

· 高电压技术 ·

金属钝化剂 BTA 对变压器硫腐蚀的抑制效果及绝缘油性能的影响研究

陆云才¹, 高思航², 蔚超¹, 丁咚³

(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. 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室(重庆邮电大学), 重庆 400065;

3. 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:油中的腐蚀性硫化物会侵蚀变压器绝缘绕组, 导致油纸绝缘性能下降, 给变压器的运行带来安全隐患, 工程上常通过加入金属钝化剂来抑制腐蚀性硫化物与铜离子的结合, 进而延缓硫腐蚀过程的发生。研究了油中常用金属钝化剂苯并三氮唑(BTA)对铜硫化物形成的抑制效果, 并研究了钝化剂在长期运行过程中对变压器绝缘油性能的影响。结果表明, 在含有腐蚀性硫的绝缘油中加入 BTA 可以有效缓解变压器硫腐蚀, 但高浓度的 BTA 会促使油中铜离子含量增加, 而油中铜离子能通过传递分解过氧化氢产生过氧化自由基, 加速油品劣化, 导致油纸绝缘老化加速。

关键词: 变压器; 绝缘油; 腐蚀性硫化物; 金属钝化剂; 苯并三氮唑

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0096-06

0 引言

在油浸式电力设备中, 矿物绝缘油起着绝缘和冷却散热的双重作用, 在长期运行过程中受到温度、电场、水分、氧气、机械振动等多种因素的影响而逐渐劣化, 容易引发绝缘故障^[1-5]。近年来, 由于矿物绝缘油中存在腐蚀性硫导致变压器、电抗器绝缘性能下降, 进而引发绝缘故障的现象已引起广泛关注^[6-8]。为了解决该问题, 国际大电网组织 CIGRE 分别于 2009 年与 2012 年发布了 A2-32、A2-40 研究报告, 专门分析讨论此类问题^[9-10]。研究人员对变压器、电抗器故障部位的绕组及绝缘纸表面的物质进行分析, 发现该物质为具有导电性的硫化亚铜(Cu₂S)。目前国内外学者在对油中腐蚀性硫的腐蚀机理、腐蚀性硫产物的沉积原理、腐蚀性硫产物对油纸绝缘性能的影响及相应的抑制措施等方面已开展一些试验研究, 并取得了一定的进展。

为了尽量避免矿物油中的腐蚀性硫在变压器长期运行过程中对油纸绝缘系统造成损害, 在工程应用中通常会采用以下几种方法: 更换绝缘油、严格验收投运前的新油、严格控制变压器运行条件、采用化学方法消除腐蚀性硫、在油中添加金属钝化剂^[10-12]。其中, 更换变压器油成本较高, 验收新油与严格控制变压器运行条件只能在一定程度上减缓腐蚀过程, 化学方法存在对部分变压器油无效的

问题, 而在绝缘油中添加金属钝化剂的方法则是被广泛采用的能抑制铜硫化物生成的有效方法^[13-18]。虽然有研究已经指出金属钝化剂可以有效抑制腐蚀, 但是关于在油中添加金属钝化剂的理想浓度还有待进一步研究, 而且在高温条件下金属钝化剂对铜硫化物生成的抑制以及绝缘油电气及理化性能的影响也有待进一步研究。

为此, 文中主要研究金属钝化剂对变压器硫腐蚀的抑制效果及绝缘油性能的影响, 在含有腐蚀性硫的新油中添加了不同含量的金属钝化剂苯并三氮唑(BTA), 同时将铜绕组加入到绝缘油中组成油纸绝缘样品, 在热老化条件下开展油硫腐蚀实验, 试验结束后对绕组的腐蚀程度与绝缘油的性能进行测试与分析。

1 油硫腐蚀试验

1.1 试验材料

试验采用新疆克拉玛依 25 号矿物油, 该油为非腐蚀性绝缘油。纸包铜绕组样品由重庆亚东亚变压器厂提供, 铜导线尺寸为 6 mm×2.04 mm(宽度×厚度), 其外有包裹着的两层厚度为 0.08 mm 的普通硫酸木浆盐绝缘纸。腐蚀性硫化物为二苄基二硫醚(DBDS), 分子式为 C₁₄H₁₄S₂。采用的金属钝化剂为苯并三氮唑(BTA, AR 98%)。

