

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.020

含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线电击穿机理研究

任 想¹, 刘 洋², 艾良斌³, 张 闯³, 于钦学³, 朱思瑞¹, 金海云³

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 绝缘管型母线是一种新型的母线产品, 有着优异的性能。但应用时间较短, 研究不够深入, 致使故障频发。文中设计与制备了含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线真型样品, 通过加压电破坏试验, 研究其电击穿机理。在试验中首次发现了气体膨胀鼓包导致最终击穿的破坏方式。研究结果表明, 电—机械击穿应为其击穿模式, 其击穿过程可分为气体增强阶段和击穿临界阶段两个阶段, 并得到了阶段特征与阶段变化判据。气隙内由局部放电导致环氧树脂分解所产生的气体气压超过气隙壁断裂韧性临界值, 造成裂纹失稳扩展是击穿的主要原因。可以通过提高环氧树脂材料的抗局部放电能力或对环氧树脂进行改性提高其断裂韧性来增强绝缘管型母线的击穿性能; 传统的检测手段难以判断击穿通道的发展状况。研究结果对于其他树脂浇注类绝缘电气设备也具有一定的参考价值。

关键词: 环氧浇注绝缘管型母线; 气泡缺陷; 击穿机理; 断裂韧性; 局部放电

Investigation of Electrical Breakdown Mechanism of Epoxy Cast Insulated Tubular Bus with Bubble Defects

REN Xiang¹, LIU Yang², AI Liangbin³, ZHANG Chuang³, YU Qinxue³, ZHU Sirui¹, JIN Haiyun³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Power Grid Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Insulated tubular bus is a novel type of bus product with excellent performance. However, the period of its application is less two decades and its research is insufficient, which resulting in many accidents. In this paper, the full-scale model of epoxy cast insulated tubular bus was designed and fabricated, and its electrical breakdown mechanism was investigated by withstand voltage test. In the experiment, the failure mode of breakdown caused by gas expansion was found for the first time. The research showed that electrical-mechanical breakdown should be its breakdown mode, and the breakdown process could be divided into two stages: gas increase stage and breakdown threshold stage. The research also obtained the characteristics and the change criteria of the two stages. The gas in the bubble defects generated from epoxy decomposition which caused by partial discharge. When the gas pressure exceeds the critical fracture toughness of the bubble defects wall, the unstable crack extension occurs, therefore, improving the ability about resistance to partial discharge of epoxy resin or improving the fracture toughness of epoxy resin by modifying would enhance the breakdown performance of insulated tubular bus. The result also showed that it was difficult to judge the development status of breakdown channel by traditional testing method. The results of this research also have reference value for other epoxy cast insulated electrical equipment.

Key words: epoxy cast insulated tubular bus; bubble defects; breakdown mechanism; fracture toughness; partial discharge

收稿日期:2018-10-08; 修回日期:2018-12-20

基金项目:国家电网公司2016年科技指南项目(52153216000S)。

Project Supported by Science and Technology Guide Project of SGCC(52153216000S).

0 引言

绝缘管型母线是一种以铜管为导体,外敷绝缘的新型母线产品,连接于主变压器低压侧与开关柜之间,作为变电站输送电能的总导线^[1-3]。相较传统的矩形母线,绝缘管型母线具有载流量大、机械强度高、电气绝缘性能强、节省占地面积等特点,在竞争中已占据优势^[4]。目前绝缘管型母线的主流绝缘结构是环氧树脂浸渍绝缘纸复合体系,该生产工艺是从欧美国家引进,已成为国内母线行业的技术标杆。但同电缆等产品相比,环氧浇注绝缘管型母线在国内应用时间较短,且缺乏技术消化与深入研究,致使近年来常有环氧浇注绝缘管型母线的故障发生,给电力系统的稳定运行埋下隐患^[5-7]。

气泡缺陷是环氧浇注绝缘管型母线主绝缘结构中最常见的缺陷:浇注环节中环氧浸渍的不充分和安装过程中的施工不慎都会在母线的绝缘层中形成气泡^[8]。在一定外施电场作用下,气泡缺陷处会发生局部放电。局部放电所产生的电、热、高能粒子效应会造成气泡壁周围材料分子链的断裂和碳化,侵蚀周遭的绝缘材料,使得气泡缺陷进一步的发展,并最终形成沿电场方向的贯穿性通道,使母线绝缘失效被击穿^[9]。

