

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.032

35 kV 绝缘管型母线运行异常分析及结构探讨

张星海, 刘凤莲, 邓元实, 丁登伟, 马启潇, 范松海

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610072)

摘要:近年来,绝缘管型母线作为一种大电流连接线使用日渐增多,但由于目前管母的生产、运维尚缺乏有效规范,投运后频繁出现问题。文中以四川某变电站 35 kV 绝缘管母为研究对象,对其投运后出现的鼓包、冒烟、着火等异常现象和结构设计进行了全面的分析与探讨。通过多组试验和解体分析结果,管母的半导体层和铜带配合不合理所导致的半导体层破损是运行异常的直接原因。有限元仿真计算结果表明,半导体层出现破损后,破损处电场局部集中,且破损处的电场强度与破损口大小正向相关。同时,由于半导体层阻燃性能较差,出现放电后使缺陷发展扩大,并最终表现出鼓包、冒烟、着火等异常现象。在此基础上,文中还分析了管母的结构设计、材料使用对其电气性能的影响,并从生产加工、运行维护、检测等方面对管母的安全可靠运行提出建议。

关键词:绝缘管母; 半导体层; 电场分布; 运行异常

Analysis on Abnormal Operation and Structure of a 35 kV Insulating Tubular Bus Bar

ZHANG Xinghai, LIU Fenglian, DENG Yuanshi, DING Dengwei, MA Qixiao, FAN Songhai

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Insulating tubular bus bars have been widely used as connecting lines in recent years. However, faults occur frequently in their service due to lack of effective regulation. In this study, a 35 kV insulating tubular bus bar in a substation was analyzed in terms of the structure design and the abnormal behaviours. Disassembly inspection and tests were conducted, and the results indicate that the abnormal operation of the bus bar is caused by mismatch of the semi-conductive layer and the folded copper strip. Simulation shows that the electric field concentrate at the position where semi-conductive layer is worn off by the folded copper strip, and there is a positive correlation between the electric field at the worn position and the size of the position. Further, as the semi-conductive layer is weak in electric strength and flame resistance, this defect develops quickly to induce bulging, smoking and burning in the existence of partial discharge. In addition, structure design and materials of the bus bar, as well as their effects on electrical properties of the bus bar, are also discussed, and some suggestions on safe operation of the bus bar are given with respect to production, operation, and detection.

Key words: insulating tubular bus bar; semi-conductive layer; electric field distribution; abnormal operation

0 引言

随着电网规模的不断扩大,大量输电线路需要跨越高海拔、多地形、无人区等地带,在冬季覆冰现象严重。目前,电力部门为保证输电线路在覆冰期的安全可靠运行,广泛使用直流或交流融冰装置,通过输出大电流产生的热效应使覆冰自由脱落。考

虑到裸母线在绝缘距离、输出电流等方面无法满足运行要求,而同电压等级的常规电缆也不具有足够的载流能力,因此为满足各变电站内融冰大电流有效输出的需求,近年来发展起来的绝缘管型母线(简称“管母”)在线路融冰装置中越来越多地被用作连接线使用。绝缘管型母线具有集肤效应低、单位截面载流量大、散热条件好、机械强度高、电气绝缘性能强、维护工作量少等优点^[1]。但作为一种较新的电气连接设备,绝缘管母在设计、检测、运行方面尚无

标准可依。国内已投入运行的管母在使用中多次出现了鼓包、冒烟、烧损等问题,严重影响了母线的正常使用和融冰工作的顺利进行^[2-3]。

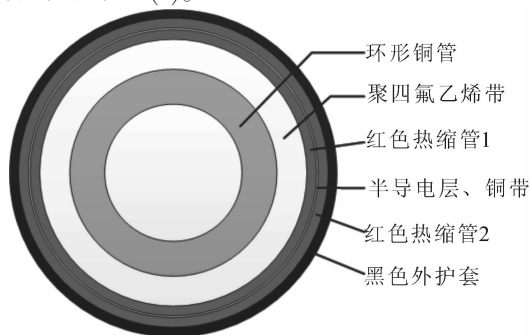
针对以上现状,文中以四川某变电站 35 kV 融冰用绝缘管型母线为研究对象,通过电气试验、带电检测、现场解体等方法,对管母发生故障的原因进行了分析与探讨,并通过有限元仿真法对其电场分布进行了分析计算,揭示了半导体层破损对管母运行故障的影响机理。此外,文中分析了管母的结构设计、材料使用对其电气性能的影响,并从生产加工、运行维护、检测等方面提出了提高管母运行安全可靠性的建议。

1 管型母线的结构与历史运行情况

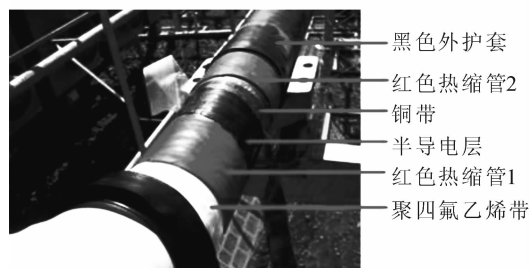
1.1 管型母线的基本结构及工艺

文中所研究的绝缘管型母线型号为 WLBTGMY 35/4 000,其额定电压为 35 kV,额定电流为交流 4 000 A。

该管母的结构示意图见图 1(a),由内到外依次为:环状空心铜管、聚四氟乙烯带、红色热缩管 1、半导体层、间绕铜带、单层聚四氟乙烯带(厚度极薄,约 0.1 mm,可忽略)、红色热缩管 2、黑色外护套,其实物对照图见图 1(b)。