1.2 试验流程及测试项目

为探究金属钝化剂 BTA 对硫腐蚀的抑制效果及绝缘油性能的影响, 在实验室配置 DBDS 添加量

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1766217)

为 500 mg/kg 的绝缘油样品,并在油中分别添加 8 种不同浓度的 BTA (0 mg/kg, 0 mg/kg, 60 mg/kg, 100 mg/kg, 130 mg/kg, 160 mg/kg, 200 mg/kg, 300 mg/kg)。将纸包铜绕组放置在 90 °C/50 Pa 条件下干燥 24 h,之后将纸包铜绕组放入以上 5 组油样中,并在 60 °C/50 Pa 条件下浸渍 24 h,之后将以上 5 组油纸绝缘样品分别放入带磨口塞的广口瓶中,在广口瓶中充入氮气,并使用耐高温膜对广口瓶进行密封,将所有的样品放置在 130 °C 油浴中,开展 240 h 的油硫腐蚀试验。试验结束后取出油纸绝缘样品,观察铜绕组表面宏观形貌,对其表面元素含量进行定量分析,测试绝缘油的相关电气/理化特性参量。测试的项目如表 1 所示。

表 1 测试对象、项目及方法

测试对象	测试项目	测试仪器及方法
铜导体	形貌及腐蚀程度	目测及参比 ASTM D 130/TP 154 标准比色卡
	铜上硫含量	重量法
绝缘纸	宏观形貌	目测
	纸上铜含量	原子发射光谱仪(ICP 检测法)
绝缘油	铜离子含量	原子发射光谱仪(ICP 检测法)
	油中钝化剂含量	高效液相色谱仪

2 试验结果

2.1 铜绕组样品表面宏观形貌及分析

试验结束后,观察纸包铜绕组样品的外观形貌,如表 2 所示。将铜导体表面的颜色与图 1 所示 ASTM D 130/TP 154 腐蚀性硫检测标准比色卡进行对比,可以看出 BTA 添加量在 0 mg/kg 时,铜导体表面出现大量的深灰色沉积物,腐蚀程度达到 3b; BTA 添加量在 30~300 mg/kg 时,铜导体表面颜色逐渐变浅,其中 BTA 浓度为 30~60 mg/kg 时,铜导体依然会遭受腐蚀攻击,腐蚀程度为 2c;当 BTA 浓度达到 100 mg/kg 及以上时,铜导体表面基本没有腐蚀,并且随着 BTA 浓度的增加,腐蚀程度保持在 1b。发生油硫腐蚀的绕组内层绝缘纸上出现了灰黑色沉积物,并且沉积量随着油中 BTA 含量的增大而减少,其中当 BTA 浓度为 30 mg/kg 时,绕组最内层绝缘纸上基本没有腐蚀沉积。因此,对于添加了 BTA 的样品,铜导体与绝缘纸表面上的沉积物均减少了,腐蚀得到了有效缓解,并且随着 BTA 添加浓度的增大,抑制腐蚀的效果越来越好。

2.2 绕组腐蚀程度定量表征

采用扫描电镜 (SEM) 对铜导体与绝缘纸进行

表 2 BTA 抑制铜硫腐蚀的试验结果

Table 2 The appearance of insulation windings after the inhibition test with BTA

BTA 添加量 / (mg·kg ⁻¹)	铜导体	腐蚀程度	最内层绝缘纸
0		3b	
30		2c	
60		2c	
100		2b	
130		1b	
160		1b	
200		1b	
300		1b	

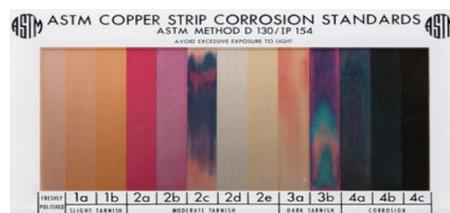


图 1 ASTM D 130/TP 154 标准比色卡

Fig.1 Colour chart used for ASTM D 130/TP corrosive test

微观形貌表征(选择 BTA 浓度 0 mg/kg, 30 mg/kg, 100 mg/kg, 200 mg/kg, 300 mg/kg 的样品),如图 2、图 3 所示。由图 2 可以看出 BTA 添加量在 0 mg/kg 时,铜导体表面出现大量腐蚀颗粒;BTA 添加量在 30~300 mg/kg 时,铜导体表面的腐蚀颗粒逐渐减少至无明显的腐蚀颗粒出现,并且 100 mg/kg BTA 添加量就可以有效缓解铜导体腐蚀。综上,随着油中 BTA 浓度的增加,铜导体的腐蚀程度逐渐降低,腐蚀颗粒逐渐减少。