针对绝缘管型母线,国内外的研究人员已展开了相关研究^[10-12]。但当前的研究多集中在绝缘管型母线的电场仿真和静态参数测量上,并未深入研究在缺陷条件下绝缘管型母线的电击穿机理,截至目前,仍未见有相关方面的报道。通过查阅相关电击穿机理方面的资料,本文发现此前的研究对象大都是环氧树脂和交联聚乙烯片状样品^[13-15],其研究思路和研究结果可能与实际电力设备之间存在偏差。因此,文中与国内管母厂家进行合作,设计与制备了含气泡缺陷的环氧浇注绝缘管型母线样品,对样品进行电劣化破坏试验,并对含气泡缺陷绝缘管型母线的电击穿机理进行了研究。

1 样品、方案与系统

1.1 样品

试验所用缺陷样品为环氧浇注类绝缘管型母线,其绝缘体系、结构尺寸与生产工艺如下:样品母线的导体材料是T2铜,主体绝缘结构是环氧树脂绝缘纸复合绝缘体系,电容屏是含石墨的半导体材料,外部热缩套是三元乙丙橡胶材料,接地线是带铜环的编织铝带,样品实貌见图1。



(a) 绝缘管型母线径向全貌



(b) 绝缘管型母线轴向全貌

图1 绝缘管型母线样品实貌

Fig. 1 Insulated tubular bus sample morphology

样品的结构尺寸与管母生产厂家的实际销售产品相同,其工装图见图2。

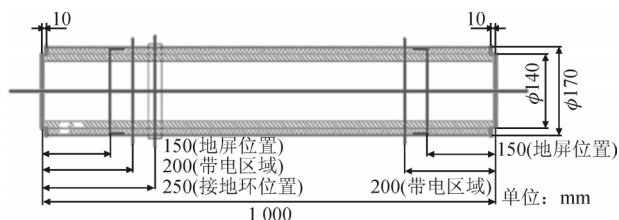


图2 样品工装图

Fig. 2 Sample tooling diagram

样品额定运行电压/电流为6 kV/6 300 A,导体长度为1 000 mm,导体外直径为140 mm,样品最大外直径为170 mm(包括热缩套厚度),绝缘层厚度约为10 mm。样品内部有等距电容屏退屏结构:0屏紧贴铜导体,距导体端部30 mm;1、2、3屏退屏距离为40 mm,屏间距约为3 mm;半导体层厚度约为0.5~1.0 mm。在距导体250 mm处的地屏(即3屏)处安装有接地环。

样品的生产工艺与厂家的实际销售产品相同,核心工艺为环氧树脂真空压力浸渍技术。样品中气泡缺陷的设置是在环氧树脂浸渍过程中利用针管在浇注孔注入一定量的空气(约为10~15 mL),破坏浇注的密闭性,在主绝缘中形成微孔气隙。

由于样品的成本较高,制造流程复杂,因此该试验只制备了一根气泡缺陷样品。样品制备完成,进行了相应的出厂试验,试验数据见表1。

表1中的局部放电起始电压与局部放电量两参数间有明显的冲突,但确为生产商出厂试验报告原值,这反映出目前管母测试标准的缺失与行业内试验过程的不规范。

表1 气泡缺陷样品出厂试验数据

Table 1 Bubble defect sample factory test data

电容量/nF	介质损耗因数/($\times 10^{-3}$)	局部放电起始电压/kV	局部放电量/pC
1.819 23	4.6	7	50

注:电容量、介质损耗因数与局部放电量的测量电压为样品的额定电压 U_N (6 kV)。

1.2 试验方案

为了研究绝缘管型母线电劣化破坏机理,利用试验变压器对管母样品长时间耐压进行电破坏,电压的有效值为 30 kV;在耐压过程中通过数字式局部放电测量仪离线测量管母样品的局部放电特征参数,推断其内部击穿通道的发展状况;在样品绝缘失效后,对样品进行解剖和故障气体提取分析。样品具体的局部放电测试方案见表 2。