(a)管母结构示意图



(b)管母实物图

图 1 管母结构示意图及实物图

Fig. 1 The schematic diagram and picture to show structure of the tubular bus bar

其中,环状铜管、聚四氟乙烯带、红色热缩管 1 在生产车间内加工,其余结构在现场手工制作。主绝缘总厚度约 10 mm,由宽度为 35 mm,厚度为

0.1 mm 的聚四氟乙烯带在环状空心铜管表面缠绕成型,该材料在较宽频率范围内的介电常数和介电损耗都很低,击穿电压、体积电阻率和耐电弧性都较高。半导体层由初始宽度为 25 mm,厚 0.8 mm 的半导体自粘带手工拉伸 200%后以半搭盖方式缠绕包裹于红色热缩管 1 外面;所选用的自粘带可用于 110 kV 及以下设备,连续运行温度低于 90 ℃,应急过载温度达 130 ℃。间绕铜带采用宽 35 mm、厚 0.1 mm 的紫铜皮由人工以 0.5~3 cm 的间距单层缠绕而成。

1.2 管型母线的历史运行情况

该管型母线于 2012 年初投入使用,2012 年冬季对 5 条 500 kV 输电线路进行融冰工作,未发现异常。

2014 年 1 月,对某 500 kV 输电线路进行融冰工作时,管母 C 相一中间搭接头的绝缘护套烧损。

2014 年 2 月,对 500 kV 某线路进行融冰时,管母再次出现了多处鼓包、冒烟和烧蚀现象。

2 管型母线的现场试验分析

为了分析绝缘管型母线在运行中出现异常的原因,作者在现场对管型母线的主绝缘和局部放电进行了检测,并通过试验研究了铜带缠绕方式对管型母线运行状态的影响。

2.1 主绝缘检测

为检测管母的绝缘水平是否在长期运行中因受潮、老化等原因发生劣化,文中采用 2 500 V 绝缘电阻表分别测试了管母各相的绝缘电阻。管型母线主绝缘绝缘电阻测试值见表 1。从表 1 所示的测试结果可见,管母的绝缘电阻数量级都在 $10^9 \Omega$,绝缘状况较好,未见明显劣化或受潮现象。因此,初步判断管型母线的运行故障并不是由主绝缘的劣化引起的。

表 1 管型母线主绝缘绝缘电阻测试值

相别	A相	B相	C相
绝缘电阻/GΩ	16	19	18

2.2 局部放电检测

由于管型母线的结构与电力电缆类似,文中参照《DL/T 1253—2013 电力电缆线路运行规程》中对 35 kV 电缆线路交接耐压试验的规定^[4],按额定相电压 U_0 的 1.7 倍($1.7U_0=34$ kV)通过耐压装置,在空载的情况下给管母加压带电,同时通过 PDCheck 高频局放检测仪在管母的铜屏蔽层接地引下线处分别对各相测量局部放电情况^[5-8],检测到的局放信号见

图 2。

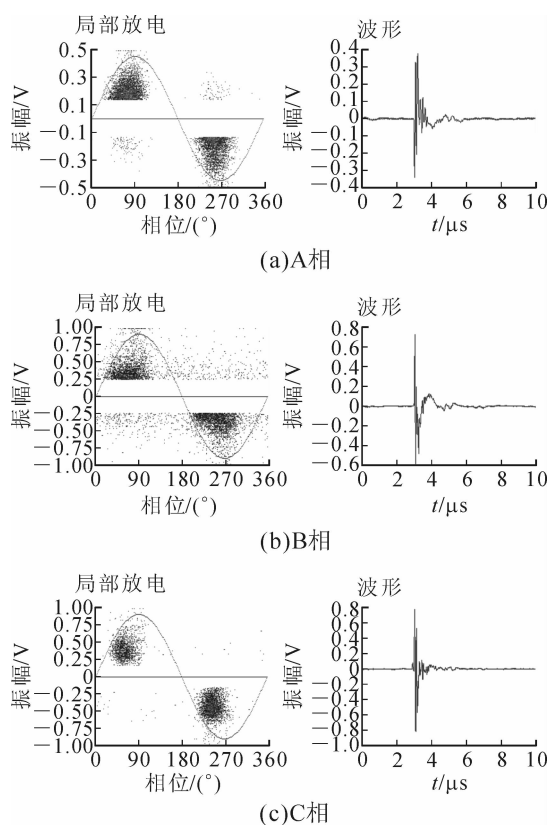


图 2 管母局部放电谱图及时域波形

Fig. 2 Partial discharge spectrum and time domain waveform of tubular busbar

从高频局放的测试结果可见:管母三相的局放谱图均主要分布在一、三象限内,存在 180° 相位关系,有较为明显的相位特征;时域局放波形为明显的振荡衰减波形。参照实验室内典型放电谱图的特征,判断管母处检测到的放电类型表现为表面放电。由此可初步说明,管母的外层结构存在一定缺陷,可能是导致管母运行异常的原因。