由图 3 可看出 BTA 添加量在 0 mg/kg 时,绝缘纸纤维上出现大量的腐蚀颗粒,纤维断裂破坏,表面粗糙度增加;BTA 添加量在 30~300 mg/kg 时,铜导体表面的腐蚀颗粒逐渐减少至无明显的腐蚀颗粒出现,并且绝缘纸纤维表面逐渐光滑,排列紧凑。

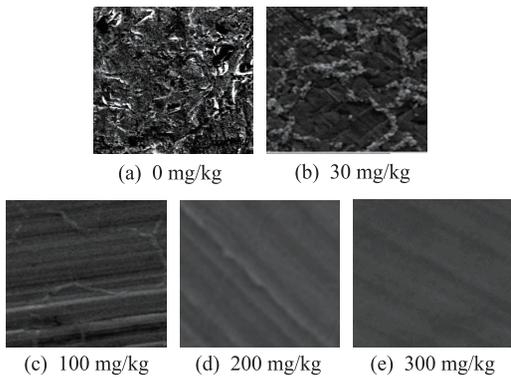


图2 油中不同 BTA 浓度下铜导体 SEM 微观形貌

Fig.2 SEM maps of copper conductor under different BTA concentration

综上所述,随着油中 BTA 浓度的增加,达到 300 mg/kg 时,绝缘纸纤维上几乎无腐蚀颗粒,表面纤维光滑。

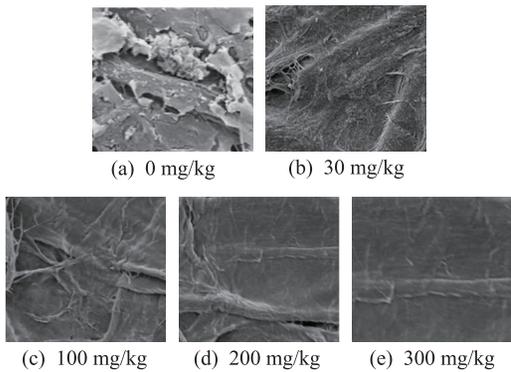


图3 油中不同 BTA 浓度下绝缘纸 SEM 微观形貌

Fig.3 SEM maps of insulating paper under different BTA concentration

采用 X 射线能谱分析仪 (EDX) 对绕组表面上的沉积物进行元素分析。表 3 为对铜导体与绝缘纸表面沉积物的能谱分析结果,可以看出铜导体与绝缘纸表面沉积物主要包含 Cu 元素与 S 元素,其中添加 BTA 后铜导体与绝缘纸表面的 S 含量均小于空白样,说明随着油中 BTA 含量的增加,铜导体与绝缘纸表面上的沉积物含量逐渐减少,且绝缘纸表面的 Cu 与 S 元素的原子百分比在 2~3.6 之间,再结合分离的沉积物的物相分析,以及大量文献的研究报道,可以确定硫腐蚀沉积物的主要成分为硫化亚铜 Cu_2S 。

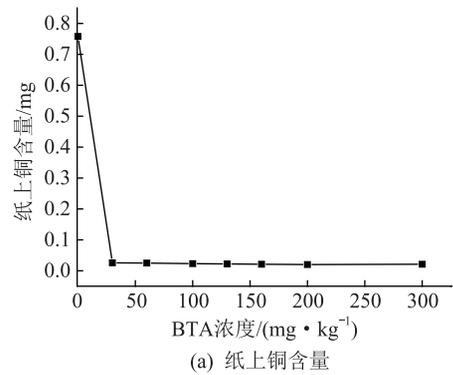
采用 ICP-AES 对绝缘纸上的铜含量进行定量测试,从图 4(a)可以看出,当油中加入 BTA 后,绝缘纸上的铜含量迅速下降,当加入 30 mg/kg BTA 时就可以有效缓解 Cu_2S 在绝缘纸上的沉积,随着添加量的进一步增加并没有明显变化。同时,采用重量法对铜导体上的硫含量进行定量测试,由图 4(b)测试结果可知,随着油中 BTA 含量的增加,铜导体上的硫含量逐渐减少,当添加量达到 30 mg/kg 时,就