表2 样品性能测试方案

测试项目	具体内容
局部放电测试	测量样品的局部放电起始电压和样品在 $1.0U_N$ 、 $1.2U_N$ 下的局部放电参数

1.3 系统

1.3.1 电破坏试验系统

样品电破坏试验采用 YDTV-50/100 kV 型交流工频高压变压器对样品施加耐压,进行电破坏。

1.3.2 局部放电测试系统

样品局部放电参数的测试方法为脉冲电流法,利用数字式局部放电测量仪 LSD-6 进行测量,为降低外界电磁干扰,整个测量过程在屏蔽室中进行,样品的局部放电信号经同轴电缆线送出。

1.3.3 逸出气体分析系统

研究使用 Thermo Fisher(赛默飞)气相色谱质谱联用仪对气体样品进行成分分析,色谱柱选择安捷伦公司生产的 GS-GasPro 毛细管柱,检测器为四级杆质量检测器。

1.3.4 显微观测系统

研究使用 VE9800 型扫描电子显微镜对样品解剖后样片进行观测。

2 结果与分析

样品的电破坏试验与绝缘特性测试试验均在室温和常压环境下进行。

气泡缺陷样品从开始电破坏到绝缘失效的总

电劣化时间为 126.5 h,失效样品表面出现了气体鼓包现象。

管型母线在电致破坏条件下绝缘失效、表面出现气体鼓包,这一现象是该类型研究首次发现(以往的破坏形式多为烧蚀或裂纹),表明其击穿不是单纯的电热过程,材料分解及机械破坏在其中起到重要作用。为了探索这一气体鼓包现象与绝缘管型母线电击穿之间的关系,有必要对鼓包内气体进行成分分析,并对样品的绝缘层进行解剖,进而对其击穿机理进行深入研究。

2.1 样品绝缘失效后逸出气体分析与外护套解剖

经历 126.5 h 电破坏后,样品绝缘失效被击穿,在两端外护套层下产生鼓包,见图 3。

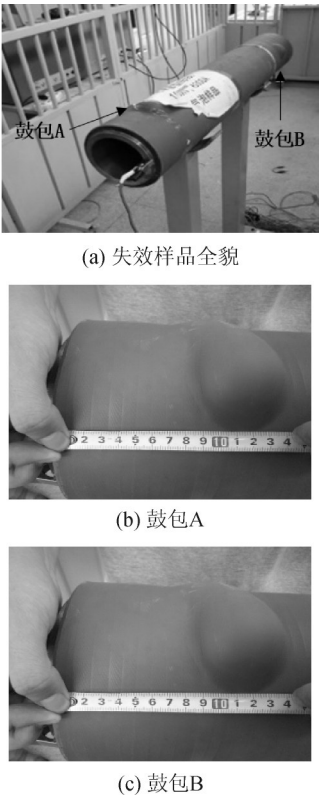


图3 样品绝缘失效后外部鼓包

Fig. 3 External bulge after sample insulation failure

图 3 中,鼓包 A 远离接地线,鼓包中心距离铜导体约 100~120 mm,形状呈类椭圆形,直径分别为 60、110 mm,鼓包膨胀程度直接有差异,远离中心点,膨胀程度减小;鼓包 B 靠近接地线,鼓包中心距离铜导体约 120~140 mm,形状接近球形,直径约为 56 mm。

为了研究鼓包内气体的成因,对鼓包内气体进行了采集,并做了气相色谱分析,色谱出峰图见图 4。

根据仪器的分析报告,样品逸出气体的起始出峰为 O_2 ;第 2 个峰群为含碳碳双键的短链烃类;第 3 个峰群对应二甲苯(C_8H_{10});第 4 个峰群对应壬烷类;第 5 个峰群为芳香烃类分子。

有一定的相似性,文[16]指出在脆性材料中,一旦裂纹已经发生,应力状态就会使裂纹开始扩展,没有可与延性材料的塑形形变相比的、大的能量吸收过程。因此,没有限制作用应力的机理,于是裂纹在均匀的应力场中继续扩展,直到完全破坏。这就是说,裂纹的发生是破坏过程的关键性阶段。

图8中的裂纹的扩展模式是典型的材料失稳破坏,究其原因是在局部放电作用下,气孔内的气体压力超过了气壁材料的断裂韧性临界值。断裂韧性临界值(K_{IC})是一个材料机械强度概念,表征试样或构件中有裂纹或类裂纹缺陷情形下发生不稳定断裂时显示的阻抗值。

