

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.019

绝缘操作杆表面状态与沿面放电关系试验研究

吴田¹, 陈聪¹, 刘磊², 黎鹏¹, 杨东¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要:绝缘操作杆作为带电作业中的重要操作工具,其是否处于良好的绝缘状态对带电作业人员和设备安全具有重要意义。文中通过不同测量方法检测绝缘操作杆表面存在的典型缺陷,通过电介质谱和沿面放电特性试验对高阻性缺陷检测的有效性进行验证。结果表明:在温度为25℃、相对湿度为68.1%的环境中,绝缘操作杆受潮状态下的表面绝缘电阻值比干燥状态下的表面绝缘电阻值下降了60.1%;干燥状态下绝缘操作杆的介质损耗因数小于0.01。利用石墨模拟不同碳化位置对沿面放电电压的影响,通过沿面放电试验可知,当两电极中存在贯通性缺陷时,沿面放电电压会严重下降。基于绝缘操作杆表面电阻或介质损耗特性的绝缘性能评估方法对现场使用的绝缘操作杆绝缘性能评估具有重要工程应用价值。

关键词:带电作业;绝缘操作杆;表面绝缘电阻;介质损耗;沿面放电

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)06-0132-06

0 引言

随着我国经济进入高质量发展阶段,各类用电负荷对供电可靠性的要求不断提高,带电作业是保证电力系统安全可靠运行的重要技术措施^[1-3]。我国在特高压输电线路带电作业领域走在了世界前列^[4-5],同时配电线路不停电作业也在电力企业得到推广及广泛应用^[6]。

绝缘操作杆是带电作业中的重要操作工具,其绝缘性能是否良好对人身和设备安全具有重要意义。国内外在实际使用和试验过程中曾发生多次绝缘操作杆闪络放电事故,针对闪络放电的原因也开展了理论分析和试验研究^[7]。加拿大的 M. Ghassemi 针对 4 起 500 kV 干燥无污秽的绝缘操作杆在冬季作业过程中发生闪络事故进行了流体和热力学耦合计算,估算绝缘操作杆在带电作业时的温升情况^[8]。杜秦生等对绝缘操作杆的表面电场和电位进行了试验研究,指出电位和电场分布不均匀是闪络放电的主要原因。

国内外的研究机构及电力公司在绝缘操作杆的绝缘特性的检查性试验方面进行了研究并颁布了相关技术规范和试验规程。美国 EPRI 从 1970 年开始进行试验研究,在 1997 年和 1998 年分别开发、改进了绝缘操作杆的测试装置。国内将文献 [9] 列为绝缘工具电气试验的强制性标准。《GB 26859—2011 电力安全工作规程》中指出:带电作业

工具使用前,应使用 2 500 V 及以上绝缘电阻表或绝缘检测仪进行分段检测(电极宽 2 cm,极间宽 2 cm),阻值应不低于 700 MΩ^[10]。国内一些研究者认为:目前绝缘操作杆使用的材料浸水绝缘性能得到了明显提升,通过 GB 26859—2011 中 2 cm 电极法评判绝缘操作杆是否受潮,其可靠性有待商榷。方安年等提出的可靠性判断标准为:标准电极测量出的绝缘电阻值高于 10 000 MΩ 时,才能判断绝缘操作杆没有受潮^[11]。因而 GB 26859—2011 中 2 cm 电极法是否能有效检测绝缘操作杆的受潮状态及存在的高阻性缺陷,需要开展相关试验进行验证,同时需探究此类缺陷对其绝缘电阻及沿面放电电压的影响。

文中通过人工模拟绝缘操作杆表面的缺陷类型(受潮、表面污秽、碳化),利用表面绝缘电阻检测试验验证 GB 26859—2011 中 2 cm 电极法是否能有效检测绝缘操作杆的受潮状态及高阻性缺陷。借助电介质谱进一步检测表面绝缘电阻法无法轻易发现的表面缺陷,通过沿面放电试验对其余 2 种试验结果进行验证。分析绝缘操作杆表面状态对沿面放电电压的影响,判断沿面放电电压的变化趋势,为绝缘操作杆的检查性试验提供参考。

