

特高压换流变压器阀侧油浸表带触指 腐蚀特征与快速检测

黄志成^{1,2}, 刘凡^{1,2}, 胡仕红^{1,2}, 董仲明^{1,2}, 王燕^{1,2}, 程华润³, 徐赞³, 夏琅雨³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:特高压换流变压器阀侧油中表带触指作为实现绕组引出线与阀侧套管电气连接的关键部件,长期服役在高电压、大电流、高环温等严苛条件下,难以避免出现腐蚀、劣化等情况。以在役表带触指劣化故障实例为基础,通过扫描电子显微镜、能量色散光谱仪、X射线衍射仪等检测手段探究了表带触指表面腐蚀产物的微观形貌演变,分析了腐蚀层主要成分及含量,后经由显微切片与表面磨抛观测探究了其腐蚀产物的分布特征。研究表明:腐蚀产物大多数仅附着于表带触指表面,未向内侵蚀,推断腐蚀产物 Cu_2S 主要由油中Cu离子与腐蚀性硫化物结合沉积而来。最后,提出了一种基于机器学习结合激光诱导光谱信号的快速检测分析方法,实现了对触指4类不同腐蚀程度的有效识别,准确度可达到99.25%。

关键词:换流变压器; 表带触指; 腐蚀; 激光诱导击穿光谱

中图分类号:TM 721.1 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2025)01-0041-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250106

Corrosion Characteristics and Rapid Detection of Oil-immersed Contact Strips in Valve-side of UHV Converter Transformer

HUANG Zhicheng^{1,2}, LIU Fan^{1,2}, HU Shihong^{1,2}, DONG Zhongming^{1,2}, WANG Yan^{1,2},
CHENG Huarun³, XU Yun³, XIA Langyu³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract:The strap contacts in the oil of valve-side of UHV converter transformer serves as a key component to achieve the electrical connection between the winding lead-out line and the valve-side bushing. Operating under harsh conditions such as high voltage, large current, and high ambient temperatures in long-term service, it is difficult to avoid issues such as corrosion and degradation. Based on a case of degradation failure of strap contacts in the oil of valve-side of an in-service UHVDC converter transformer, the microscopic morphological evolution and the main components and content of corrosion products on the surface of strap contacts are investigated using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction, and other detection methods. At the same time, the distribution characteristics of corrosion products are investigated through the cross-section and surface polishing. The research results show that the majority of corrosion products adheres only to the surface of strap contacts, and it is inferred that the corrosion product Cu_2S is mainly deposited by the combination of Cu ions and corrosive sulfides in the oil. Finally, a rapid detection and analysis method based on machine learning algorithms combined with laser-induced spectroscopic signals is proposed, which achieves an effective identification of four different levels of corrosion on strap contacts, with an accuracy up to 99.25%.

Key words: converter transformer; strap contacts; corrosion; laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

0 引言

“十四五”规划期间,特高压直流输电技术被认为是解决远距离能源传输中能量损耗和电力稳定性等问题的关键技术,截止到 2023 年年底,中国正式投运的特高压直流输电工程已达 20 项^[1-2]。换流变压器作为特高压直流输电工程中的核心设备,承担了电能转换的核心任务,运行过程中承受着系统高电压和大电流的双重负担,经受长期的电、热、力联合作用,一旦出现故障可能导致严重的电力中断和损失^[3-5]。特高压换流变压器中表带触指是常用的电接触部件,凭借其结构简单、安装方便、触点众多以及导电能力强等优点广泛应用于特高压系统中^[6]。特高压换流变压器阀侧升高座是主体油箱的附加装置,用以安装套管,实现特高压换流变压器箱体内部电流的对外引出,其内主要有套管尾部插头、阀侧引出线插头、双端插套、多层纸板围屏等结构。而位于阀侧升高座内的表带触指是组成绕组引出线与阀侧套管电气连接的关键部分,其呈环状安装于套管尾部插头与绕组引出线插头,完成与双端插套的电气连接。升高座内整体结构浸泡于绝缘油中。表带触指结构上分为两部分,即不锈钢龙骨带与铜基镀银触指片,分别实现表带触指的弹性接触力与电气载流^[7-9]。