以上的实验现象表面,环氧绝缘材料的破坏并不仅是单纯的电作用,也有机械破坏。

在长期的局放活动下,气泡内部气压不断上升,气泡壁所受压强也随之增强,同时局部放电对气泡内壁有侵蚀作用,其所产生的高能粒子不断破坏气壁材料的分子结构,使材料固有的断裂韧性临界值下降。在两方面的综合作用下,气泡内部气体冲破气泡壁,形成失稳扩展的裂纹,而这些微观扩展裂纹构成了宏观上样品绝缘的贯穿性通道。

2.2 电破坏过程中样品的局部放电性能

2.2.1 电破坏过程中样品的局部放电起始电压 U_i

电劣化过程中样品局部放电起始电压 U_i 随劣化时间的变化曲线见图9。

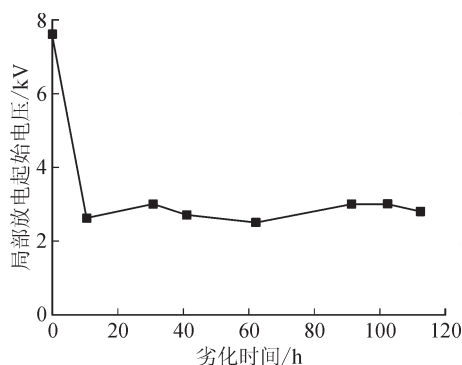


图9 样品局部放电起始电压 U_i 随破坏时间的变化曲线

Fig. 9 Sample partial discharge initial voltage U_i as a function of degradation time

由图9可知,样品的局部放电起始电压 U_i 的初始值为7.6 kV(出厂试验值为7 kV),在经历短时间电劣化作用后(10 h左右),样品的局部放电起始电压 U_i 迅速降低至2.6 kV,在此后的电劣化过程中,样品的局部放电起始电压 U_i 一直维持在这一水平,在2.5~3 kV的范围内波动。

根据气体放电的碰撞电离理论^[17],在一定气隙尺寸范围内,气体放电的特征值——有效碰撞次数 Z 是由电子的自由行程 λ 、电子碰撞次数 N 和电子在

自由行程内积累的动能 E 决定的,其中电子的自由行程 λ 和电子碰撞次数 N 与气体的浓度(即气体气压 p)相关,气体的浓度越大,电子的自由行程 λ 越小、电子碰撞次数 N 越大,电子在自由行程 λ 内积累的动能 E 与外施电场场强(即外加电压 U 的函数)有关,场强越大,电子在同样的自由行程 λ 内获得的动能 E 越大;以有效碰撞次数 Z 的某一固定值作为局部放电起始的标志,则可以得到电子的自由行程 λ 和电子碰撞次数 N ,以及电子在自由行程内积累的动能 E 的近似函数关系为

$$g(\lambda NE)=Z \quad (1)$$

在电破坏初期,样品内部的气泡缺陷处于一个低气压状态,气体稀薄,电子的自由行程 λ 虽然较大,但碰撞次数 N 较少,因此只有当气体的外施电场较强时,电子在自由行程内积累的动能足够大时,才能够产生足够的有效碰撞次数,从而表现为样品的局部放电起始电压较高(在初始阶段,样品的局部放电起始电压较高,为7 kV);随着电破坏的进行,局部放电所产生的气体分子进入气泡缺陷中,提高了气体分子的浓度,在电子自由行程变化不大的情况下,提高了电子的碰撞次数,因此当外施场强不是很高的情况下,气泡缺陷内部也能够产生足够的有效碰撞,表现为样品局部放电起始电压的下降;在随后的电破坏时间内,气泡缺陷内部气压进一步增加,电子自由行程的下降效应和电子碰撞次数的增加效应相互平衡,从而样品的局部放电起始电压持续稳定在一个较低的电压水平上(样品的局部放电起始电压维持在2~3 kV水平上),从而也可以说明在这一阶段内,气泡缺陷的范围并没有出现大的变化,即贯穿性通道并没有迅速发展。