1 试验装置与试验方法

1.1 表面绝缘电阻试验

1.1.1 试验接线

为了比较 GB 26859—2011 中 2 cm 电极法与 GB/T 31838.2—2019^[12] 中标准方法测量的沿面绝

收稿日期:2020-05-15;修回日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807110)

绝缘电阻值的差异性,对2种测量方法得到的绝缘电阻值进行对比。

GB 26859—2011的2 cm电极法:现场作业前,通常使用兆欧表检测绝缘操作杆的表面绝缘电阻,通过2片2 cm的铜片电极对绝缘操作杆进行测量,2个铜片电极之间的距离为2 cm,移动2片电极进行分段检测。

GB/T 31838.2—2019标准测量方法:测量时,将兆欧表的线路端子(L)连接绝缘操作杆的高压侧,接地端子(E)连接绝缘操作杆的低压侧,屏蔽端子(G)连接绝缘操作杆的2个底端,测试电极应选用管状电极。

GB 26859—2011的2 cm电极法测试如图1所示,GB/T 31838.2—2019的标准试验接线如图2所示,测量装置为高压数字兆欧表3455-20。2种测试方法在试验接线和测试电极上有明显差异,可能会对绝缘电阻测量结果产生影响。

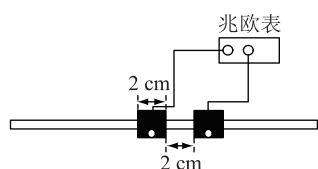


图1 GB 26859—2011的2 cm电极法
表面绝缘电阻测量

Fig.1 Surface insulation resistance measurement based on GB 26859—2011 2 cm electrode method

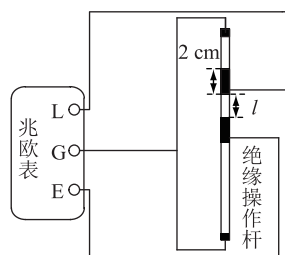


图2 GB/T 31838.2—2019沿面绝缘电阻
测量试验接线

Fig.2 Test wiring of GB/T 31838.2—2019 creeping insulation resistance measurement

1.1.2 试验方法与步骤

为了准确比较2种标准检测绝缘操作杆表面绝缘电阻的差异性,测试过程中采用铜片代替GB 26859—2011中的2 cm电极,用铜箔代替GB/T 31838.2—2019中的管状电极,2种标准检测步骤一致。试验过程中,对环境温度和相对湿度进行记录。

当绝缘操作杆发生沿面闪络时,在其表面会形成相应的导电通道,文献[13]对环氧树脂沿面闪络后的材料界面进行分析,界面上存在的碳元素含量均已超过50%,因此可利用石墨在绝缘操作杆表面

模拟操作过程中形成的碳化现象。绝缘操作杆表面绝缘电阻测试步骤如下:

(1) 搭建如图2的试验回路,采用不同形状的2 cm电极对样品杆进行测量,电极形状分为铜片、铜箔电极,根据GB/T 24343—2009对样品杆进行不同长度的测量^[14],测量长度 l 分别为2 cm,4 cm,8 cm,12 cm。

(2) 将样品杆放入温度 (50 ± 2) °C的烘箱内处理 (24 ± 1) h,取出并放入干燥箱冷却到室温后,对样品杆施加2.5 kV的恒定电压,若其在1 min的测量时间内超过量程,则停止试验并切换至更大的量程进行测量。不同测量距离各测试5次,结果取其平均值。

(3) 待步骤(2)结束后,根据文献[15]的方法将样品杆放入保持在室温的水中,期间应防止样品与容器大面积接触,样品分别放置不同的时间。随后取出试样,用清洁的干布或滤纸擦去表面水分,并置于精密的天平上称重,计算水分含量。随后测量样品杆的表面绝缘电阻,测量方法与步骤(2)一致。

