

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.009

40.5 kV 开关柜穿墙套管安装使用关键技术研究

冷兆云¹, 陈平¹, 张书浩², 顾寅¹, 缪金¹, 李东¹, 周鑫阳¹

(1. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000; 2. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 穿墙套管是40.5 kV空气绝缘开关柜的核心元器件之一,其绝缘性能决定了开关柜的绝缘水平。文中通过对穿墙套管的多起典型事故原因进行深入分析研究,明确了套管在安装使用过程中的关键技术。针对套管在选型和安装使用过程中出现的典型事故原因,提出了相应的预防措施。

关键词: 穿墙套管; 双屏蔽; 选型; 电场仿真

Research on Key Technologies of Installation and Use of 40.5 kV Switchgear Wall Bushing

LENG Zhaoyun¹, CHEN Ping¹, ZHANG Shuhao², GU Yin¹, MIAO Jin¹, LI Dong¹, ZHOU Xinyang¹

(1. State Grid Wuxi Power Supply Company, Jiangsu Wuxi 214000, China; 2. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Wall bushing is one of the core components of 40.5 kV air-insulated switchgear, and its insulation performance determines the insulation level of the whole switchgear. In this paper, the key technologies of bushing installation and use are clarified through in-depth analysis and research on the causes of many typical accidents of wall bushings. Corresponding preventive measures are proposed for the typical causes of accidents in the process of bushing selection and installation.

Key words: wall bushing; double shielding; selection; electric field simulation

0 引言

日益增长的用电需求对电力开关设备的设计制造、安装使用和运行维护提出了更高要求,其中,40.5 kV交流金属封闭开关柜在配电网中承担着重要的配电和保护功能,其绝缘、控制、保护和监测等性能对系统安全运行意义重大。根据运行部门统计,在高压开关柜诸多故障类型中,以绝缘故障占比最高,尤其是40.5 kV开关柜的绝缘故障占比超过80%,其中,绝缘件的安装、使用不规范及其运行环境恶劣是开关柜绝缘故障的关键因素之一。

以常规的KYN61-40.5kV开关柜为例,该柜使用的绝缘件主要有穿墙套管、触头盒、支柱绝缘子和支柱传感器。其中,现场运行过程中出现问题较多的就是穿墙套管,因为,无论从结构设计、电场分布、与其他元器件的绝缘配合,还是从安装使用、对运行环境的要求等方面,穿墙套管都更容易出问题。

由于前期40.5 kV开关柜穿墙套管的设计、生产制造、安装使用和运行维护存在一定的缺陷。随着运行时间的增加和缺陷的积累发展,近年来,40.5 kV开关柜因穿墙套管安装使用缺陷造成沿面爬电、绝缘击穿和直至短路故障等恶性事故^[1-8]时有发生,给安全生产造成了恶劣的影响。

有关穿墙套管的设计、结构优化和电场分析等方面的文献较多^[9-16],针对穿墙套管的安装使用、运行环境要求和运行维护等方面的专业论述见之较少。通常情况下,元器件组装到开关柜内之前,都要经过严格检验,完成安装的成套设备也要经过标准规定的各项出厂检验,合格后方可出厂;开关柜投运前还要进行严格的交接试验,合格后方可投入电网运行。所以说,新投运的开关柜都是经过检验合格的,但是,这些合格的开关柜在不同运行环境下运行一段时间后,或多或少出现一些绝缘问题,这些问题绝大部分都和现场安装不规范和运行环

境恶劣有关。

文中通过对开关柜穿墙套管的多起典型事故进行深入分析,找出其关键因素,并提出切实可行、便于操作的事事故预防措施,确保40.5 kV穿墙套管的绝缘性能及其配套开关柜的安全可靠运行。同时,也为开关柜成套厂家和运维人员提供一定的参考和借鉴。