2.3 铜带缠绕方式对比试验

与电力电缆的铜屏蔽层类似,绝缘管母线的铜带层也是作为故障电流的泄放通道而设计的,但文中管母的铜带缠绕方式与电缆有明显不同。电力电缆的铜屏蔽层为半搭盖缠绕,并有一定的搭盖率要求,而文中管母的铜带采用间绕方式。为检测铜带缠绕方式对管母运行状态的影响,文中对两种缠绕方式进行了对比分析试验。取管母 A 相剖去两小段外护套、红色热缩管 2、一层聚四氟乙烯带,露出间绕铜带及其下层的半导体层,见图 3(a)。在 B 相上另取一段做相同的处理作为对照组,但将管母右侧外露的半导体层用铜带包绕,使铜带统包半导体层,见图 3(b)。

给图 3(a)所示的管型母线空载加压 34 kV,用

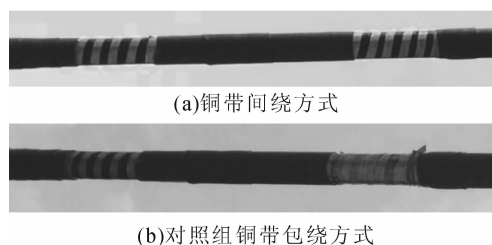


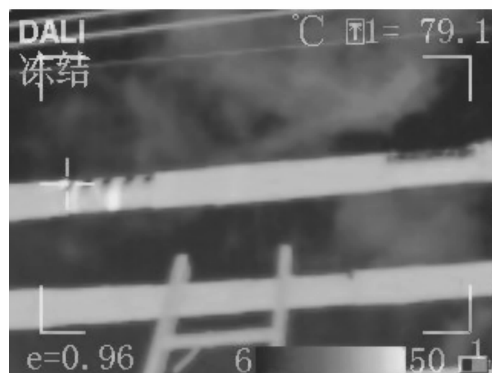
图 3 铜带缠绕方式对比图

Fig. 3 Comparison diagram of the wrapping pattern of copper strip

红外热像仪和紫外放电检测仪进行观测,管母的初始温度为 33.8°C 。加压一段时间后,铜带间的半导体层温度上升到 106.9°C ,见图 4(a),随后开始冒烟、着火,温度达到 150°C 左右。此外,用紫外检测仪在铜带附近检测到明显的放电光子数增多现象。给图 3(b)的对照组管母施加 34 kV 的电压一段时间后,用红外热像仪检测到的温度见图 4(b)。可见:间绕的铜带处再次出现温度升高,检测到的半导体带温度达 79.1°C ;而包绕的铜带处温度未见异常,检测到的最高温度约 37°C 。此外,用紫外检测仪在统包铜带附近未观测到明显放电,而在管母间绕铜带的附近检测到放电光子数明显增大。



(a)间绕方式



(b)搭盖方式

图 4 不同缠绕方式下铜带红外温度对比图

Fig. 4 Infrared temperature comparison of copper strip with different wrapping pattern

以上实验结果表明,管母出现鼓包、冒烟、着火

等现象与铜带的缠绕方式直接相关。同时,由于局放检测和铜带缠绕方式对比试验中,管母都未带负载,为空载运行状态,因此可以判断管母异常应为电压型缺陷引起。

3 管型母线的现场解体

参照 DL/T 1253—2013 中对 35 kV 电缆线路交接耐压试验的规定^[9],按额定电压 U_0 的 1.7 倍通过振荡波耐压装置给管母加压,并使管母空载运行一段时间后,管母依次出现了鼓包、冒烟、着火等异常现象,文中对故障点进行解体观察后发现:

1)管母手工绕制部分工艺粗糙,铜带褶皱较多,沿铜带边缘的部分褶皱处有明显放电痕迹,并向半导电层侧发展,见图 5。

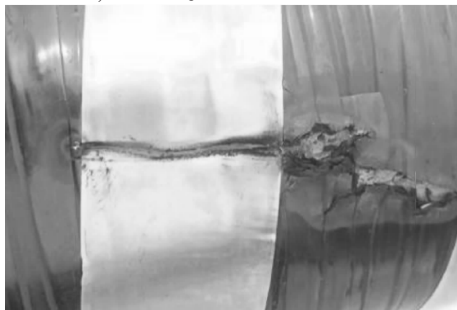


图 5 铜带褶皱及其边缘放电痕迹

Fig. 5 Folds and discharges discovered near the copper strip

2)铜带褶皱处有明显撑破半导电层的现象,现场观测到的放电点大多位于铜带褶皱与半导电层破损接触边缘处,见图 6。



图 6 铜带褶皱边缘撑破半导电层处

Fig. 6 Damaged point on the semiconducting layer near the folded copper strip

3)放电烧损点多沿铜带边缘发展,典型的烧蚀痕迹见图 7。经现场观察,铜带下方的半导电层基本未受影响,且红色热缩管 1 以内的主绝缘基本未受损,也未见明显受潮或进水现象。

4)管母出现鼓包、冒烟、烧损的部位无明显分布规律。管母的现场解体观察及试验结果表明,对于带间绕铜带的管母,铜带褶皱与半导电层接触的边缘发生了明显的局部放电现象,是引起管母运行故



图 7 管母烧蚀痕迹

Fig. 7 Damage trace left on the tubular bus bar
障的直接原因。

4 电场仿真计算

为了进一步验证试验结果,揭示管母运行异常的发生机理,文中以有限元计算软件为平台,建立了绝缘管型母线的二维有限元仿真模型,对不同条件下管母的电场分布进行了分析计算,从电场角度对管母的运行异常进行了分析与探讨。