(4) 利用石墨模拟绝缘操作杆表面的碳化,分别改变模拟碳化的位置、宽度以及长度,按步骤(2)对绝缘操作杆进行测量。

(5) 为了避免数据的分散性,不同的试验均进行5次,结果取其平均值。

1.2 频域介电响应试验

频域介电响应试验同样可以发现绝缘材料整体受潮及贯通性缺陷。相比绝缘电阻试验,绝缘频域介电响应试验在检测小体积绝缘材料时具有更高的灵敏度,且能有效对绝缘介质的含水状况进行检测。

绝缘频域介电响应试验从绝缘体的一端施加0~1 kHz的扫频信号,在另一端获得其介损在不同频率下的响应曲线。主要的试验装置为美国Megger IDAX300/350绝缘诊断分析仪。将绝缘杆的两侧用铜线包绕,将分析仪两端的电极分别夹在绝缘杆两侧,测试的绝缘杆样品离地面大于30 cm。检测方法参照GB/T 1409—2006^[16],试验采用固定电阻模式。

1.3 沿面放电试验

试验接线如图3所示,主要的试验设备包括10 kV·A/100 kV的工频试验变压器、150 kV阻容分压器、DL850E示波记录仪。试验步骤为:

(1) 搭建如图3所示的试验回路,测试距离固定为2 cm;

(2) 加压时,先将电压升至预估闪络电压值的75%处,之后以 2%/s 的升压速率继续升压至试品发生闪络,记录闪络电压值,每组试验做 5 次,试验结果取其平均值。

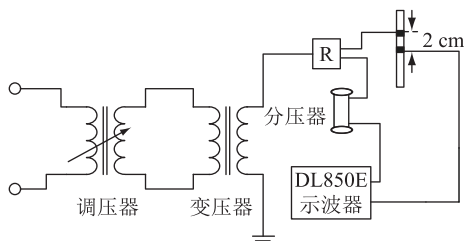


图3 沿面放电试验接线

Fig.3 Surface discharge test wiring

2 试验结果

2.1 表面绝缘电阻试验

2.1.1 不同电极形状表面绝缘电阻比较

图4为2种不同测试电极形状在相同测试距离下的绝缘电阻对比。由图4可知,GB 26859—2011中2 cm 电极法(铜片)比 GB/T 31838.2—2019 中的方法(铜箔)测试结果小 41.7%,且随着测试距离增加,两者的测试结果也逐渐增大。

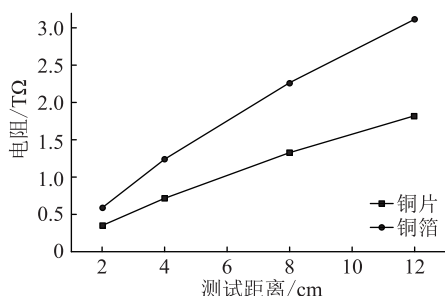


图4 不同测试电极形状的绝缘电阻

Fig.4 Insulation resistance of different test electrode shapes

2.1.2 电极距离对绝缘电阻的影响分析

由图4可知,对绝缘操作杆进行不同电极距离下的绝缘电阻测试,随着测试距离增加,其表面电阻值也近似线性增大。

2.1.3 干燥和受潮状态对绝缘电阻的影响分析

测试样品杆根据试验方法在规定的受潮环境中分别放置 24 h,48 h,72 h。此次测量的受潮绝缘操作杆在规定的受潮环境中放置了 72 h。图5为绝缘操作杆在相同测试距离下,干燥与湿润状态的绝缘电阻对比。由图5可知,绝缘操作杆在相同的测试距离下,湿润状态的表面绝缘电阻比干燥状态的表面绝缘电阻降低约 60.1%,但2种情况的电阻值大小仍然保持在同一数量级。湿润状况下最低沿面绝缘电阻为 8 700 MΩ,远大于 GB 26859—2011