1 穿墙套管的典型结构

目前,40.5 kV开关柜穿墙套管的常见结构形式是双屏蔽结构,见图1,这种结构的套管主要由安装螺母、低压屏蔽网、环氧树脂、高压屏蔽网和高压引线组成。其中,环氧树脂是主绝缘介质,起绝缘和支撑作用;低压屏蔽网的主要作用是将地电位引入到环氧树脂;高压屏蔽网的主要作用是将高电位引入到环氧树脂、与低压屏蔽网一起构成双屏蔽结构,将电力线引入到环氧树脂中,使电场分布比较合理;高压引线主要是使母排与高压屏蔽网等电位连接,安装螺母用来将套管固定在金属安装板上。

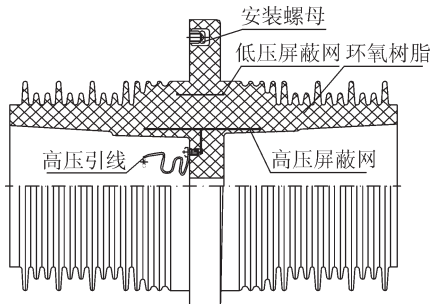


图1 双屏蔽穿墙套管的典型结构

Fig. 1 Typical structure of double shielding wall bushing

2 穿墙套管的典型事故分析

2.1 高压引线与套管内壁接触引起放电

在穿墙套管的安装使用过程中,如果高压引线的安装和固定不规范,就容易造成高压引线距离套管内壁太近或直接接触,此时,在高压引线与套管内壁距离最小处或接触点附近就会形成三介质(环氧树脂、空气、高压引线绝缘层),而造成高压引线附近的电场发生畸变和增大,在运行电压下持续的放电,特别是出现过电压、存在潮湿、凝露和污秽时,放电会更严重,这种放电随着时间的累积会造成绝缘老化加速,严重时会造成套管内部闪络、击穿短路等故障。高压引线对内壁放电见图2,由于高压引线与套管内壁接触已造成严重的放电,环氧树脂已局部老化严重、形成放电后留下的白色痕迹,上面的粉末是高压引线的铜导体在潮湿的环境下锈蚀造成的。

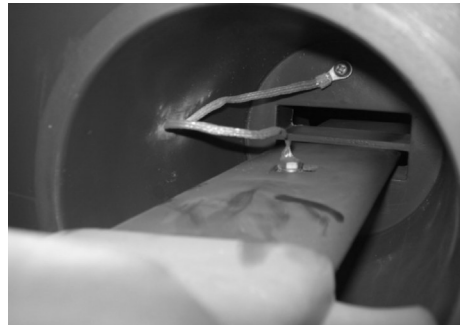


图2 高压引线对内壁放电

Fig. 2 High-voltage lead discharges to the inner wall

2.2 高压引线超出屏蔽范围引起的放电

由图1可知,双屏蔽穿墙套管内部同时具有高压屏蔽网和低压屏蔽网,这两个屏蔽网的关键尺寸(长度和直径)由制造厂家设计确定,由于制造厂家不同,其关键尺寸、特别是高压屏蔽网的高度尺寸一般都不同,高压屏蔽网的屏蔽范围不超过其长度,见图3。如果套管制造厂家没有明确给出高压屏蔽范围、或者即使给出屏蔽范围,安装使用时如果没有按要求装配高压屏蔽线,很容易造成高压引线的固定位置超出其高压屏蔽范围,造成运行电压下的持续放电,现场发现的问题照片见图4,高压引线的固定点已超出套管端部,远远超出其高压屏蔽网的屏蔽范围。