4.1 电场计算原理

对于任一二维电场问题,如用电位函数 $\varphi = \varphi(x, y)$ 描述场的分布,则电位通常应满足如下边值问题

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho(x, y)}{\varepsilon} \\ \varphi|_n = f_0(S) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: φ 为电位; $\rho(x, y)$ 为电荷密度; ε 为介电常数; $f_0(S)$ 为面积 S 上的边界条件。

根据有限元方法的基本原理,式(1)所对应的等价变分问题为

$$\begin{cases} F(\varphi) = \iint \left\{ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho \varphi \right\} dx dy = \min \\ \varphi|_n = f_0(V) \end{cases} \quad (2)$$

由于文中管母计算场域 S 内的自由电荷密度 $\rho(x, y) = 0$,则场方程式归结为拉普拉斯方程,其等价变分问题为

$$\begin{cases} F(\varphi) = \iint \left\{ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy = \min \\ \varphi|_n = f_0(S) \end{cases} \quad (3)$$

有限元法用三角形、四边形剖分单元将待求解的二维场域离散化,通过构造相应的插值函数,进行单元与总体能量泛函的离散化分析,获得待求二维电场的有限元方程,最终求得待求场域 S 内的电压、电场等参数的分布矩阵^[9-11]。文中采用有限元分析计算软件对上述变分问题进行了数值求解。

4.2 管型母线的电场仿真模型的建立

为简化计算,将连续缠绕在半导电层上的铜带等效为环形,则可将管母视为以管母中心为轴线的轴对称结构,用二维模型计算。所建的模型见图8,为了保证求解计算的精度,在管母外护套的外层建立了空气层,并用无限远场单元模拟管母周围到大地的气体空间。

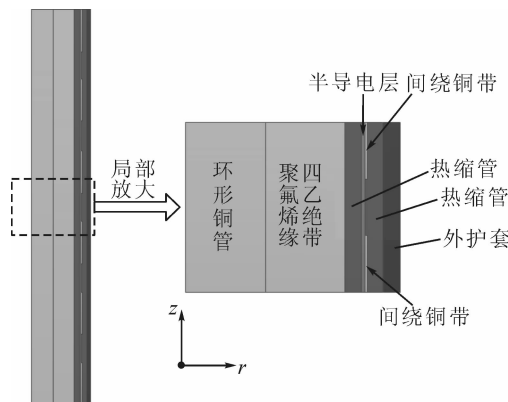


图8 管母二维模型

Fig. 8 2D model for tubular bus bar

边界条件:按照实际运行条件,对管母施加正常运行时单相峰值电压 28.57 kV,铜屏蔽层接地,对远场单元外表面加无限表面(inf)标识。

针对现场解体中观察到的铜带褶皱下方半导电层破损现象,为进一步分析其对管母电场分布的影响,仿真中将管型母线中间区段一匝铜带边缘的半导电层断开,沿管母轴线方向用厚 0.4 mm,长 1 mm 的空气填充以模拟半导电层的破损,所建的对照模型见图9。

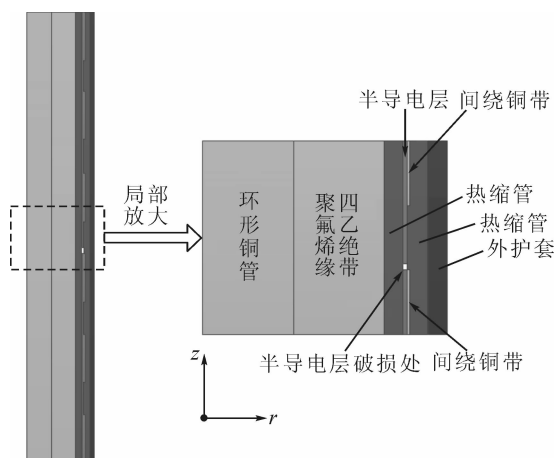


图9 管母铜带边缘半导电层破损模型

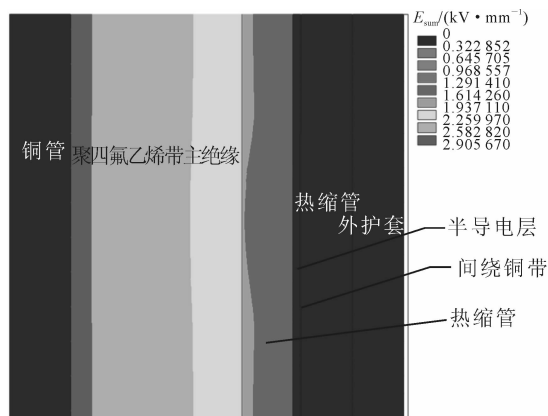
Fig. 9 Model for tubular bus bar while semiconducting layer is damaged by the folded copper strip

4.3 管型母线的电场分布

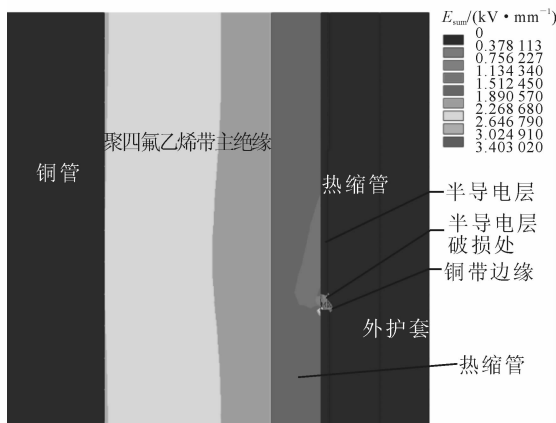
4.3.1 半导电层破损前后电场分布

根据 ANSYS 仿真计算结果,管母结构完好时,仿

真得到的电场分布云图见图10(a)。电压由环形铜管沿径向逐渐降低,电场强度最大值为 2.905 67 kV/mm,出现在聚四氟乙烯带主绝缘靠近铜管的一侧,电压降主要由聚四氟乙烯承担,半导电层及其以外的结构部分场强基本为0。铜带边缘半导电层破损后,管母内部场强与完好结构时不同,电场分布云图见图10(b)。此时电场强度最大值为 3.403 02 kV/mm,出现在半导电层破损处靠近铜带下边缘的一侧,与主绝缘靠近铜管侧的场强值基本接近。