通常表带触指在设计上具备较大的理论载流量和设计裕度,实际运行中其寿命却远低于理论值^[10-11]。长期以来,表带触指在特高压系统中面临着缓慢的劣化,主要受到磨损和腐蚀联合作用的影响。由于特高压系统套管内部结构的复杂性,导杆插接结构缺少轴向约束,表带触指与导杆接触面会在套管热胀冷缩引起的周期性相对位移中遭受挤压和磨损,从而影响其电接触性能^[12-13]。表带触指电接触性能的下降最开始会导致系统发热问题的加剧,而高温引起表带触指的腐蚀,腐蚀又进一步导致电接触性能下降,形成了一个恶性循环。文献[14]对表带触指失效前后的表面和断面进行形貌分析和成分分析,提出表带触指在套管内的劣化机理,发现长期的机械磨损和 SF₆ 气体分解产物对触指的腐蚀是导致劣化的重要因素。文献[15]在对特高压直流穿墙套管支撑绝缘子闪络故障进行解剖分析时发现,套管内弹簧触指结构相对位移产生的细微金属

颗粒是故障发生的主要原因。文献[16]在弹簧触指结构电接触性能的研究进展中重点分析了触指的结构特点,以及插拔特性、磨损性能、接触电阻和接触温升等性能特征。

然而,当前的研究多集中于气氛环境条件下的电接触特性,而对于油中表带触指腐蚀特性及其检测方法尚有待开展。通过对油中表带触指腐蚀产物组成成分、分布形态、腐蚀过程等方面的研究,可以深入了解油中表带触指腐蚀行为的潜在机制,为进一步改善电接触元件的设计和使用提供基础。同时,了解腐蚀产物的形貌演变及其成分变化有助于评估表带触指的腐蚀状态,预测其剩余寿命,提高设备的可靠性。因此,对表带触指在特高压换流变压器阀侧油中的劣化腐蚀特性进行深入研究以及发展新的快速检测技术对腐蚀状态评估具有重要的理论和实际意义。

下面以某特高压换流站变压器阀侧油中劣化表带触指为研究对象,对现场劣化触指片腐蚀程度进行研究。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)等工具,测试油中表带触指表面腐蚀产物的团聚过程微观形貌演变、主要成分及含量。同时,结合腐蚀触指片的显微切片与表面磨抛观测,明确腐蚀产物的分布状态,并结合相关理论分析油中电接触系统腐蚀过程。同时,搭建了实验室模拟平台开展热老化试验。最后,搭建激光诱导光谱测试平台,结合机器学习方法实现了对触指 4 类不同腐蚀程度的有效识别。

1 表带触指腐蚀特征分析

1.1 腐蚀表带触指表面形态分析

某特高压换流站进行年度检查期间,发现多台双极高端换流变压器的阀侧绕组和套管电阻超标,均明显高于出厂值和上一年度的检测结果,被判定为不合格,严重威胁该直流输电工程的运行安全,为此针对该类故障换流变压器开展了为期数月的停运检修。期间对故障换流变压器阀侧升高座区域进行拆解,发现多个阀侧升高座内的电接触部件(即表带触指)存在明显腐蚀迹象,经回路检测以及拆解分步检测后比较分析,确认上述腐蚀后的表带触指

是此次特高压换流变压器阀侧直流电阻超标的主要原因。

图 1 为存在腐蚀迹象的现场拆解表带触指照片,从图中可以看出部分触指片出现不同程度的颜色变化,包括黄色、棕色、黑色等,同时部分触指片仍保持亮银色,触指片本身为镀银结构。

