全面,对于一些非 DBDS 造成的硫腐蚀也能正确判别,对于预防硫腐蚀故障的发生具有重要意义。

(3)在实际工程中,可采用本文所提方法定期取油测试变压器油硫腐蚀程度,当测出硫腐蚀程度较高时,说明油中的腐蚀性硫可能在运行过程中对变压器油纸绝缘系统造成较为严重的影响,危及变压器的安全运行。此时需引起关注,及时处理避免硫腐蚀导致的变压器故障发生。

参考文献 (References):

- [1] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等 (Liao Ruijin, Yang Lijun, Zheng Hanbo, et al.). 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述 (Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 1-12.
- [2] 王梦云 (Wang Mengyun). 110kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析 (Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 kV and above) [J]. 供用电 (Distribution & Utilization), 2007, 24 (1): 1-5.
- [3] 粟茂, 李春茂, 夏国强, 等 (Su Mao, Li Chunmao, Xia Guoqiang, et al.). 不同油流速度下油纸绝缘的局部放电特性研究 (Study on partial discharge characteristics of oil paper insulation at different oil flow velocities) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 47-55.
- [4] 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]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16 (1): 257-264.
- [5] 连鸿松, 李方青, 丛浩熹, 等 (Lian Hongsong, Li Fangqing, Cong Haoxi, et al.). 基于 GC-SCD 的变压器油中多重硫化物分析及硫醇腐蚀反应实验研究 (Analysis of multiple sulfides in transformer oil and experimental study on mercaptan corrosion mechanism based on gas chromatography-sulfur chemiluminescence detection) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (8): 2565-2572.
- [6] 李庆民, 舒想, 李方青, 等 (Li Qingmin, Shu Xiang, Li Fangqing, et al.). 多重硫腐蚀对变压器油纸绝缘热老化特性的影响 (Effects of multiple sulfur corrosion on transformer oil-paper insulation thermal aging properties) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (2): 470-477.
- [7] 丛浩熹, 张敏昊, 舒想, 等 (Cong Haoxi, Zhang Minhao, Shu Xiang, et al.). 腐蚀性硫化物对绝缘纸理化特性的微观影响机制研究 (Study on the microscopic mechanism of corrosive sulfide on physical and chemical properties of the insulating paper) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (19): 5878-5886.
- [8] 任双赞, 钟力生, 于钦学, 等 (Ren Shuangzan, Zhong Lisheng, Yu Qinxue, et al.). 变压器油中腐蚀性硫的检测标准及测试方法研究 (Research on the standard test and measuring method for corrosive sulfur in transformer oils) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2011, 47 (7): 40-43.
- [9] 欧阳旭东, 曾淑芳, 曹顺安, 等 (Ouyang Xudong, Zeng Shufang, Cao Shunan, et al.). 气相色谱法测定绝缘油中腐蚀性硫和抗氧化剂的方法研究 (Research on gas chromatography method measuring corrosive sulfur and antioxidant in insulating oil) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2015, 28 (10): 111-114.
- [10] 万涛, 黄颖, 周挺, 等 (Wan Tao, Huang Ying, Zhou Ting, et al.). 溶剂萃取法检测绝缘油二苄基二硫醚含量研究 (Research on extraction method of measuring corrosive sulfur dibenzyl disulfide in insulating oil) [J]. 湖南电力 (Hunan Electric Power), 2019, 39 (3): 5-8.
- [11] 周勇 (Zhou Yong). 腐蚀性硫对油纸绝缘系统的劣化作用机理及定量表征 (The degradation mechanism of corrosive sulfur on oil-paper insulation and quantitative characterization of sulfur corrosion reaction) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric University), 2016.
- [12] 万涛, 钱晖, 冯兵, 等 (Wan Tao, Qian Hui, Feng Bing, et al.). 利用铜离子质量分数监测变压器中硫腐蚀状态的研究 (Condition monitoring of corrosive sulfur reaction in transformer by copper ion analysis) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (5): 1128-1134.
- [13] Tumiatti V, Roggero C, Tumiatti M, et al. IEC 62697-2012: State of the art methods for quantification of DBDS and other corrosive sulfur compounds in unused and used insulating liquids [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19 (5): 1633-1641.
- [14] 舒想, 李庆民, 丛浩熹, 等 (Shu Xiang, Li Qingmin, Cong Haoxi, et al.). 基于铜失重的变压器油硫腐蚀程度定量表征方法 (Quantitative characterization method of sulfur corrosion in transformer oil based on copper loss measurement) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2019, 52 (5): 81-86.
- [15] 周远翔, 黄欣, 黄猛, 等 (Zhou Yuanxiang, Huang Xin, Huang Meng, et al.). 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响 (Influence of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation) [J]. 电工电