2.2.2 电破坏过程中样品的最大视在放电量 Q_{IEC}

电破坏过程中,测量电压为 U_N 与 $1.2U_N$ 时,样品最大视在放电量 Q_{IEC} 随劣化时间的变化曲线见图10。

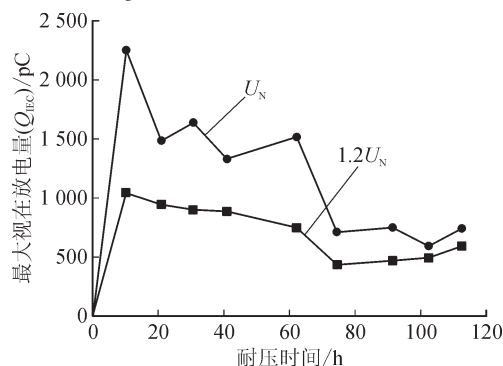


图10 U_N 、 $1.2U_N$ 测量电压下样品局部放电量 Q_{IEC} 随破坏时间的变化曲线

Fig. 10 U_N 、 $1.2U_N$ measured voltage partial discharge amount Q_{IEC} as a function of degradation time

由图10可知,电破坏前,在 U_N 、 $1.2U_N$ 的测量电压下,样品内部无局放($<2\text{ pC}$);在经历较短时间的电劣化作用后(10 h左右),样品的局部放电量 Q_{IEC} 迅速增加, U_N 测量电压下, Q_{IEC} 值为 $1\,045\text{ pC}$, $1.2U_N$ 测量电压下, Q_{IEC} 值为 $2\,253\text{ pC}$;此后,随着劣化时间的增加,样品的局部放电量 Q_{IEC} 逐渐降低,并最终维持在较稳定水平,直至样品击穿前,即破坏时间为112 h时, U_N 测量电压下,样品的 Q_{IEC} 值为 600 pC 左右, $1.2U_N$ 测量电压下,样品的 Q_{IEC} 值为 700 pC 左右;电破坏过程中,不同测量电压下样品的局部放电量 Q_{IEC} 表现出系统的差异性, $1.2U_N$ 测量电压下,样品的 Q_{IEC} 值高于 U_N 测量电压下的测量值,两者的差距在劣化最初阶段达到最大,约 $1\,200\text{ pC}$ 左右,随着破坏的进行,两者差距逐渐减小到 $200\sim 300\text{ pC}$ 范围内。

样品局部放电量的变化规律除了与气泡缺陷内气体的气压相关外,还与气泡内壁的表面状态有关。参阅相关电树枝^[18-20]资料,在气泡内壁完整性未被破坏的情况下,气泡内壁粗糙,则局部放电活动距离,局放量较大;在气泡内壁光洁甚至出现碳化层的情况下,气泡内壁的局部放电活动往往被抑制,局放量也相应的减小。这一过程表现为在电破坏阶段,样品在 U_N 和 $1.2U_N$ 测量电压下,局放量的逐渐下降。

2.3 样品电破坏机理分析

根据上述试验现象和试验数据,文中建立了含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线电击穿的电—机械模型:气泡缺陷内的局部放电效应使得绝缘材料的大分子被破坏、性能劣化,同时产生短链分子气体进入气泡气隙,在气隙内形成高压,反过来作用气隙内的局部放电活动,最终气隙内由局部放电导致环境树脂分解所产生的气体气压超过气隙壁断裂韧性临界值(K_{IC}),造成裂纹失稳扩展,并导致气泡缺陷绝缘管型母线被破坏击穿。

气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线的击穿过程可以分为气体增强阶段和击穿临界阶段:在气体增强阶段,主要的特点是气泡缺陷被限制在一定的范围内,无贯穿性击穿通道形成,气泡内的气压一直在持续增加,表现为局部放电起始电压的下降并保持稳定和局部放电量的持续下降,如图9、10所示。

在气体增强阶段,局部放电的作用除了增强气泡缺陷内的气压外,另一个则是对气泡内壁进行侵蚀作用,在改善气泡内壁光滑度的同时,不断破坏气壁上绝缘材料的分子链,造成气壁上绝缘材料的电气性能和机械性能的下降。

气体增强阶段是气泡缺陷环氧浇注绝缘管型

母线电击穿的第1阶段,也是设备击穿的长时阶段。在样品总计126.5 h的电破坏时间内,根据局部放电的测量结果可以得知,至少在115 h的时间中,样品都处于气体增强阶段。