中判断绝缘材料是否受潮的标准 700 MΩ。因此,GB 26859—2011 的 2 cm 电极法在检测绝缘操作杆表面是否受潮时有漏检的可能。

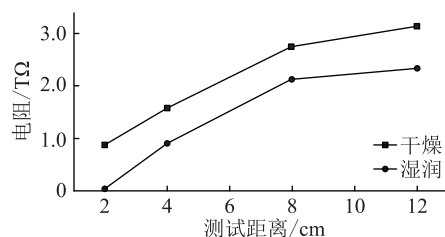


图5 干燥与湿润状态下的绝缘电阻

Fig.5 Insulation resistance values under dry and wet state

2.1.4 不同受潮时间对绝缘电阻的影响分析

图6为绝缘操作杆在相同测试距离下,受潮时间不同时的绝缘电阻。由图6可知,在不同的受潮状态下,操作杆受潮时间每增加 24 h,其绝缘电阻在原有的基础上下降 15.6%。

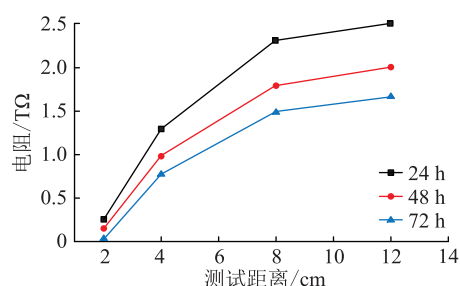


图6 不同受潮程度下的绝缘电阻

Fig.6 Insulation resistance under different moisture levels

2.1.5 不同碳化位置对绝缘电阻的影响分析

当操作杆碳化后,其绝缘电阻比正常状态下的电阻下降 47.2%。图7为利用石墨模拟绝缘操作杆表面不同位置的碳化对绝缘电阻的影响。

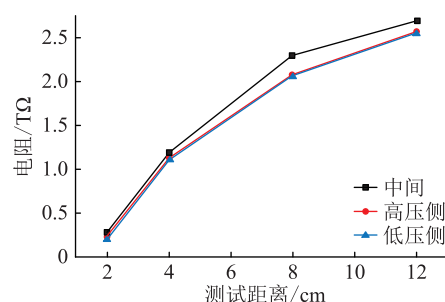


图7 不同碳化位置下的绝缘电阻

Fig.7 Insulation resistance under different carbonization positions

由图7可知,操作杆模拟的碳化宽度均为 1 mm,碳化总长度为 1 cm。当碳化处于中间位置时,其电阻比碳化位置在高压电极两端时高出 29.5%。其 2 cm 测试的绝缘电阻均大于 GB 26859—2011 中规定的 700 MΩ。因此,GB 26859—

2011 的 2 cm 电极法在检测绝缘操作杆表面是否存在高阻性缺陷时也有漏检的可能。

2.1.6 不同碳化宽度对绝缘电阻的影响分析

绝缘操作杆模拟的碳化长度均为 1 cm,在相同测试距离、不同碳化宽度时,其绝缘电阻如图 8 所示。由图 8 可知,当碳化宽度从 1 mm 增加至 2 mm 时,绝缘电阻下降约 13%;当碳化宽度从 2 mm 增加至 3 mm 时,绝缘电阻值未明显下降。