表3 绕组纸的 EDX 能谱分析结果

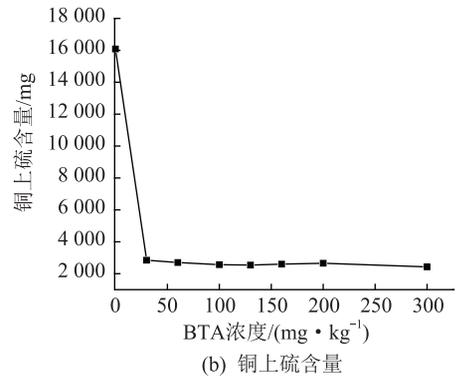
Table 3 EDX results of insulation winding

绕组元素	油中 BTA 含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
	0	30	60	100	130	160	200	300	
铜	Cu	94.87	96.58	97.01	97.31	97.24	97.49	97.79	97.47
	S	4.91	1.74	1.41	0.43	0.13	0.09	0.12	0.07
纸	Cu	3.93	1.41	1.29	0.18	0.07	0.06	0.07	0.04
	S	1.91	0.39	0.31	0.07	0.02	0	0	0

可显著降低铜上硫含量。说明添加 30 mg/kg 以上浓度的 BTA 就可以取得理想的抑制腐蚀效果。



(a) 纸上铜含量



(b) 铜上硫含量

图4 油中添加 BTA 后绕组腐蚀程度的定量表征

Fig.4 Quantitative characterization of insulation windings after adding BTA

2.3 绝缘油参量变化

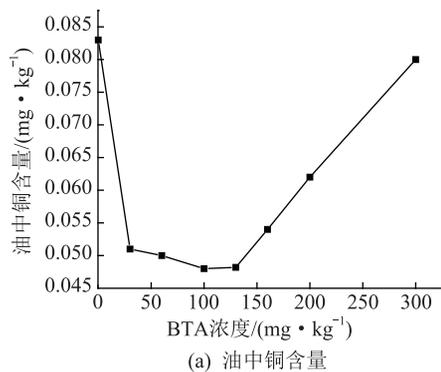
采用 ICP-AES 对绝缘油中的铜含量进行定量测试,从图 5(a)可以看出,与未添加 BTA 的样品相比,添加了 BTA 后绝缘油中的铜元素含量呈现先减小后增大的趋势。当油中 BTA 含量低于 100 mg/kg 时,油样中的铜元素含量迅速下降,其中 BTA 含量在 100~130 mg/kg 范围时,油样中的铜元素含量处于最低水平范围,BTA 含量高于 130 mg/kg 时,油样中的铜元素含量明显回升,其中 BTA 含量为 300 mg/kg 时,油样中的铜元素含量上升,相比无 BTA 的油样仅下降了约 0.05%。

根据图 5(b)一图 5(f)可知,当油中 BTA 含量低于 100 mg/kg 时,绝缘油的电气/理化性能逐渐改善,表现为工频介损降低,体积电阻率增加,击穿电

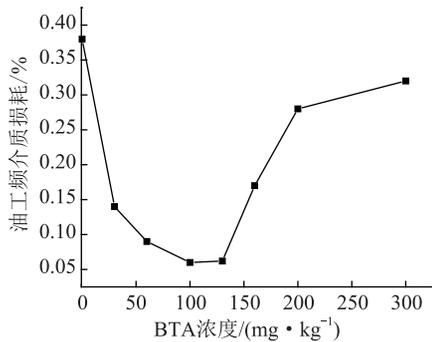
压增加,酸值含量降低,水分含量降低;当油中 BTA 含量在 100~130 mg/kg 范围时,油样的性能基本保持不变;当油中 BTA 含量高于 130 mg/kg,并逐渐增加时,绝缘油的电气/理化性能逐渐变差,具体表现为工频介损增加,体积电阻率降低,击穿电压降低,酸值含量增加,水分含量增加。可见,虽然油中加入 BTA 可以有效缓解硫腐蚀,但过多的 BTA 反而导致油中铜离子含量增加,加速油纸绝缘系统老化^[19]。采用高效液相色谱仪对绝缘油中的 BTA 含量进行定量测试,由图 5(g)可知,油中 BTA 添加量越多,其消耗量则越大。因此,油中 BTA 含量应该控制在一定的范围内,并非越多越好,过多 BTA 含量反而会造成油品的绝缘性能下降。