当气泡缺陷内的气体增强到一定程度,超过气泡壁的断裂韧性临界值时,电破坏则转入击穿临界阶段。击穿临界阶段的主要特征是气泡缺陷壁被破坏,周遭绝缘材料进入失稳破坏,产生裂纹迅速扩展,最终贯穿绝缘层,样品被击穿,气体逸出。由于本次样品缺陷设置为含气泡缺陷样品,局部放电活动剧烈,且含气量较大,因此表现为护套层下有明显的气体鼓包。电破坏转入击穿临界阶段在本质上是气泡缺陷内局部放电活动积累的效果^[21-22],气泡内气体气压的上升与气壁材料固有断裂韧性临界值的下降最终导致气泡内部气体冲破气泡壁,形成快速发展的击穿通道。

击穿临界阶段是含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线电击穿的第2阶段,也是一个短时阶段。即便在样品击穿前夕,也未出现气泡壁被破坏,击穿通道快速形成的现象,样品的局部放电测量结果依旧保持原有规律。

从上述实验结果与分析可知,电—机械联合作用是样品破坏的主要原因,如想提高环氧树脂绝缘管型母线的电击穿性能,需增强环氧树脂绝缘材料的抗局放能力及其材料本征的断裂韧性值。

此外,样品转入击穿临界阶段是难以通过传统的非破坏检测方法检测出来,无论是在局部放电测量结果上,还是样品的外观观测上,都难以发现这一端倪,这即解释了当前管母故障频发的原因,又表明了从内在机理上研究绝缘管型母线电击穿过程的重要性。

3 结论

通过实验研究,针对环氧浇注类绝缘管型母线,得到以下结论:

1)含气泡缺陷绝缘管型母线的电击穿应是电—机械联合作用的结果,其中贯穿性击穿通道的形成是一个突变的过程。

2)含气泡缺陷绝缘管型母线击穿的主要原因是局部放电产生的气隙气压超过了气隙壁的断裂韧性临界值,因此可以通过提高环氧复合材料的抗局放能力和加强环氧复合材料的断裂韧性来增强气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线的电击穿性能。

3)通过传统的检测手段很难判断含气泡缺陷环氧浇注绝缘管型母线是否转入击穿临界阶段,可以

开发新型检测技术来判断气泡气压和气壁强度。

研究结果对于其他树脂浇注类绝缘电气设备也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 黎斌, 于欣, 全志红, 等. 对中国有机绝缘管形母线的回顾与展望[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 9-17.
LI Bin, YU Xin, TONG Zhihong, et al. Review and prospect of the organic insulated bus in China[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 9-17.
- [2] 郎进平, 田永彪. 全屏蔽绝缘管型母线在 10 kV 大电流输电线路的应用[J]. 电工技术, 2014(1): 72-73.
LANG Jinping, TIAN Yongbiao. Application of full screen insulated tubular busbar in 10 kV high current transmission line[J]. Electric Engineering, 2014(1): 72-73.
- [3] 阮玲, 李成磊, 杨帆, 等. 绝缘管型母线的发展现状及研究动向[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 43-53.
RUAN Ling, LI Chenglei, YANG Fan, et al. Development status and research trend of insulated tubular bus[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 43-53.
- [4] 宋邦申. 绝缘管型母线的性能优势及存在问题分析[J]. 电工电气, 2015(1): 60-61.
SONG Bangshen. Performance advantages and existing problems of insulated busbar[J]. Electrical and Electric, 2015(1): 60-61.
- [5] 陈贤熙, 李国伟. 一起变压器变低全绝缘管型母线绝缘缺陷综合分析[J]. 中国电业(技术版), 2014(11): 25-28.
CHEN Xianxi, LI Guowei. Comprehensive analysis on insulation defects of fully insulated tubular bus at low voltage side of the transformer[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(11): 25-28.
- [6] 杨帆, 张耀东, 周启义, 等. 一起绝缘管型母线故障的综合缺陷分析及防范措施[J]. 湖北电力, 2015, 39(8): 42-44.
YANG Fan, ZHANG Yaodong, ZHOU Qiyi, et al. Comprehensive defect analysis and preventive measures for an insulated busbar fault[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(8): 42-44.
- [7] 陈德会. 风电汇集站全绝缘管型母线击穿分析[J]. 电站系统工程, 2018, 34(6): 81-82.
CHEN Dehui. Breakdown analysis of full-insulated tubular busbar in wind power gathering station[J]. Power System Engineering, 2018, 34(6): 81-82.
- [8] 王建华. 环氧树脂绝缘件气孔形成原因分析及改进措施[J]. 上海电气技术, 2014, 7(4): 12-14.
WANG Jianhua. The reasons and solutions of the insulator air hole[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2014, 7(4): 12-14.
- [9] 邱昌荣, 曹晓珑. 电气绝缘测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [10] 刘凤莲, 薛志航, 邓元实, 等. 绝缘管型母线运行特性及状态评估方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4088-4095.
LIU Fenglian, XUE Zhihang, DENG Yuanshi, et al. Operating characteristics and state evaluation methods for insulated tubular busbar[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4088-4095.
- [11] 张亮, 李军浩, 谭家勇, 等. 绝缘铜管母线接头处沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 94-98.
ZHANG Liang, LI Junhao, TAN Jiayong, et al. Characteristics of surface partial discharge on joint of insulated copper busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 94-98.
- [12] 邱太洪, 王俊波, 李国伟, 等. 局放检测技术在 10 kV 管型母线故障检测中的应用[J]. 绝缘材料, 2015, 48(4): 69-72.
QIU Taihong, WANG Junbo, LI Guowei, et al. Application of partial discharge detection technology in fault detection of 10 kV tubular busbar[J]. Insulating Materials, 2015, 48(4): 69-72.
- [13] 常文治, 李成榕, 苏鎡, 等. 电缆接头尖刺缺陷局部放电发展过程的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 192-201.
CHANG Wenzhi, LI Chengrong, SU Qi, et al. Study on development of partial discharges at the defect caused by a needle damage to a cable joint[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 192-201.
- [14] CHAMPION J, DODD S, STEVENS G. Analysis and modeling of electric tree growth in synthetic resins over a wide range of stressing voltage[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2007, 33(12): 14-18.
- [15] 陈向荣, 徐阳, 徐杰, 等. 工频电压下 110 kV XLPE 电缆电树枝生长及局放特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2436-2443.
CHEN Xiangrong, XU Yang, XU Jie, et al. Propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in 110 kV XLPE cable insulation at power frequency applied voltage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2436-2443.
- [16] KINGERY W D, BOWEN H K, UHLMANN D R. Introduction to ceramics[M]. 2nd ed. Wiley International Science, 1976.
- [17] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
JIN Weifang. Dielectric physics[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [18] XIE A S, ZHENG X Q, LI S T, et al. Investigations of electrical Trees in the inner layer of XLPE cable insulation using computer-aided image recording monitoring[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 685-693.
- [19] 周利军, 成睿, 江俊飞, 等. 局部气压对交联聚乙烯电