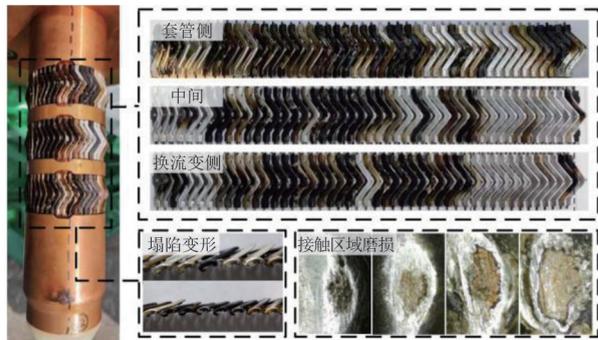


图 1 现场劣化表带触指表现劣化特征

在整条表带触指中,发黑触指片主要集中于表带触指中部,即环状安装结构的上半环区域,同时触指片的腐蚀变色特征与其他劣化特征也具有 consistency,通常发黑触指片的塌陷变形与接触区域磨损也更为严重。表带触指伴随腐蚀程度的加深,表面颜色也会按照银-黄-棕-黑的顺序逐渐加深,同时值得注意的是,部分腐蚀严重触指片可能出现了局部的镀银层剥离现象。参照油中铜片腐蚀标准比色卡^[17],将上述不同腐蚀形态的表带触指分为 4 类,如图 2 所示。



图 2 触指片 4 类腐蚀形态

1.2 腐蚀产物微观形貌演变

对图 2 中的 4 类触指片分别进行微观形貌扫描分析,结果如图 3 对应所示。图 3(a)可以看出表带触指初始状态的微观表面较为平滑,仅有少量划痕,其对应的宏观形态为亮银色。随着表带触指表面开始被腐蚀,腐蚀区域表面开始出现随机分布的苞状颗粒物,推断这些颗粒物为腐蚀产物团聚而成。图 3(b)所示苞状颗粒物直径大多在 1 μm 以内,触指表面变得粗糙,其外观形态表现为黄色。随腐蚀

程度进一步加深,如图 3(c)所示,腐蚀区域内苞状颗粒物在不断纵向萌生,逐渐交织成薄薄的一层稀疏腐蚀层完全附着于触指片表面,此时触指片表面基本不存在平滑区域,其表现为棕色。腐蚀程度进一步加深,如图 3(d)所示,苞状颗粒产物不断沉积团聚,所形成腐蚀层也逐渐增厚,大型苞状颗粒物直径可以生长到 4 μm 以上,此时腐蚀附着层可能会出现层状剥落。

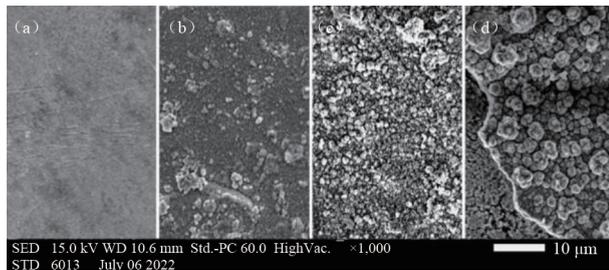


图 3 表带触指腐蚀微观形貌演变

1.3 腐蚀产物成分特征

为了进一步分析被腐蚀触指片表面腐蚀层的材料成分,对腐蚀触指片拆解过程中剥落的腐蚀产物进行了收集和研磨。使用 XRD 检测腐蚀产物粉末的成分,测试结果如图 4 所示。结果表明,腐蚀产物的衍射谱线与硫化亚铜(Cu₂S)衍射光谱高度一致。同时使用 EDS 测得腐蚀层成分元素主要包括 Cu、S、C、O 等元素,可以确认触指片表面腐蚀层的主要成分为 Cu₂S 与绝缘油裂解产生的碳氧化合物。

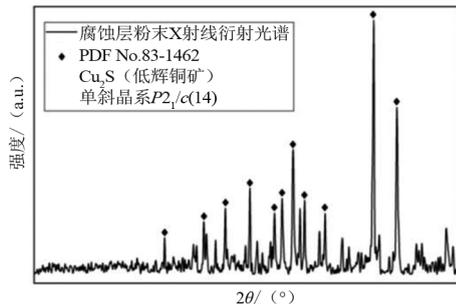


图 4 腐蚀层粉末 X 射线衍射光谱

2 腐蚀产物分布特征

为进一步判断腐蚀产物在触指片上的分布特征,探究其生成过程,对腐蚀附着层剥落区域进行重点分析。图 5 为 EDS 扫描触指片腐蚀附着层自然剥落区域的元素分布图。结果表明,腐蚀层剥落区域与覆盖区域存在明显分界,图中暗色区域为腐蚀