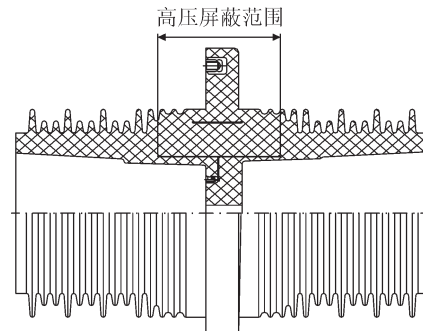


图3 套管的高压屏蔽范围

Fig. 3 High voltage shielding range of bushing

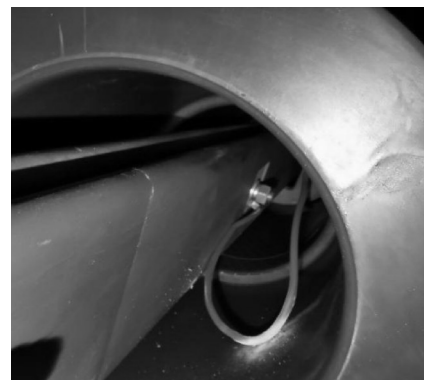


图4 高压引线安装位置超出其屏蔽范围

Fig. 4 High-voltage lead is installed beyond its shielding range

2.3 高压引线悬浮引起套管短路击穿

穿墙套管的高压屏蔽网要想达到高压屏蔽的作用, 必须将高压屏蔽网与高压母排通过高压引线等电位、可靠连接。目前, 高压引线大部分采用带硅橡胶绝缘层的软电缆线制作, 同时, 在其两端分别压接 OT 端子, 通过螺栓将 OT 端子分别固定在套管和母排上。如果, 高压引线与母排或套管连接不牢固、或松动, 就会造成高压屏蔽网虚接而悬浮, 无法将高压引入环氧树脂、达不到双屏蔽的效果。在潮湿、凝露和污秽综合作用下, 高压屏蔽网附近的空气中电场分布发生畸变而增大, 在运行电压下持续放电, 加速环氧树脂和母排绝缘层的老化, 严重时会造成母排对套管短路、烧损开关柜, 引起大面积的停电, 其典型事故缺陷见图 5。

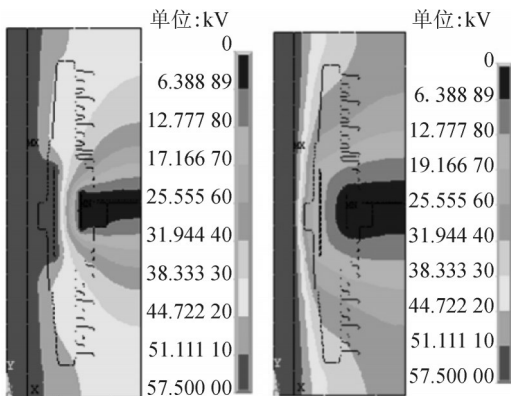


(a) 热熔引起悬浮 (b) 高压引线悬浮造成套管炸裂

图 5 套管安装典型缺陷

Fig. 5 Typical defects of bushing installation

为了进一步验证高压屏蔽悬浮造成的电场分布畸变, 分别对图 1 所示的双屏蔽套管正常接线和高压引线悬浮两种工况进行二维轴对称电场仿真分析^[17-18]、对比, 加载电压为最高运行电压值的峰值 57.5 kV ($40.5 \times \sqrt{2} \approx 57.5$ kV) 时, 两种工况下的电场分布分别见图 6-9。

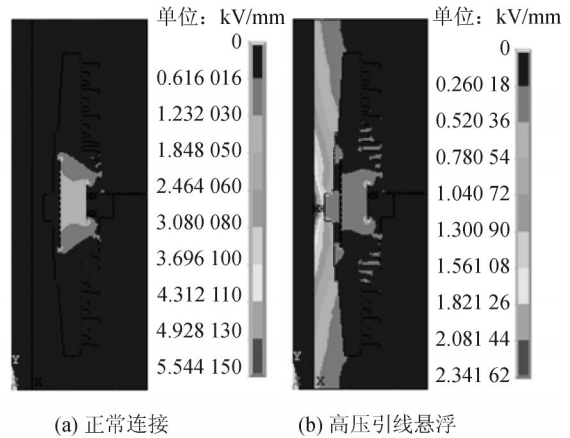


(a) 正常连接 (b) 高压引线悬浮

图 6 整体电压分布

Fig. 6 Overall voltage distribution

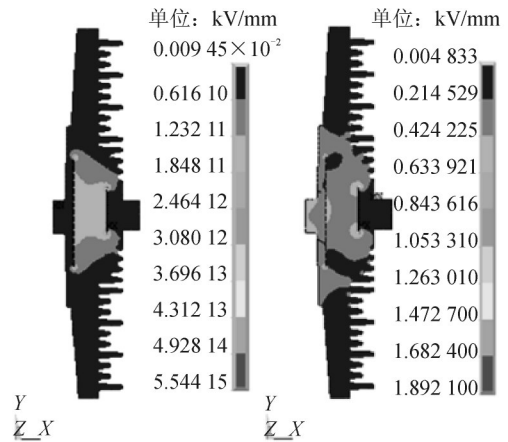
从图 7-10 的电场分布图中可以看出: 正常接线时电场集中在环氧树脂中, 环氧树脂中的电场场强为 5.54 kV/mm、空气中的电场强度为 1.08 kV/mm,