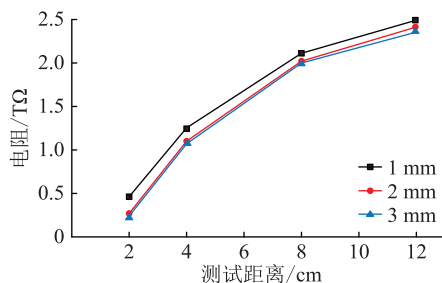


图 8 不同碳化宽度下的绝缘电阻

Fig.8 Insulation resistance under different carbonization widths

2.1.7 不同碳化长度对绝缘电阻的影响分析

操作杆模拟的碳化宽度均为 2 mm,在相同测试距离下,不同碳化长度的绝缘电阻图见图 9。由图 9 可知,碳化长度每增加 1 cm,绝缘电阻下降约 9%。

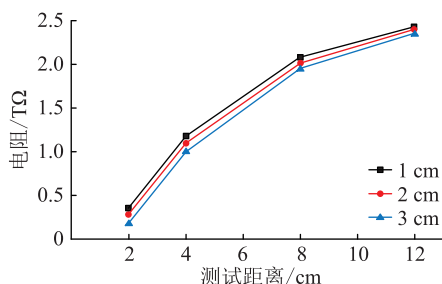


图 9 不同碳化长度下的绝缘电阻

Fig.9 Insulation resistance under different carbonization lengths

2.2 频域介电响应试验

2.2.1 受潮条件下的频域介电响应

图 10 为绝缘操作杆在相同条件下,受潮和干燥状态时频域介电响应对比。由图 10 可知,操作杆在干燥状态时,介质损耗因数始终小于 0.01,测试结果符合文献[15]的标准。在受潮状态时,介质损耗较干燥状态时明显上升,且测试结果已超过 0.01,最大值为 0.18。经过 24 h 受潮后的操作杆含水量为 0.073%。因此频域介电响应能够有效检测出操作杆的受潮情况,且较绝缘电阻检测更能有效判断绝缘操作杆表面是否受潮。

2.2.2 污秽条件下的频域介电响应

图 11 为绝缘操作杆在相同条件下,有污秽和干

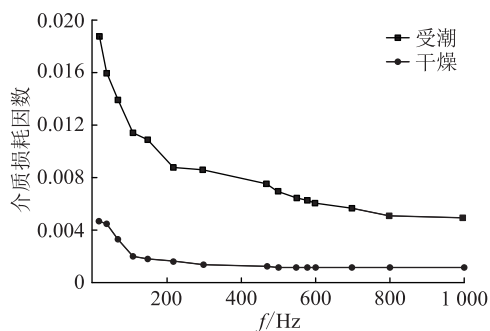


图 10 干燥和受潮条件下的介质损耗因数

Fig.10 Dielectric loss factor under dry and damp conditions

燥状态的频域介电响应对比。操作杆有污秽时,频域介电响应整体向上偏移,且在测试频段出现部分结果突变的现象。经过涂污后的操作杆在自然风干 30 min 后,其对应的含水量为 0.015%。

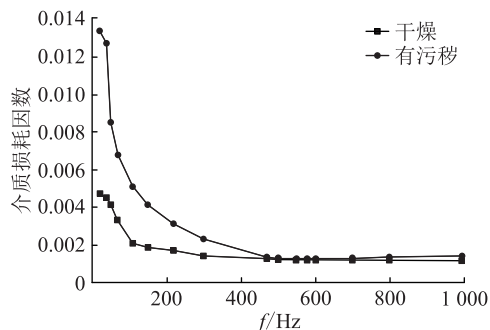


图 11 干燥和污秽条件下的介质损耗因数

Fig.11 Dielectric loss factor under dry and dirty conditions

2.3 沿面放电试验

2.3.1 污秽条件下的沿面放电

图 12 为绝缘操作杆在相同条件下,有污秽和干燥状态时沿面放电情况对比。操作杆在干燥无污秽的情况下,沿面放电电压约为 18 kV。在试验过程中,有污秽的样品杆沿面放电电压逐渐升高,这是因为在试验初期样品杆上的污秽并未完全干燥,试验过程中样品杆表面不断产生热量使原本未完全干燥的污秽完全干燥。污秽完全干燥的样品杆沿面放电电压约为 15 kV,较干燥无污秽的样品杆沿面放电电压下降了 16.7%。因此,当样品杆污秽完全干燥时,其对样品杆沿面放电电压的影响较小。

2.3.2 不同碳化位置对沿面放电电压的影响

表 1 为绝缘操作杆不同碳化位置时的沿面放电情况统计。由表 1 可知,当覆盖的石墨宽 1 mm、长 1 cm 时(碳化面积为测试区域的 0.66%),放电电压约为 17 kV。试验结果较干燥无污秽时下降 5.6%。碳化位置对操作杆沿面放电电压有一定影响,碳化位置在高压电极附近时沿面放电电压最低。