层覆盖区域,主要存在 Cu、S、C、O 等元素,基本不含 Ag 元素;绿色区域为腐蚀层剥落区域,该区域内 Ag 元素占绝大部分,同时含有少量的 Cu、S 元素,腐蚀层的剥落将触指片镀银层重新裸露,但镀银层表面仍有少量腐蚀产物残留。腐蚀层较易剥落表明, Cu_2S 未和镀银层形成有效结合。进一步,对腐蚀触指片进行切片观测以及磨抛观测。图 6 为对腐蚀触指片横截面的光学显微镜观察结果,图中腐蚀层厚度约 $5.7\ \mu\text{m}$,中间镀银层厚度约 $15\ \mu\text{m}$,3 层材料的界面清晰,镀银层完好,腐蚀产物未向触指片内部侵入。

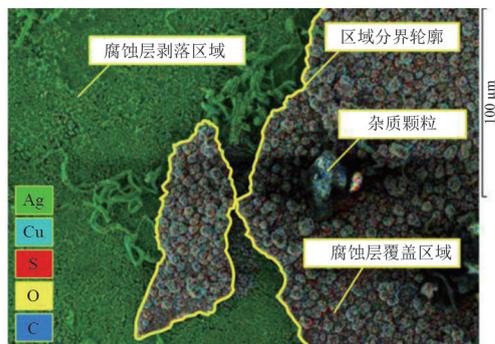


图 5 触指片腐蚀附着层自然剥落区域元素分布

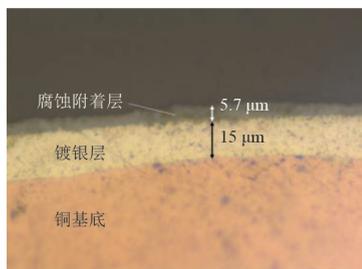


图 6 光学显微镜观察触指片横截面

图 7 为腐蚀触指片磨抛前后对比显微观察结果,以及对磨抛后表面元素含量检测。通过对比发现,初始腐蚀触指片呈棕色,表面呈现腐蚀痕迹,存在区域性擦痕,而在触指片字母标记沟壑内积聚了更多腐蚀产物,呈现出黑色。在进行磨抛处理后触指片恢复为亮银色,即去除腐蚀附着物后露出镀银层,镀银层表面存在少许微孔。对其进行 EDS 元素分析检测,表面几乎全为 Ag 元素,微孔内也不含 Cu、S 等腐蚀层元素,推断微孔为触指片生产镀银过程中形成的缺陷。腐蚀触指片的磨抛对比观测进一步证实了镀银层的完整性,排除铜元素穿透镀银层进行迁移的可能,表明腐蚀产物 Cu_2S 中的铜元素来自于绝缘油。通过电感耦合等离子体质谱仪检测出全新油样 (Diala GX, 与现场

油样型号一致) 中 Cu 元素含量约为 $0.05\ \text{mg}/\text{kg}$, 高于正常经验值 ($0.02\ \text{mg}/\text{kg}$), 且现场表带触指安装插头插套均为裸露铜质,高温运行条件下插头插套与绝缘油发生腐蚀反应而使铜离子溶于油中^[18]。同时目前对变压器油硫腐蚀的大量研究表明,硫主要来源于作为抗氧化剂被添加到绝缘油中的含硫化合物,如二苄基二硫 (DBDS) 等^[19]。综上推断腐蚀产物 Cu_2S 应为绝缘油中腐蚀性硫化物与 Cu 离子结合沉积在表带触指上,过热条件增加了油中腐蚀性硫化物的含量及活性,加速了腐蚀产物 Cu_2S 的生成沉积过程,最终造成局部触指片的严重腐蚀^[20-21]。