(a) 正常连接 (b) 高压引线悬浮

图 7 整体电场分布

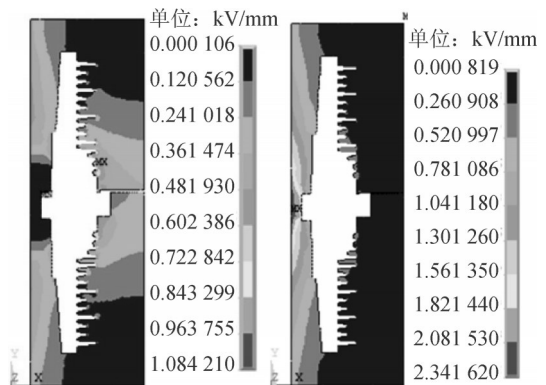
Fig. 7 Overall electric field distribution



(a) 正常连接 (b) 高压引线悬浮

图 8 环氧树脂中电场分布

Fig. 8 Electric field distribution in epoxy resin



(a) 正常连接 (b) 高压引线悬浮

图 9 空气中电场分布

Fig. 9 Electric field distribution in air

符合充分利用环氧树脂高介电强度的原则; 高压悬浮时, 电场集中在空气中, 环氧树脂中的电场强度为 1.89 kV/mm、空气中的电场强度为 2.34 kV/mm, 已远超空气的平均击穿场强 1.5 kV/mm (最高运行电压下), 极易产生放电, 绝缘利用系数大大降低。因此, 为了保证双屏蔽套管安全运行, 安装使用时严禁高压屏蔽网悬浮、且高压引线必须与母排可靠等电位

连接。

2.4 绝缘包盒引起套管放电

运行现场经常发现,在主母排与支排搭接处的绝缘包盒深入到套管的内侧、甚至与套管内壁接触、同时绝缘包盒与套管端部的环氧树脂存在电位差而引起放电、绝缘老化、绝缘水平降低的现象。究其原因,主要有支排搭接位置距离套管太近、绝缘包盒本身尺寸不合适、主母排没有位于套管的中心而偏向一侧或者绝缘包盒安装不规范等几方面的原因,图10所示的故障照片主要是绝缘包盒尺寸不合理和距离套管端部太近造成的。图10中显示绝缘包盒与套管接触的环氧部分已出现严重的绝缘老化,环氧表面残存大量白色的放电和电痕化痕迹,此种情况如果不能及时发现和处理,很快就会发展成高压母排对套管安装板的短路击穿,后果不堪设想。

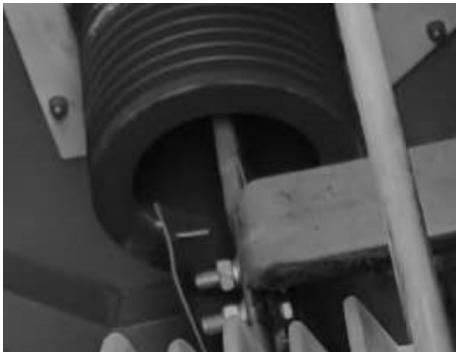


图10 绝缘包盒对套管放电

Fig. 10 Insulation box discharges to bushing

2.5 套管选型不合理引起放电

穿墙套管与装配有关的尺寸有安装法兰上的4个安装固定孔、套管总高度以及套管内腔穿过母排的母排孔。其中,安装固定孔和套管总高度是根据开关柜的整体布局确定的,一般不会出问题;容易出问题的是套管内腔的母排孔的大小选择不合理,造成母排不居中,见图11。由于母排孔太小,导致母排与套管内壁的距离太小、严重时已经接触上,此处形成三介质点(空气、环氧树脂和热缩管或硫化层),场强急剧增大,局部放电严重,最终导致使热缩管或硫化层逐渐老化、碳化、生成电树枝直至失去绝缘作用而击穿。