(a)完好结构管母的局部电场分布云图



(b)半导电层破损后管母的局部电场分布云图

图10 管母的电场分布云图

Fig. 10 Contour electric field distribution of tubular bus bar

图11为半导电层破损前后铜带边缘的电场矢量图。结果表明:半导电层结构完好时,电场强度矢量从铜管中心沿径向均匀向半导电层发散;半导电层破损时,破损处场强局部集中,该处电场方向不再以铜管为中心径向发散,而是以破损点为发散口,通过周围介质返回铜带。

由半导电层破损前后电场强度分布的对比可见:即使半导电层只发生了微小的破损,破损处电场局部集中、场强明显增大,数值与靠近铜管侧的主绝缘承担的电场接近,而由于半导电材料的耐压强度、耐火花放电性能很弱,破损处很容易成为故

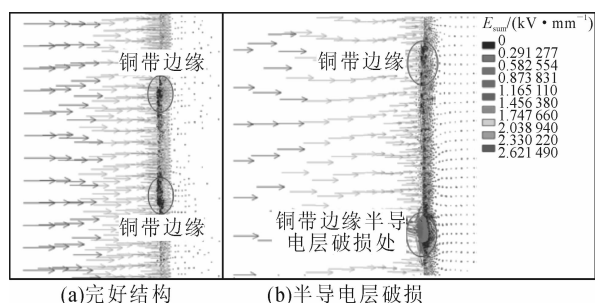


图 11 管母半导体层破损前后电场矢量图

Fig. 11 Vector graph of electric field for tubular bus bar pre and post the semiconducting layer is damaged

障发生的起始点。该结果与现场解体观察到的现象相互支撑。

对于铜带采用搭盖式缠绕的管母,由于铜带覆盖了所有的半导体层,可以保证良好的均压效果,即使半导体层出现了破损,也不会引起电场的明显畸变与局部集中,因而不容易发生局部放电。该结果可从理论上解释 3.3 节中铜带缠绕方式对管母运行状态的影响。

4.3.2 半导体层破损程度对电场分布的影响

为分析半导体层破损程度对管母电场分布的影响,文中以铜带边缘为起点,沿轴线方向用不同长度的空气薄层模拟不同大小的半导体层破损。仿真中取管母铜带间距为 10 mm,保持半导体层的厚度 0.4 mm 不变,将半导体层破损长度从 1 mm 逐次增大到 9 mm。图 12 给出了仿真得到的破损长度分别为 1、4、9 mm 时管型母线的典型电场分布云图。

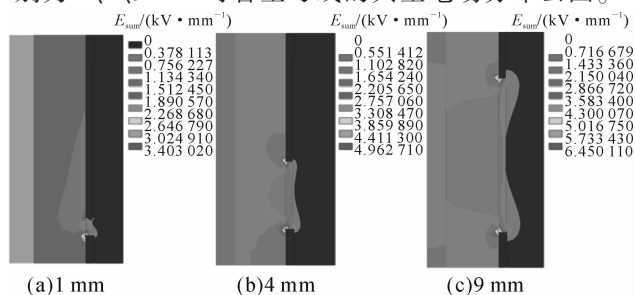


图 12 不同破损处长度时电场分布局部云图

Fig. 12 Local contour electric field distribution of tubular bus bar with different damaged length

由图 12 可见: 半导体层破损长度为 1 mm 时, 电场最大值出现在破损区域靠近铜带边缘的端部; 当半导体层破损长度增大为 4 mm 后, 破损处与半导体层接触的两端均出现明显的电场集中现象, 电场最大值也有所增大, 从 3.4 kV/mm 增大到 4.9 kV/mm; 当半导体层破损长度为 9 mm, 破损区域接近相邻的铜带时, 主绝缘和热缩管等相邻区域电场分布畸变明显, 电场最大值出现在半导体层破损处的两

端, 且电场强度幅值进一步增大, 达到 6.5 kV/mm。

以半导体层未被破损时的电场最大值 $E_{\max 0}$ 为参考, 破损长度增大时管母的电场最大值 $E_{\max 1}$ 相对 $E_{\max 0}$ 的比例关系见图 13。可见, 随着半导体层沿轴线方向破损长度的增大, 管母电场强度的最大值基本呈增大趋势, 最大可以达到未破损时的 2~3 倍。这意味着, 随着半导体层破损区域的增大, 局部电场集中现象将逐渐增强, 更容易引发局部放电, 使管母出现鼓包、冒泡的概率增大。