3 分析与讨论

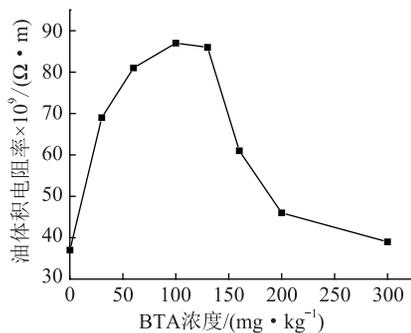
BTA 抑制硫腐蚀的机理是利用裸露的氮原子与铜原子配位连接在一起,同时每一个铜离子又可以通过配位作用与另一个 BTA 分子结合,从而形成



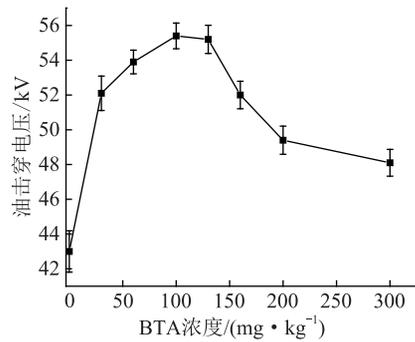
(a) 油中铜含量



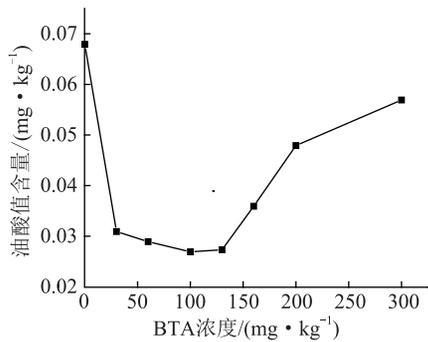
(b) 油工频介损变化情况



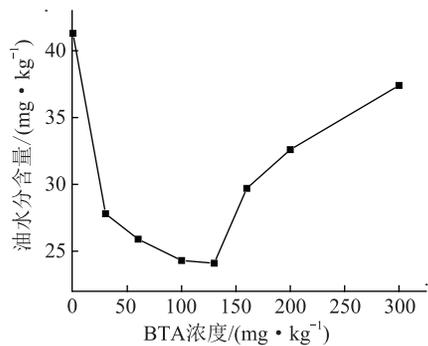
(c) 油体积电阻率变化情况



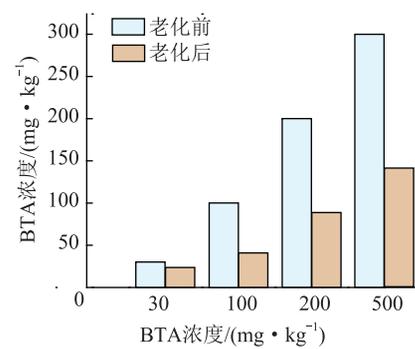
(d) 油击穿电压变化情况



(e) 油酸值含量



(f) 油水分



(g) 油中BTA含量

图 5 油中添加 BTA 后绝缘油的相关参数的变化
Fig.5 Properties of insulating oil after adding BTA

首尾相接的聚合物式的长链配合物分子 BTA-Cu, 大分子通过分子间作用力吸附在铜导体表面成膜, 该膜致密地覆盖在活性位点上, 钝化了金属表面, 以阻挡腐蚀性硫与铜导体的接触, 以及铜离子向绝缘油中的扩散, 从而抑制硫腐蚀, 反应机理如图 6 所示。

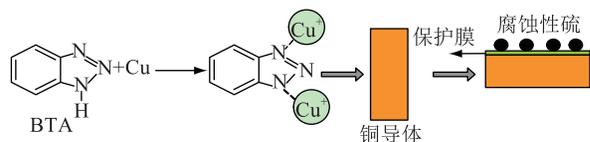
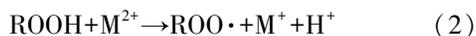
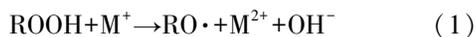