2.6 运行环境引起放电

按照标准要求,所有投运的开关柜(包含穿墙套管)都是经过出厂试验、且检验合格的产品。但是,这些开关柜投运一段时间后(短则半年,长则数年)经常出现各种各样的沿面放电、绝缘老化、甚至短路击穿事故。经过综合分析和研究,除了前面提到的几种典型事故原因外,很大一部分穿墙套管故障是与现场运行环境密切相关。特别是运行在沿海、

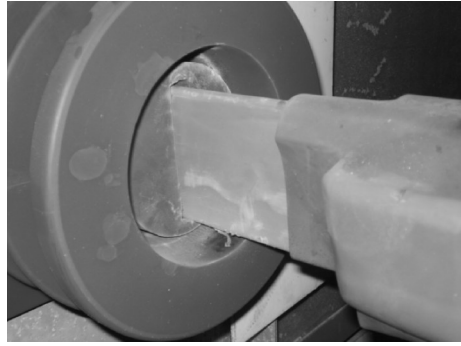


图11 套管母排孔选型不合理造成放电

Fig. 11 Unreasonable selection of bushing busbar holes causes discharge

山区或污秽严重地区的套管,如果开关室内或者开关柜内没有采取有效的除湿措施,由于这些地区空气湿度较大、空气中的盐分含量较高、昼夜温差较大,很容易在套管表面形成凝露。凝露与污秽相结合后就会在套管表面形成一层薄薄的半导体层,半导体层的绝缘电阻下降和局部电场增大引起泄漏电流增大和局部放电。增大的泄漏电流和局部放电产生的热量会促使套管的局部表面温度升高;局部的高温高热促使空气中氧与其他化学成分与局部放电部位的环氧树脂发生反应,导致环氧树脂材料分解后表面变白,现场事故照片见图12。在进一步放电热量作用下,环氧表面粗化,表面粗化后的环氧表面电场更容易发生局部放电,加剧的局部放电使表面变黑、碳化。由于电场集中不断地发生局部放电现象,促使局部放电现象在环氧树脂表面沿着电场方向延伸和发展,随着放电和老化的不断发展,严重时最终发展成高压和地之间的贯穿性放电而导致绝缘击穿。

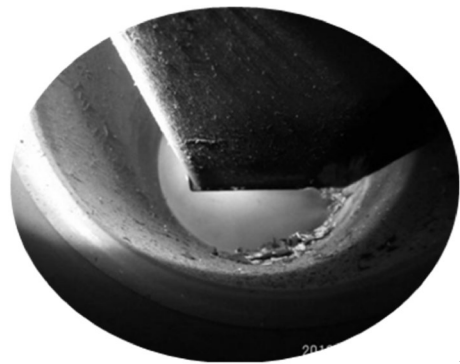


图12 运行环境恶劣引起套管放电和老化

Fig. 12 Bad operating environment causes bushing discharge and aging

3 套管事故的预防措施

3.1 套管选型事故预防措施

40.5 kV 套管的选型主要由开关柜成套厂家确

定,在选型时需要综合考虑开关柜的柜宽、柜深和柜高,以及套管安装处的空间、与母排和支排的装配空间、与触头盒和支柱绝缘子绝缘配合等多种因素。针对常规的1.4 m和1.2 m两种柜型,额定电流分别为1 250 A和2 500 A的柜子应选用合适的套管,除了安装尺寸符合要求外,套管的总高和内腔母排孔尺寸是关注的重点,确保套管与其他绝缘件之间、套管与高压母排之间留有合理的绝缘净距。根据多年的运行经验,建议常规开关柜选用总高度为395 mm、安装法兰居中的通用型套管。