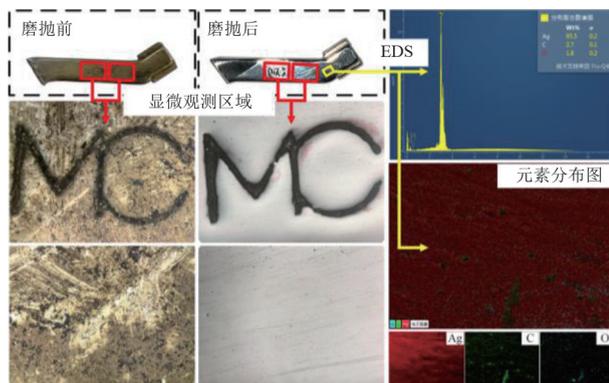


图 7 腐蚀触指片磨抛前后对比显微观察及磨抛后表面元素成分及含量检测

3 表带触指实验室热老化试验

拆解 3 片全新触指片作为试样进行油中热老化试验,油样选用 Diala GX (与现场一致),试验前油样进行脱水脱气处理。为探究温度因素对触指片腐蚀过程的加速作用,3 片样品的试验温度分别设置为 $150\ ^\circ\text{C}$ 、 $200\ ^\circ\text{C}$ 、 $250\ ^\circ\text{C}$,试验时长设置为 7 天。热老化试验结束后 3 片样品分别呈现不同程度的变色,试样 1 为黄色,试样 2 为棕色,试样 3 为黑青色。将热老化试验后触指片样品进行 EDS 测试,检测其表面腐蚀产物元素成分,并与现场黄、棕、黑 3 类不同腐蚀程度触指片进行对比,结果如图 8 所示。试样 1—3 (黄、棕、深青色) 的元素质量分数变化规律与现场拆解表带上不同腐蚀程度 (黄、棕、黑色) 触指片的元素质量分数变化规律高度一致,基本实现了高温条件下绝缘油中触指片表面腐蚀产物 Cu_2S 的实验室生成,其试验温度越高,对触指片腐蚀过程的加速作用就越强。

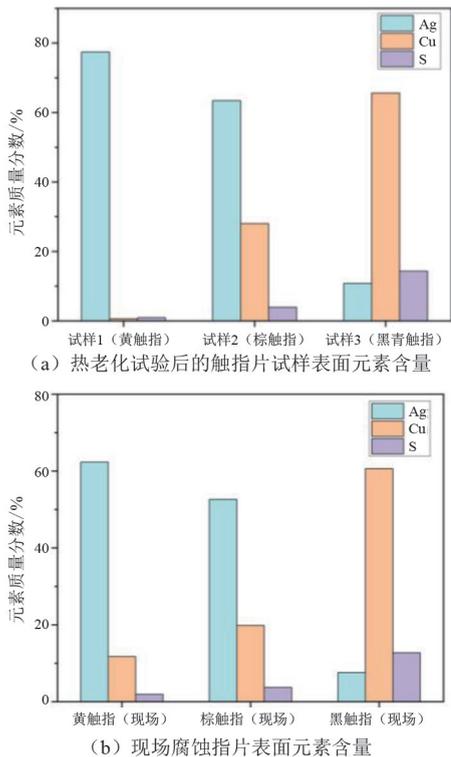


图 8 热腐蚀试验触指片与现场腐蚀触指片表面元素对比

4 基于激光诱导击穿光谱结合机器学习的触指腐蚀程度预测

基于激光诱导击穿光谱技术,采集了 4 类不同腐蚀程度触指片的典型光谱图,如图 9 所示。从图中可以看出,随着腐蚀程度的逐渐上升,铜元素的谱线,包括 Cu 324.7 nm、Cu 327.4 nm、Cu 300.8 nm,呈明显上升趋势,而 Cu 360.2 nm 的谱线有较弱上升趋势,这是由于样品中腐蚀层的主要成分是 Cu₂S,随着腐蚀程度的加剧,样品中的铜元素含量升高,导致光谱中的铜谱线强度升高,而银元素的谱线强度,包括 Ag 328.1 nm、Ag 338.3 nm,没有较大变化,印证说明了镀银层的完好性,其成分含量未有变化。