- 能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 4-11.
- [16] 丛浩熹, 李方青, 舒想, 等 (Cong Haoxi, Li Fangqing, Shu Xiang, et al.). 氧气含量与温升效应对多重硫化物腐蚀性的影响机理研究 (Study on the influencing mechanism of oxygen concentration and temperature rise with multiple sulphides) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (17): 5286-5294.
- [17] 曹建军, 隋彬, 杨飞豹, 等 (Cao Jianjun, Sui Bin, Yang Feibao, et al.). 变压器油纸绝缘水分含量和老化程度定量评估研究 (Quantitative evaluation research on moisture content and aging state of transformer oil-paper insulation) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2018, 54 (1): 143-151.
- [18] 何冰 (He Bing). 关于绝缘油体积电阻率试验和介质损耗因数试验的分析 (Analysis of volume resistivity tests and dissipation factor tests for insulating oil) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2005, 18 (6): 28-31.
- [19] 连鸿松, 郑东升, 王兆东, 等 (Lian Hongsong, Zheng Dongsheng, Wang Zhaodong, et al.). 基于多特征指标综合评价的油纸绝缘热老化程度研究 (Investigation on thermal aging level of oil-paper insulation based on multi-characteristic parameters) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2018, 51 (3): 64-69.
- [20] 敖蕾蕾, 王慧芳, 张弛, 等 (Ao Leilei, Wang Huifang, Zhang Chi, et al.). 基于 D-S 证据理论的输变电设备状态检修多目标群决策 (Multi-objective and group decision-making research based on D-S evidence theory in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (6): 1627-1633.
- [21] 田军, 张朋柱 (Tian Jun, Zhang Pengzhu). 基于德尔菲法的专家意见集成模型研究 (The integrating model of expert's opinion based on Delphi method) [J]. 系统工程理论与实践 (Systems Engineering Theory & Practice), 2004, 24 (1): 57-69.

Comprehensive quantitative characterization of sulfur corrosion in transformer oil based on multi-characteristic parameters

SHU Xiang^{1,2}, YANG Xian^{1,2}, ZHOU Dan^{1,2}, CONG Hao-xi³, LI Qing-min³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Company Limited, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Guangzhou 510080, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the past ten years, transformer failures caused by corrosive sulfur in transformer oil have occurred from time to time, so it is of great significance to study methods to quantitatively characterize the sulfur corrosion of transformer oil to prevent the occurrence of transformer failure. In the laboratory environment, the aging process of transformer oil-paper insulation systems containing different corrosive sulfur was simulated. The effects of corrosive sulfur on the copper sheet, the degree of polymerization of the insulation paper, and the dielectric loss of the insulation oil were studied. The research results show that corrosive sulfur will not only corrode the copper sheet, but also accelerate the degradation of the insulating paper and increase the dielectric loss of the insulating oil during the aging process. DBDS corrodes the copper sheet seriously, thiol corrodes the copper sheet lightly but has a greater impact on the dielectric loss of the insulating oil, so it is not accurate enough to judge the degree of sulfur oil corrosion of the transformer by simply considering the effect on the copper sheet. On the basis of the aging experiment, according to the relevant standards for transformer operation, the calculation methods of the parameters that characterize the effect of sulfur corrosion of transformer oil on copper, insulating paper, and insulating oil were determined. Combined with the weight determined by Delphi method, a comprehensive quantitative characterization method of transformer oil sulfur corrosion degree was established. Compared with the existing methods, this method is more comprehensive, and it can correctly identify sulfur corrosion caused by some non-DBDS, which is of great significance to prevent the occurrence of sulfur corrosion faults. In engineering, oil can be taken to test the degree of sulfur corrosion by this methods regularly. When the degree of sulfur corrosion is high, attention must be paid to timely treatment to avoid transformer failure caused by sulfur corrosion.

Key words: power transformer; corrosive sulfur; Delphi method; quantitative characterization