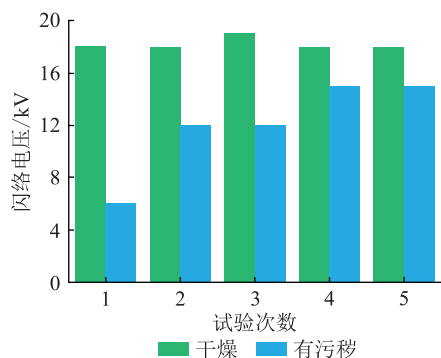


图 12 干燥和污秽条件下的沿面放电对比

Fig.12 Comparison of creeping discharge under dry and dirty conditions

表 1 不同碳化位置的沿面放电对比

Table 1 Comparison of creeping discharge under different carbonization positions

碳化位置	闪络电压/kV	碳化位置	闪络电压/kV
高压侧	17.0	中间	17.3
低压侧	17.5	两侧	17.3

2.3.3 不同碳化宽度对沿面放电电压的影响

表 2 为绝缘操作杆不同碳化宽度时的沿面放电对比。由表 2 可知,覆盖的石墨长度为 1 cm,改变绝缘操作杆的碳化宽度,且碳化面积不超过 1.99%时,样品杆的沿面放电电压降低 2.7%。因此当碳化面积在一定范围内时,操作杆的沿面工频放电电压随着碳化缺陷宽度的增大而降低。

表 2 不同碳化宽度的沿面放电对比

Table 2 Comparison of creeping discharge under different carbonization widths

碳化宽度/mm	闪络电压/kV
1	17.5
2	18.0
3	17.7

2.3.4 不同碳化长度对沿面放电电压的影响

保持绝缘操作杆碳化宽度相同即覆盖石墨宽度为 3 mm,对不同碳化长度下的沿面放电电压进行对比,如表 3 所示。由表 3 可知,长度为 1 cm 的石墨层几乎不影响沿面放电电压。覆盖长度为 2 cm 时,操作杆沿面放电电压急剧下降,仅有 9 V,此时覆盖的石墨层相当于贯通性缺陷,严重影响了操作杆的沿面放电电压,且其碳化面积达到了 3.98%(测试表面积为 150.72 mm²)。

操作杆沿面放电试验结果表明:当绝缘操作杆表面污秽完全干燥时,对沿面放电电压不会产生较大影响。利用在操作杆表面覆盖石墨的方法模拟操作杆的碳化,当碳化面积小于 1.98%时,碳化位置

表 3 不同碳化长度沿面放电对比

Table 3 Comparison of creeping discharge under different carbonization lengths

碳化宽度/mm	闪络电压/kV
1	17.5
2	0.009

和宽度对操作杆的沿面放电电压无较大影响。同时此类缺陷对绝缘操作杆的沿面电阻并无明显影响,当碳化面积大于 3.98%时,沿面放电电压呈数量级下降,其 2 cm 沿面放电电压几乎下降到 0。

3 结论

文中对绝缘操作杆进行表面绝缘电阻、介质损耗检测及沿面放电试验,测量绝缘操作杆表面绝缘电阻值、介质损耗因数以及沿面放电电压,并对试验结果进行分析,得出以下结论:

(1) GB 26859—2011 的 2 cm 电极法在检测绝缘操作杆表面是否受潮或是否存在高阻性缺陷时有漏检的可能。

(2) 随着测试距离增加,操作杆的表面绝缘电阻也近似线性增大。随着受潮时间增加,操作杆表面绝缘电阻呈规律性降低。

(3) 频域介电响应技术可有效检测出绝缘操作杆的受潮和污秽类缺陷,且相较于绝缘操作杆的表面绝缘电阻检测,频域介电响应技术效果更好。

(4) 绝缘操作杆的沿面放电试验结果表明,绝缘操作杆的贯通性缺陷对绝缘操作杆的沿面绝缘特性影响较大。

参考文献:

[1] 胡毅,刘凯,彭勇,等. 带电作业关键技术研究进展和趋势[J]. 高电压技术,2014,40(7):1921-1931.
HU Yi, LIU Kai, PENG Yong, et al. Research status and development trend of live working key technology[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(7): 1921-1931.

[2] 胡毅. 带电作业技术研究 with 标准制定[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3015-3024.
HU Yi. Live working technology research and standards formulation[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(11): 3015-3024.

[3] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术,2014,40(11):3491-3499.
HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(11): 3491-3499.

[4] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
LIU Zhenya. Innovation of UHV AC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 1-8.