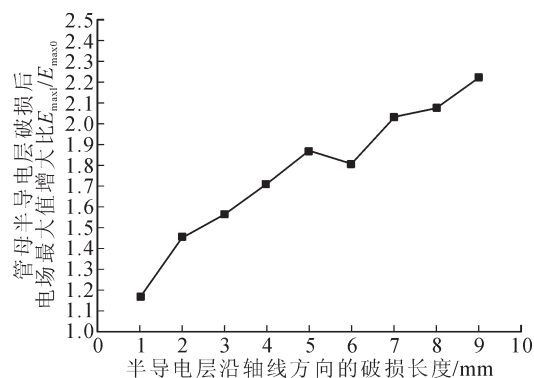


图 13 管母半导体层破损后电场最大值的变化

Fig. 13 Peak values of electric field while semiconducting layer is damaged with different length

根据仿真结果, 当半导体层由于拉伸不均、质量不合格或被铜带撑破等原因出现破损点后, 管母的电场将发生畸变, 产生局部放电。当管母某一半导体层破损处出现明显放电后, 由于半导体层的阻燃性能差, 破损处将在局部放电的作用下向相邻铜带发展而导致破损区域逐步扩大; 而破损区域增大后又会进一步增大破损两端的局部电场, 加剧局部放电的发生, 最终导致烧损区域不断扩大, 使管母出现鼓包、冒泡等异常运行现象。可见, 半导体层破损可以对放电或烧损朝相邻铜带的发展起到引导作用, 这与现场解体观察到的烧损痕迹(见图 6~8)基本一致。

此外, 根据半导体层破损前后仿真计算的对比结果, 完整的半导体层可起到均匀电场的主要作用, 此时半导体层外缠绕的铜带褶皱、间绕方式对电场分布无明显影响。此特征可进一步解释第 3 节 4) 中提到的管母运行故障点呈分布式随机出现, 没有明显规律的现象。

4.4 管型母线的合理结构及参数探讨

4.4.1 管母结构与规程要求的差异

GB/T 12706.3—2008 中 35 kV 电力电缆对金属屏蔽的规定如下: 铜带屏蔽应由一层重叠绕包的软铜带组成, 也可采用双层铜带间隙绕包; 铜带间的搭盖率为铜带宽度的 15%(标称值), 最小搭盖率应

不小于5%;单芯电缆所用软铜带的标称厚度应大于等于0.12 mm^[12]。参照该要求,结合现场比较观察,融冰所用管母铜屏蔽的实际结构与电缆的主要差异点有3处:①铜带间绕方式;②主绝缘外层的热缩管1;③铜带厚度。

对第①点不同,从图10、11所示的电场仿真结果可知:管母在结构完整情况下,铜带采用间绕方式不影响电场分布的相对均匀。但文中管母由于缠绕工艺不佳,在手工拉伸半导体自粘带的过程中,使缠绕在热缩管1外的半导体层厚薄不均,而所缠绕的铜带由于质量或工艺不佳又留有较多的褶皱,当铜带褶皱处压在半导体层较薄处或半导体层质量有问题处时,就可能出现半导体层破损现象,引起破损处场强局部集中,导致局部放电出现。同时,半导体层的厚薄不均和铜带存在褶皱也会在一定程度上引起电场分布的不均匀性,提高局部放电发生的可能性。

对第②点不同,根据图10中电场分布云图,热缩管1的存在不会引起电场局部集中,且可承担一部分电压降,在不超过热缩材料使用场强的情况下,热缩管1的存在对聚四氟乙烯带的固定与隔油起重要作用,在现场解体中也未见由热缩管引起烧蚀的迹象。因此判断热缩管1并不是引起管型母线运行故障的原因。

对第③点不同,在保证半导体层结构完好、质量合格的情况下,铜带的主要作用是在管母出现接地故障时提供通道,故铜带厚度主要影响可泄放的故障电流大小,对电气性能只起辅助补充作用,更不会由于厚度不足引起运行异常。

结合以上分析,该变电站内管母多次出现鼓包、冒烟、着火的主要原因有3:①管母所使用的半导体材料拉伸工艺不合理,容易导致半导体层厚薄不均,并出现破损;②铜带本身质量或缠绕工艺不佳,导致铜带多处出现褶皱;③半导体层的拉伸工艺与铜带缠绕质量不匹配,导致铜带与半导体层对场强控制的配合不好、裕度不足,导致半导体层破损后,间绕的铜带起不到均匀电场的补充作用,反而成为电场局部集中处,引起局部放电。此外,在现场对半导体层进行检查时,发现半导体层易燃,用打火机可轻松点燃半导体层。因此,半导体层的阻燃性差、易燃烧是导致管母出现问题,并逐渐扩大的另一个重要原因。

综合以上分析结果,笔者认为管母较为合理的结构设计应考虑以下几点:①半导体层采用挤出工艺,并考虑其阻燃性要求;②铜屏蔽层采用搭接缠

绕,或用铜皮统包,并考虑其承担短路电流的能力。

4.4.2 半导体层介电常数对电场分布的影响

通过前文的讨论可知,半导体层的性能和状态对管母的运行状况起重要作用,因此有必要在管母铜带采用搭接缠绕方式时,针对半导体带参数对电场分布的影响作进一步研究。文中假设管母的铜带采用了搭接缠绕方式,重新建立仿真模型,研究了半导体带介电常数对管母电场分布的影响。

当半导体层相对介电常数 ε 在1~10变化时,管母电场最大值的变化曲线见图14,可见:半导体层相对介电常数小于2时,场强最大值随着半导体层介电常数的增大迅速减小;相对介电常数大于3以后,对电场分布影响较小;半导体层材料的介电常数在2~3时,场强分布存在最优值。