- 缆电树枝生长特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2650-2656.
- ZHOU Lijun, CHENG Rui, JIANG Junfei, et al. Influence of partial air pressure on the growth characteristics of electrical tress in XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2650-2656.
- [20] 陶文彪, 朱光亚, 宋述勇, 等. 交联聚乙烯中丛状电树枝的生长机制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 4004-4012.
- TAO Wenbiao, ZHU Guangya, SONG Shuyong, et al. The growth mechanism of brush-type electrical tree in XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 4004-4012.
- [21] 严家明, 廖瑞金. 利用局部放电相位分布分析油浸绝缘纸损伤[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2488-2493.
- YAN Jiaming, LIAO Ruijin. Analysis of damage on oil-impregnated insulation paper using phase distribution of partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2488-2493.
- [22] 任双赞, 吴经锋, 杨传凯, 等. 加速老化下油纸绝缘气隙缺陷模型放电的特征演化与参量表征研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 213-219.
- REN Shuangzan, WU Jingfeng, YANG Chuankai, et al. Evolutional behavior and parameters characterization of partial discharge from a cavity defect in oil/paper insulation under aging conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 213-219.
- 任 想(1990—), 男, 工程师, 博士, 从事高电压试验技术、高电压绝缘、冲击电压量值溯源等方面的研究。
- 金海云(1990—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电气功能材料的应用及其特性的研究。

《高压电器》2019年4期广告单位

彩色广告

封一: 珠海经济特区恒迪科技有限公司

封二: 中骏智能电气科技股份有限公司

封三: 史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司

封四: 上海乐研电气有限公司

前插1: 宁波天安智能电网科技股份有限公司

前插2: 珠海思创电气有限公司

前插3: 陕西维柯瑞电气有限责任公司

前插4: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插5: 西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

前插6: 陕西泰普瑞电工技术有限公司

前插7: 攀时(上海)高性能材料有限公司

前插8: 西安高压电器研究院有限责任公司(业务)