[5] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版

- 社,2013.
- LIU Zhenya. UHV AC and DC power grid[M]. Beijing:China Electric Power Press,2013.
- [6] 胡毅,刘凯,刘庭,等. 带电作业技术研究与标准制定[J]. 高电压技术,2012,38(11):3015-3024.
- HU Yi,LIU Kai,LIU Ting, et al. Live working technology research and standards formulation[J]. High Voltage Technology, 2012,38(11):3015-3024.
- [7] SWATEK D, MCDERMID W M, LANINGA J. Experience with live-line insulator maintenance in freezing conditions[J]. INMR World Congress,2013.
- [8] GHASSEMI M, FARZANEH M. Calculation of minimum approach distances for tools for live-line working under freezing conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014(4):987-994.
- [9] 电业安全工作规程(电力线路部分): DL 409—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- Electrical safety work procedures(power line part): DL 409—2005[S]. Beijing:China Standard Press,2005.
- [10] 电力安全工作规程:GB 26859—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- Electric safety work regulation:GB 26859—2011[S]. Beijing:China Standard Press,2011.
- [11] 方安年. 带电作业 300 问[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- FANG Annian. 300 questions of live working[M]. Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [12] 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法:GB/T 31838.2—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- Test method for volume resistivity and surface resistivity of solid insulating materials:GB/T 31838.2—2019[S]. Beijing:China Standard Press,2019.
- [13] 林川杰,高文虹,李琦,等. 环氧树脂工艺参数与交流沿面闪络的关联性[J]. 高电压技术,2019,45(9):2732-2739.
- LIN Chuanjie,GAO Wenhong,LI Qi, et al. Correlation between epoxy resin process parameters and AC flashover[J]. High Voltage Technology,2019,45(9):2732-2739.
- [14] 工业机械电气设备绝缘电阻试验规范:GB/T 24343—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- Industrial machinery and electrical equipment insulation resistance test specification:GB/T 24343—2009[S]. Beijing:China Standard Press,2009.
- [15] 胡毅. 带电作业工具及安全工具试验方法[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- HU Yi. Live working tool and safety tool test method[M]. Beijing:China Electric Power Press,2003.
- [16] 测量电气绝缘材料在工频、音频、高频下电容率和介质损耗因数的推荐方法:GB/T 1409—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- Recommended method for measuring electrical permittivity at power frequency, audio, high frequency, and dielectric loss factor:GB/T 1409—2006[S]. Beijing:China Standards Press,2006.

作者简介:



吴田

吴田(1983),男,博士,高级工程师,研究方向为气体放电、输电线路外绝缘、输电线路运行与维护(E-mail:wutian_08@163.com);

陈聪(1994),男,硕士在读,研究方向为带电作业;

刘磊(1978),男,博士,教授级高级工程师,从事高电压试验技术、输电线路新技术、绝缘与电磁环境相关工作。

Relationship test of surface state and discharge voltage along the surface of insulated hot stick

WU Tian¹, CHEN Cong¹, LIU Lei², LI Peng¹, YANG Dong¹

(1. College of Electric Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Insulated operating sticks are important operating tools in live work. Whether they are in good insulation state is of great significance to ensure the safety of live working personnel and equipment. Typical defects of insulated hot stick are detected by different measurement methods, and the effectiveness of the high-resistance defect detection is verified by the dielectric spectrum and creeping discharge characteristic tests. The results show that in the environment of temperature 25 °C and relative humidity 68.1%, the surface insulation resistance value of the insulated hot stick in the wet state is 60.1% lower than that in the dry state. The dielectric loss factor of the insulated hot stick in the dry state is less than 0.01. Use graphite to simulate the effect of different carbonization positions on creeping discharge voltage. It is obtained through creeping discharge test that when there is a penetrating defect in the two electrodes, creeping discharge voltage drops severely. Based on the research results, method of evaluating the insulation performance of an operating stick based on its surface resistance or dielectric loss characteristics has important engineering application value.

Keywords: live work; insulating hot stick; surface insulation resistance; dielectric loss; creeping discharge

(编辑 吴楠)