使用了 4 种机器学习算法,包括反向传播神经网络 (back propagation, BP)、支持向量机 (support vector machine, SVM)、随机森林 (random forest, RF) 和 K 近邻算法 (K-nearest neighbor, KNN)。这些机器学习算法具有不同的原理,能从不同的角度对触指片的腐蚀程度进行区分,从而优选出更适合对触指片腐蚀程度进行区分的算法。

在对机器学习模型进行训练之前,共采集了 1000 幅光谱样品,其中 600 个样本用于训练模型,

400 个样本用于测试模型的最终性能,以正确率作为模型的损失函数对模型进行训练,模型的正确率如图 10 和表 1 所示,混淆矩阵如图 11 所示。

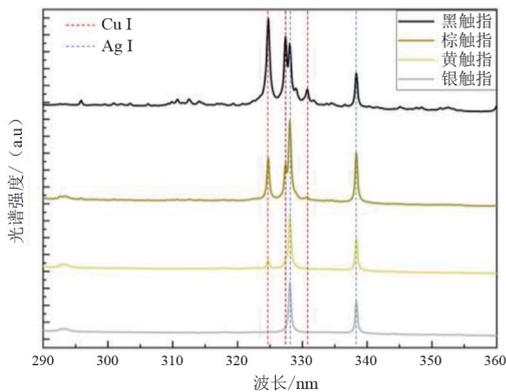


图 9 不同腐蚀程度触指片的激光诱导击穿光谱信号

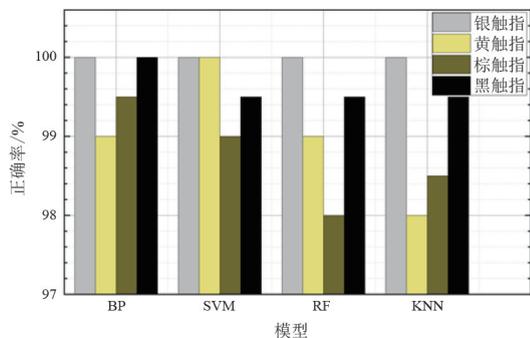


图 10 不同机器学习算法预测不同腐蚀程度触指片的正确率

表 1 4 种机器学习算法的总体正确率

| 机器学习算法 | BP | SVM | RF | KNN |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 正确率/% | 99.25 | 99.25 | 98.25 | 98.00 |

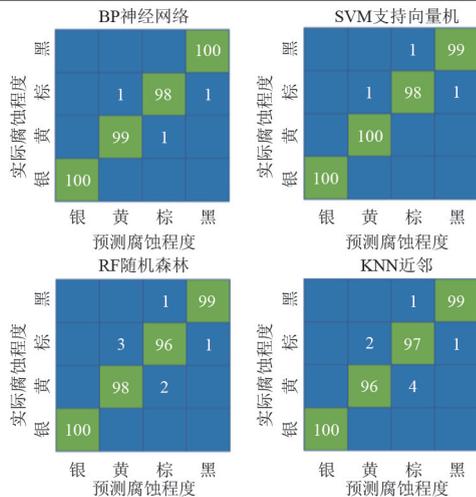


图 11 不同机器学习算法的分类混淆矩阵

从图中可以看出, BP 和 SVM 的正确率最为显著,均超过了 99%,相比于 RF 和 KNN 更适合于触指腐蚀程度的预测任务。BP 的分类错误集中在黄

色触指片和棕色触指片之间;SVM 的分类错误集中在棕色触指片和黑色触指片之间,而 RF 和 KNN 的错误集中在黄、棕、黑色触指片之间,总体而言,并没有模型将银色触指片分类错误,说明腐蚀和未腐蚀的光谱可以很好地被机器学习模型区分,这对于表带触指的安全运行状态具有重要作用。