3.2 套管安装事故预防措施

对于双屏蔽套管,现场安装出现问题较多的是由于套管的高压引线安装不规范引起的绝缘事故。如前文所述,主要有高压引线安装不规范造成高压引线与套管内壁距离太近、高压引线超出了高压屏蔽的屏蔽范围,或者高压屏蔽线没有与母排可靠连接造成悬浮、引起电场分布发生畸变而增大。因此,为了规范双屏蔽套管的安装使用,预防因安装不规范造成运行中的套管存在绝缘隐患,确保系统安全可靠运行,采取以下预防措施:

- 1)高压引线采用截面积不低于 2.5 mm^2 的多股软铜线、绝缘层为硅橡胶的软电缆线。
- 2)高压引线必须与母排等电位可靠连接,防止因虚接造成高压屏蔽网悬浮。
- 3)高压引线应全部位于高压屏蔽网的屏蔽范围内,不能超出其屏蔽范围,见图3。
- 4)高压引线应尽量靠近母排、远离套管内壁,严禁靠近内壁或与内壁接触,其典型接线见图13。



图13 双屏蔽套管高压引线典型接线

Fig. 13 Typical wiring of double shielded bushing high voltage lead

5)套管的全部固定螺母应用合适的金属螺栓固定牢靠、且全部可靠接地。

3.3 套管运行环境事故预防措施

由于套管的运行环境复杂多样,有的运行在沿

海地区、有的运行在内陆,有的运行山区、有的运行高原,因此,应针对不同的运行环境和运行工况采取相应的、具体的预防措施。但是,为了套管的运行安全,需要重点关注以下套管事故的预防措施:

- 1)高压开关室内应安装和配备足够的空调设备和除湿设备,同时,安装温度和湿度控制器,温度和湿度达到设定值自动投入空调和除湿设备,确保开关柜和套管的运行环境无凝露现象发生。
- 2)开关柜与进出线电缆之间的电缆沟或其他接口部位做好防潮封堵,防止柜外的潮气进入柜内。
- 3)开关柜内应配备合适的加热器和除湿设备,且布局合理,防止柜内出现凝露现象。
- 4)高压开关柜室的门和窗户需要做好密封措施,防止室外的灰尘、污秽或腐蚀性颗粒进入室内,同时,按规定的时间定期进行室内外通风和清洁,确保开关柜运行在干燥、无污秽、无凝露的安全环境中。

4 结论

文中针对40.5 kV开关柜用穿墙套管在安装使用过程中出现典型事故进行原因分析,并提出相应的预防措施,得出以下几点结论:

- 1)40.5 kV开关柜用双屏蔽穿墙套管高压引线的安装和固定位置决定着其绝缘运行可靠性,应严格按照规范要求固定和可靠等电位连接。
- 2)套管的合理选型是预防套管事故的有力保证。
- 3)恶劣的运行环境是众多套管事故的直接诱因,确保套管良好的运行环境是预防其事故频发的关键措施之一。

参考文献:

- [1] 杨定乾,陈 赟,丁 杨,等. 典型40.5 kV穿柜套管绝缘击穿案例仿真和分析[J]. 高压电器,2017,53(12):221-228. YANG Dingqian, CHEN Yun, DING Yang, et al. Simulation and analysis for typical insulation breakdown faults of bushing through 40.5 kV cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 221-228.
- [2] 刘玉春,郎福成,谭东现,等. 40.5 kV套管事故分析及结构优化[J]. 电瓷避雷器,2015(12):39-42. LIU Yuchun, LANG Fucheng, TAN Dongxian, et al. Fault analysis and structure optimization of 40.5 kV wall bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(12): 39-42.
- [3] 孔 灿,张大宁,田 杰,等. 110 kV变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J]. 智慧电力,2020,48(4): 119-124. KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform

- moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 119-124.
- [4] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [5] 杜岩伟,郑卫东,罗道军,等. CWB-35型穿墙套管内腔放电原因分析[J]. 河南电力, 2011(1): 40-41.
DU Yanwei, ZHENG Weidong, LUO Daojun, et al. Analysis about the cavity discharge of CWB-35 wall bushing[J]. Henan Electric Power, 2011(1): 40-41.
- [6] 徐国浩. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范对策[J]. 中国科技信息, 2006(14): 94-95.
XU Guohao. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. China Science and Technology Information, 2006(14): 94-95.
- [7] 耿伟,鲁永. 一起35 kV开关柜内部受潮放电的原因分析及处理[J]. 电气开关, 2008(4): 65-66.
GENG Wei, LU Yong. The cause analysis and treatment of a inner discharge case caused by moistened 35 kV switchgear[J]. Electric Switchgear, 2008(4): 65-66.
- [8] 黄晓胜. 预防10~35 kV金属封闭开关柜事故措施[J]. 云南电力技术, 2010(1): 48-49.
HUANG Xiaosheng. Prevention 10~35 kV metal-enclosed switchgear accident measures[J]. Yunnan Electric Power, 2010(1): 48-49.
- [9] 施荣,霍锋,万小东,等. 750 kV复合横担外绝缘特性试验研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 70-76.
SHI Rong, HUO Feng, WAN Xiaodong, et al. Experimental research on external insulation of composite cross-arm for 750 kV transmission line[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 70-76.
- [10] 任敬国,辜超,师伟,等. 110 kV GIS设备主回路绝缘试验电气参量估算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 103-109.
REN Jingguo, GU Chao, SHI Wei, et al. Research on evaluation method of electric parameters of 110 kV GIS main circuit insulation test[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 103-109.
- [11] 王海燕,朱志豪,费翔,等. 40.5 kV空气绝缘开关柜穿墙套管电场优化与结构设计[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 59-63.
WANG Haiyan, ZHU Zhihao, FEI Xiang, et al. Electric field optimization and structure design of wall bushing in 40.5 kV air-insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 59-63.
- [12] 贾勇勇,杨景刚,高山,等. 高压开关柜内部电场仿真及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 154-160.
JIA Yongyong, YANG Jinggang, GAO Shan, et al. Analysis of electric field simulation and its influencing factors in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 154-160.
- [13] 韩筛根,曹彬,黄强,等. 40.5 kV穿墙套管电场分析及屏蔽优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 113-118.
HAN Shaigen, CAO Bin, HUANG Qiang, et al. Electric field analysis and shielding optimization of 40.5 kV wall-bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 113-118.
- [14] 邓虎,彭彦卿,游一民,等. 穿墙套管的屏蔽仿真及优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2015, 23(5): 41-45.
DENG Hu, PENG Yanqing, YOU Yimin, et al. Simulation and design optimization of the shielding wall bushing[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2015, 23(5): 41-45.
- [15] 王文峰,张清杰,蒋立齐. 40.5 kV开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术, 2011, 33(2): 20-21.
WANG Wenfeng, ZHANG Qingjie, JIANG Liqi. Electric field analysis and optimization design of 40.5 kV switchgear wall bushing[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2011, 33(2): 20-21.
- [16] 孙海涛,雷颖,陈德桂,等. 中压C-GIS中穿墙套管的电场数值计算及优化设计[J]. 高压电器, 2001, 37(3): 6-8.
SUN Haitao, LEI Ying, CHEN Degui, et al. Electric field simulation and structure optimization of the wall bushing in medium voltage C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(3): 6-8.
- [17] 唐兴伦,范群波. Ansys工程应用教程热与电磁学篇[M]. 北京:中国铁道出版社, 2003.
TANG Xinglun, FAN Qunbo. Ansys engineering application course heat and electromagnetics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [18] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Power Press, 2007.
- 冷兆云(1982—),男,硕士,高级工程师,技师,从事变电一次检修技术工作(通信作者)(E-mail:yun821016@163.com)。
- 陈平(1982—),男,硕士,高级工程师,技师,从事变电一次检修技术工作。
- 顾寅(1986—),男,硕士,工程师,技师,从事变电一次检修技术工作。
- 缪金(1988—),男,硕士,工程师,技师,从事变电一次检修技术工作。
- 李东(1972—),男,本科,工程师,高级技师,从事变电一次检修技术工作。
- 周鑫阳(1987—),男,本科,工程师,技师,从事变电一次检修技术工作。