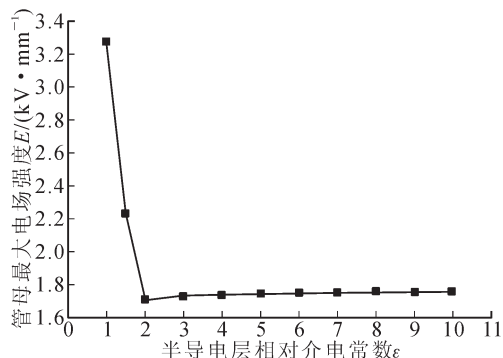


图14 管母电场最大值 $E_{\max}$ 随半导体层 ε 的变化

Fig. 14 Variation of $E_{\max}$ with ε of semiconducting layer

当半导体材料相对介电常数 ε 大于10以后,最大场强 E 随 ε 逐渐增大,但基本1.75~1.77 kV/mm范围内变化。因此,在可保证材料质量及完整性的情况下,半导体层介电常数的无限提高对改善交流电场分布意义不大,但应根据其生产工艺控制在合理范围内。

根据管母电场分布随半导体层相对介电常数 ε 的变化规律,可将管母电场的分布简要划分为图15所示的3种典型情况。当 $\varepsilon=1$ 时,电场云图显示的电场最大值分布在半导体层上,计算得到的电场最大值为3.269 kV/mm; $\varepsilon=2$ 时,电场最大值在靠近铜管母的主绝缘内侧,为1.708 kV/mm,但半导体层上的电场高于热缩管1所承受的电场;当 $\varepsilon=1\ 000$ 时,电压由聚四氟乙烯带主绝缘和热缩管1承担,电场最大值出现在靠近铜管母的主绝缘内侧,为1.767 kV/mm。

从半导体层相对介电常数对电场分布的影响可见,对于管母、电缆、电容器类的多层介质设备,各层绝缘材料、半导体材料介电常数的选择应相匹配,使设备的电场分布最优化。

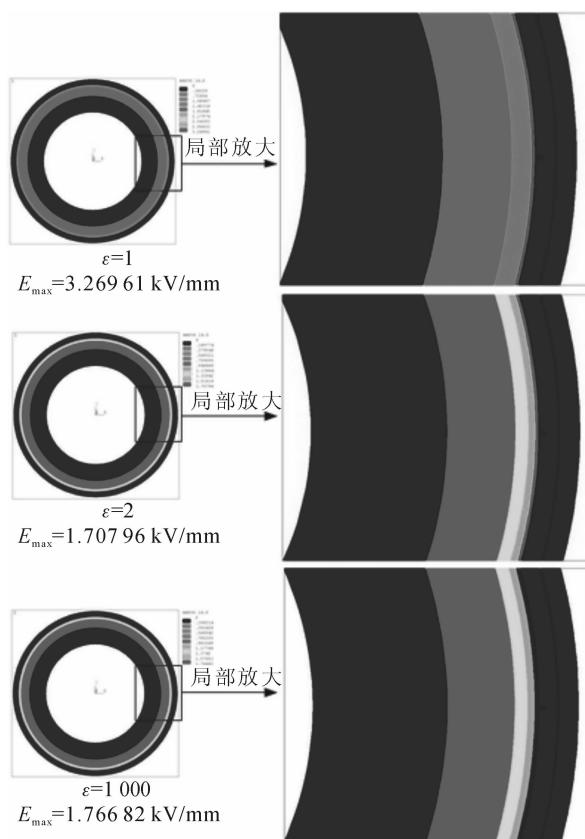


图 15 管母电场分布云图随半导体层 ε 的典型变化

Fig. 15 Typical variation of contour electric field distribution with ε of semiconducting layer

5 结论

文中以变电站所用 35 kV 融冰管母为分析对象,通过现场试验、实物解体、电场仿真分析等多种方法研究了管母运行中出现鼓包、冒烟、着火、烧蚀等现象的深层原因,通过分析得出以下结论:

1)管型母线运行异常的直接原因表现为电压型缺陷引起的局部放电,而半导体层破损是引起局部放电的根本原因。

2)半导体带的手工艺较差、铜带质量不合格是导致半导体层破损的工程原因,其实质是半导体带和铜带的施工工艺与材料质量不匹配。

3)半导体带出现破损后,破损口两端的电场强度随破损区域的增大而增大,破损口对放电或烧损朝相邻铜带发展可起到引导作用。

4)绝缘管母等多层介质设备在设计时,应使各层绝缘材料、半导体材料的介电常数相匹配,使其电场分布最优化。

综合文中的分析结果,对绝缘管母的设计及运行单位提出以下建议:

1)管母设计时外半导体层尽量采用挤出工艺,并考虑其阻燃性要求。

2)在考虑铜带承担短路电流的情况下,铜屏蔽层应采用搭接缠绕,或用铜带统包。

3)在绝缘管母类设备的运维中可采用局部放电检测,并结合红外热像仪检测管母温度的方法对管母运行状况进行判断。

参考文献:

- [1] 张北宁. 管形绝缘母线和矩形铜排母线性能比较及应用[J]. 水电与新能源, 2010(6): 60-64.
ZHANG Beining. Comparison of characteristics of insulated tubular copper busbar and rectangular copper busbar and their application[J]. Hydropower and New Energy, 2010(6): 60-64.
- [2] 姜庆密, 亓富军, 田纪法. 复合屏蔽绝缘管母线局部发热成因及案例处理[J]. 电气技术, 2013(9): 53-57.
JIANG Qingmi, QI Fujun, TIAN Jifa. The causes and case processing of composite shielding insulation tube bus local heat[J]. Electrical Engineering, 2013(9): 53-57.
- [3] 张真涛, 张 斌, 邢文涛, 等. 变压器绝缘管母护套烧损故障分析及处理[J]. 河南电力, 2012(3): 23-24.
ZHANG Zhentao, ZHANG Bin, XING Wentao, et al. Analysis and processing of burning fault on transformer insulated tube generatrix sheath[J]. Henan Electric Power, 2012(3): 23-24.
- [4] DL/T 1253—2013 电力电缆线路运行规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
DL/T 1253—2013 Code of operation for power cable line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [5] SHENG Bojie, ZHOU Wenjun, YU Jianhui, et al. On-line PD detection and localization in cross-bonded HV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2217-2224.
- [6] RODRIGO A, LLOVERA P, FUSTER V, et al. High performance broadband capacitive coupler for partial discharge cable tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 479-487.
- [7] MA X, ZHOU C, KEMP I J. Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 446-457.
- [8] SHAFIQ M, KUETT L, LEHTONEN M, et al. Parameters identification and modeling of high-frequency current transducer for partial discharge measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(3): 1081-1091.
- [9] 盛剑霓. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
SHENG Jianni. Numerical analysis of electromagnetic fields[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [10] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.

(下转第 203 页)

- 电气应用, 2012, 31(7): 74-76.
- ZUO Xinyu. Detection of GIS internal partial discharge fault using the decomposition of SF₆[J]. Electrotechnical Application, 2012, 31(7): 74-76.
- [9] 骆立实, 姚文军, 王 军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的 SF₆ 分解气体研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 225-230.
- LUO Lishi, YAO Wenjun, WANG Jun, et al. Research on partial discharge diagnosis of GIS by decomposed gas of SF₆[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 225-230.
- [10] 陈晓清, 彭华东, 任 明, 等. SF₆ 气体分解产物检测技术及应用情况[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 81-84.
- CHENG Xiaqing, PENG Huadong, REN Ming, et al. Detection technology and application of the decomposition of SF₆[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 81-84.
- [11] IEC 60480—2004 从电气设备中取出六氟化硫的检验和处理指南及其再使用规范标准[S]. 2004.
- IEC 60480—2004 Guideline for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its reuse[S]. 2004.
- [12] 庄贤盛, 李 智, 姚唯建, 等. SF₆ 电气设备放电故障检测和判断方法[J]. 广东电力, 2008, 21(12): 35-38.
- ZHUANG Xiansheng, LI Zhi, YAO Weijian, et al. Detection and judgment of discharge failures of SF₆ electrical equipment[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(12): 35-38.
- [13] 刘 永, 印 华, 姚 强, 等. 气体分析技术在 GIS 故障定位和故障类型判断中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 132-134.
- LIU Yong, YIN Hua, YAO Qiang, et al. Application of gas analysis technology in GIS fault location and fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 132-134.
- [14] BRUNT R V, HERRON J T. Fundamental processes of SF₆ decomposition and oxidation in glow and corona discharges [J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 75-94.
- [15] 龚尚昆, 陈绍艺, 周 舟, 等. 局部放电中的 SF₆ 分解产物及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 48-51.
- GONG Shangkun, CHEN Shaoyi, ZHOU Zhou, et al. Study on SF₆ decomposition products of partial discharge and its influencing factors [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 48-51.
- [16] GB/T 4787—2010 高压交流断路器用均压电容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- GB/T 4787—2010 Equalizing capacitor for high voltage circuit breaker[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [17] 刘志学. 一种断路器对地及断口绝缘故障快速监测方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 168-172.
- LIU Zhixue. Rapid monitoring method for breaker's grounding and break faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 168-172.
- [18] 孙军彦. 一起 GIS 设备放电事故的分析及处理[J]. 广西电力, 2008(2): 32-33.
- SUN Junyan. Analysis and treatment about the discharge accidents in GIS equipment[J]. Guangxi Electric Power, 2008(2): 32-33.
- [19] 葛 猛, 陶安培. 一起 SF₆ 封闭式组合电器故障的原因分析[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 95-96.
- GE Meng, TAO Anpei. Analysis of reason for a GIS fault[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 95-96.
- [20] 苏 煜, 王 薇, 张燕涛. 一起 GIS 三工位隔离开关故障原因分析及处理[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 227-231.
- SU Yu, WANG Wei, ZHANG Yantao. Analysis and treatment of the fault in GIS disconnector with three positions[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 227-231.
- 王 建(1986—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事高电压试验技术、电气设备状态监测和故障诊断方面研究。
- 章锡明(1987—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事高电压试验与绝缘技术。

(上接第 197 页)

- 版社, 2000.
- FENG Cizhang, MA Xikui. Engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [11] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海蓉, 等. ANSYS 10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- SUN Mingli, HU Renxi, CUI Hairong, et al. ANSYS 10.0 electromagnetic finite element analysis example tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] GB/T 12706.3—2008 额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件第 3 部分: 额定电压 35 kV ($U_m=40.5$ kV) 电缆[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB/T 12706.3—2008 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m=1.2$ kV) up to 35 kV ($U_m=40.5$ kV) Part 3: Cables for rated voltage of 35 kV ($U_m=40.5$ kV)[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- 张星海(1963—), 男, 博士, 高工, 主要从事输变电设备运行的研究工作。