图6 苯并三氮唑抑制硫腐蚀的反应机理
Fig.6 Inhibition Mechanism of benzotriazole for sulfur corrosion

当低浓度的 BTA 与 Cu 结合,在铜导体表面形成的保护膜阻止了铜离子由铜导体表面向绝缘油中扩散,油中铜离子含量就会减小;当油中 BTA 浓度进一步提高,则 BTA 与 Cu 结合后形成的 BTA-Cu 复合物就有可能溶解在油中,导致油中铜离子含量的增大。而油中铜离子的增多又能通过传递分解过氧化氢产生过氧化自由基,从而促进绝缘油的氧化进程,导致油品的劣化^[20],该机理可用方程式(1)、(2)进行描述,其中 R 代表烷基过氧化氢, M 代表铜。



综上,过量的 BTA 加入到油中,使油中铜离子含量增多,而油中铜离子的增多加速绝缘油的劣化速率,导致油纸系统中产生更多的老化产物,包括酸类产物与水分,绝缘油的电气性能进一步下降,具体表现为油的工频介损上升,体积电阻率下降,击穿电压下降。因此,绝缘油中 BTA 的添加量需要控制在一定的范围内。根据试验结果,当 BTA 添加量在 100~130 mg/kg 范围时,既能提供防硫腐蚀的作用,也能在一定程度上提升油品性能。

4 结语

针对含有腐蚀性硫的绝缘油与绝缘绕组构成的油纸绝缘样品,加入不同浓度的金属钝化剂 BTA,在 130 °C 下开展油硫腐蚀试验,试验结束后对绕组的腐蚀程度以及绝缘油性能进行了研究,得到如下结论。

(1) 加入 BTA 可有效缓解腐蚀,其中 30 mg/kg 浓度的 BTA 就可以取得理想的抑制腐蚀效果。

(2) BTA 含量低于 100 mg/kg 时,绝缘油的酸值、水分含量、介损、电导率和铜离子含量均较不添加 BTA 的样品降低,击穿电压增高,绝缘油的性能得到了改善,当油中 BTA 含量在 100~130 mg/kg 范围时,油样的性能基本保持不变,但随着油中 BTA 含量超过 130 mg/kg,绝缘油的酸值、水分含量、介损、电导率和铜离子含量均较不添加 BTA 的样品增大,击穿电压降低,绝缘油性能逐渐变差。

(3) BTA 不能去除绝缘油中腐蚀性硫化物,只能延缓油硫腐蚀的发生,且绝缘油中 BTA 浓度并非越高越好,其添加量过大会导致油中铜离子含量增大,油品性能下降,进而加速油纸绝缘老化。针对文中的试验结果,建议油中 BTA 添加量为 100~130 mg/kg,该范围内的 BTA 既可以有效提升油纸绝缘的抗腐蚀性,也可以在一定程度上改善油品性能。

参考文献:

- [1] ROUSE T O. Mineral in insulating oil in transformer [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14(3): 6-16.
- [2] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electro technical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [3] 杨丽君,齐超亮,吕彦东,等. 变压器油纸绝缘状态的频域介电特征参量及评估方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 213-218.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LYU Yandong, et al. Characteristic parameters and assessment method of frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 213-218.
- [4] 廖瑞金,柳海滨,周年荣,等. 绝缘纸热老化对油浸绝缘纸空间电荷生成及迁移特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 206-214.
LIAO Ruijin, LIU Haibin, ZHOU Nianrong, et al. Influence of insulation paper's thermal aging on the formation and migration behavior of space charge in oil-paper insulation dielectrics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 206-214.
- [5] 高竣,王有元,齐超亮,等. 温度改变方式对应用频域介电谱法评估油纸绝缘状态的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 255-261.
GAO Jun, WANG Youyuan, QI Chaoliang, et al. Effect of temperature change mode on condition assessment of oil-paper insulation based on frequency-domain dielectric spectroscopy method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 255-261.
- [6] ROCHA A H. Faults in 500 kV shunt reactors caused by corrosive sulfur in the insulation oil [C]//Proceedings of the Sixty-eighth Annual International Conference of Doble Clients, Insulation Materials Session, Boston, 2001: 1-10.
- [7] 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.
- [8] 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 treat-