5 结 论

上面主要以在役特高压换流变压器阀侧油中表带触指腐蚀劣化问题为研究对象,通过 SEM、EDS、XRD 等检测手段探究了油中表带触指表面腐蚀产物的微观形貌演变,分析其腐蚀层主要成分及含量,同时探究分析了腐蚀触指片的显微切片与表面磨抛状态,明确了腐蚀产物的分布状态。研究发现,表面腐蚀层最厚处约达到 5.7 μm ;腐蚀产物的主要成分为 Cu_2S ,其中铜元素可能仅来自于油中杂质。所提出的基于机器学习算法结合激光诱导光谱信号的快速检测分析方法,能够实现对 4 类不同腐蚀程度触指片的有效识别,其中应用 BP 与 SVM 算法的评估模型准确度可达到 99.25%。

参考文献

- [1] 任智慧.我国能源电力装备十年成就回顾及“十四五”发展展望—访国家能源局原监管总监李冶[J].电气时代,2022(11):12-15.
- [2] 李晓丽,李先志. ± 1100 kV 特高压直流输电线路导线结构参数研究[J].四川电力技术,2015,38(2):6-9.
- [3] 刘鹏,任汀,谢韬,等.换流变阀侧套管表带触指接触电阻数值计算[J].高电压技术,2023,49(3):1184-1193.
- [4] 田汇冬,靳守锋,谢韬,等.高压套管表带触指 SF_6 气氛中高温腐蚀特性研究[J/OL].高压电器:1-12[2023-12-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20231016.1712.002.html>. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.018.
- [5] 马金财,刘刚,何龙.基于电-热-力耦合的螺旋弹簧触指稳态温升分布仿真研究[J].高压电器,2023,59(8):223-231.
- [6] 谢强,陈云龙,毛宝俊,等. ± 800 kV 换流变压器阀侧套管表带触指型电连接结构地震响应分析[J].高电压技术,2023,49(12):4948-4959.
- [7] 段昊,汤浩,刘凯,等.特高压换流变压器阀侧升高座区域弹性电接触部件电阻异常原因分析[J].电网技术,2023,47(11):4810-4819.

- [8] 郑劲,文闯成.换流变压器阀侧套管出线装置绝缘分析[J].高电压技术,2010,36(5):1184-1190.
- [9] 庄一豪,毛宝俊,谢强.特高压换流变压器套管电连接结构地震累积效应评估方法研究[J].四川电力技术,2022,45(6):7-15.
- [10] TIAN Huidong, LIU Peng, ZHOU Shiyi, et al. Research on the deterioration process of electrical contact structure inside the ± 500 kV converter transformer RIP bushings and its prediction strategy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(12):2391-2400.
- [11] Stäubli. The multilam principle of multifunctional contact interface[M]. Switzerland: Pläffikon, 2017.
- [12] 刘新龙.电接触条件下的微动磨损性能影响因素研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [13] 陈巍,郑冀.电接触材料腐蚀机制研究进展[J].电工材料,2010(3):3-8.
- [14] 田汇冬,靳守锋,龚傲,等.换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1146-1156.
- [15] 刘杉,宋胜利,卢理成,等. ± 800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J].高电压技术,2019,45(9):2928-2935.
- [16] 范文博,周哲峰,罗福彪,等.弹簧触指结构电接触性能的研究进展[J].电工材料,2018(2):19-22.
- [17] Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test; ASTM D130—2004e1[S]. 2019.
- [18] WIKLUND P, LEVIN M, PAHLAVANPOUR B. Copper dissolution and metal passivators in insulating oil[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(4):6-14.
- [19] YUAN Y, GAO X, ZHOU J, et al. A review: research on corrosive sulphur in electrical power equipment[J]. High Voltage, 2021, 7(2):209-221.
- [20] SCATIGGIO F, TUMIATTI V, MAINA R, et al. Corrosive sulfur in insulating oils: Its detection and correlated power apparatus failures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1):508-509.
- [21] TOYAMA S, TANIMURA J, YAMADA N, et al. Highly sensitive detection method of dibenzyl disulfide and the elucidation of the mechanism[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(2):509-515.

作者简介:

黄志成(1993),男,博士,工程师,研究方向为高电压绝缘与试验技术;

刘凡(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为高电压绝缘与试验技术。(收稿日期:2024-02-26)