- ment of transformer faulty caused by corrosive sulfur [J]. Transformer, 2008, 45(1): 28-30.
- [9] GIGRE WG A2-32. Copper sulphide in transformer insulation, final report [R]. GIGRE WG A2-32, 2009.
- [10] 蒋良胜,施广宇. 变压器导线硫化腐蚀问题分析[J]. 福建电力与电工, 2006, 26(3): 7-8.
JIANG Liangsheng, SHI Guangyu. Research on sulfur corrosion problem of copper winding in transformer [J]. Fujian Electric power and Electrical Engineering, 2006, 26(3): 7-8.
- [11] 钱艺华,姚唯建,周永言. 变压器油中腐蚀性硫的分析研究[J]. 广东电力, 2007, 20(11): 38-40.
QIAN Yihua, YAO Weijian, ZHOU Yongyan. Research on corrosive sulfur in transformer oil [J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(11): 38-40.
- [12] 李睿,曹顺安,钱艺华,等. 变压器油中腐蚀性硫的研究现状[J]. 变压器, 2009, 46(2): 19-22.
LI Rui, CAO Shunan, QIAN Yihua, et al. Research on present situation of corrosive sulfur in transformer oil [J]. Transformer, 2009, 46(2): 19-22.
- [13] 陈丽华,张有序. 金属减活剂改善变压器油使用性能的探讨[J]. 石油学报(石油加工), 2003, 19(2): 62-69.
CHEN Lihua, ZHANG Youxu. The application of metal de-activators in transformer oil to improve its performance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 19(2): 62-69.
- [14] 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.
- [15] WAN T, QIAN H, ZHOU Z, et al. Suppressive mechanism of the passivator irgamet 39 on the corrosion of copper conductors in transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 454-459.
- [16] CAO P, YAO J, ZHENG J, et al. Comparative study of inhibitory effects of benzotriazole for metals in neutral solutions as observed with surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. Langmuir, 2002, 18(1): 100-104.
- [17] MARTINS M A G, GOMES A R. Experimental study of the role played by dibenzyl disulfide on insulating oil corrosivity-effect of passivator irgamet 39 [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(4): 27-32.
- [18] LUKIC J M, MILOSAVLJEVIC S B, ORLOVIC A M. Degradation of the insulating system of power transformers by copper sulfide deposition: influence of oil oxidation and presence of metal passivator [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(20): 9600-9608.
- [19] LIAO J, TANG C, YANG L J, et al. Influence of the copper ion on aging rate of oil-paper insulation in a power transformer [J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(5): 407-412.
- [20] 刘洋. 变压器油中腐蚀性硫化物生成与影响因素的分析及抑制方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LIU Yang. Research on the generation mechanism and influential factors of corrosive sulfide and corrosion inhibition techniques in oil-impregnated transformers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

作者简介:



陆云才

陆云才(1982),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术研究及设备状态评价研究工作;
高思航(1990),男,博士,讲师,研究方向为输变电设备智能监测与诊断(E-mail: gaosh@cqpt.edu.cn);

蔚超(1984),男,硕士,高级工程师,从事变压器状态评价及诊断技术研究工作。

Effect of metal passivating agent BTA on transformer sulfur corrosion inhibition and insulating oil performance

LU Yuncai¹, GAO Sihang², WEI Chao¹, DING Dong³

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

2. Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education (Chongqing University of posts and telecommunications), Chongqing 400065, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: Recently, several transformer failures happened due to the corrosive sulfur in insulation oil. Corrosive sulfur in oil can attack insulation winding, leading to the decrease of oil-paper insulation characteristic, the decrease of which brings potential safety hazard to the operation of transformer. Adding the metal passivator into the insulating oil is widely used to suppress the formation of copper sulfide in oil-immersed transformer, which can delay the combination between corrosive sulfur and copper ions. This paper deeply studies the suppression effect of metal passivator benzene (BTA) on the formation of copper sulfide, and the effect of BTA on the properties of insulating oil. The results show that high concentrations of benzotriazole (BTA) showed a good anti-corrosion effect when the oil contained different amounts of the metal deactivator. However, the content of copper ions dissolved in the oil would increase on the contrary. Therefore, the content of BTA added into the insulation oil should be controlled.

Keywords: transformer; insulating oil; corrosive sulfur; metal passivator; benzotriazole

(编辑 杨卫星)