

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.010

40.5 kV 空气绝缘开关柜穿墙套管关键技术研究

张卓¹, 苏迪², 陈志刚², 丁同奎²

(1. 国网河南省电力公司, 郑州 450018; 2. 国网郑州供电公司, 郑州 450052)

摘要: 穿墙套管是40.5 kV空气绝缘开关柜的核心零部件之一,其绝缘性能严重影响了整柜的绝缘寿命。影响穿墙套管绝缘性能的因素不仅有外形尺寸、伞裙结构、双屏蔽设计等结构设计,还涉及到制作套管的环氧树脂材料性能,特别是耐电痕性、屏蔽网的材料选择及加工工艺、套管的选型、安装工艺和运行环境等多种因素。目前,针对40.5 kV穿墙套管进行了许多涉及故障分析、结构设计和电场优化等的技术研究,但对诸如结构设计、模具制造、材料选型、制造过程工艺、安装和运行环境等的全面研究相对较少。因此,文中从影响套管运行可靠性的上述多种因素进行综合研究,为确保套管的安全可靠运行提供有益的技术参考。

关键词: 40.5 kV 开关柜; 双屏蔽套管; 选型和安装; 电场仿真

Research on Key Techniques of Wall Bushing in 40.5 kV Air-insulated Switchgear

ZHANG Zhuo¹, SU Di², CHEN Zhigang², DING Tongkui²

(1. Stated Power Grid Henan Power Company, Zhengzhou 450018, China; 2. Stated Grid Zhengzhou Power Company, Zhengzhou 450052, 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 cabinet. The key technologies of the wall bushing are not only the structural design of the external dimensions, umbrella skirt structure, double shielding design, but also the performance of the epoxy resin material that makes the bushing, especially the hydrophobicity and tracking resistance, and the selection of the shielding mesh material and various factors such as processing technology, mold structure, production process, selection, installation process and operating environment. At present, there are many technical researches on the 40.5 kV wall bushing, involving the failure analysis, structural design and electric field optimization of the bushing. Comprehensive researches such as structural design, mold structure, material selection, production process, selection, installation and the operating environment are still rare. Therefore, the paper conducts a comprehensive study from the above-mentioned key technologies of bushing to ensure its safe and reliable operation.

Key words: 40.5 kV switchgear; double shielding bushing; selection and installation; electric field simulation

0 引言

随着用电需求的增加,用户对电力设备的设计、制造和安装运行提出了更高的要求,40.5 kV空气绝缘金属封闭开关柜(简称40.5 kV开关柜)是一种广泛应用于配电网的电力设备,在电力系统中承担着受电、馈电及保护的作用,其性能的好坏对电网的安全生产和可靠运行起着重要作用。

由于前期40.5 kV开关柜的设计、生产和质量控

制良莠不齐,特别是穿墙套管的设计、制造和安装存在一定的缺陷。随着运行时间的增加和缺陷的积累发展,近年来,40.5 kV开关柜因穿墙套管缺陷造成沿面爬电、绝缘击穿和爆炸等恶性事故^[1-9]时有发生,给工业生产和人民生活造成了恶劣影响。

引起套管事故的原因很多,主要有设计缺陷、环氧材料耐电痕性差、选型不合理、安装缺陷等。只有对套管的事故缺陷和关键技术进行综合研究,从结构设计、材料选择、选型和安装多方面综合考

虑,方可确保穿墙套管能安全可靠的运行。

穿墙套管的关键技术不仅有产品的外形安装尺寸、伞裙结构和布置、双屏蔽的尺寸设计等结构设计,还涉及到制作套管的环氧树脂材料选择、屏蔽的材料选择及加工要求、套管的模具结构设计、套管的选型和安装等多种因素。文中综合考虑上述穿墙套管的多项关键技术,逐项分析、验证,确保40.5 kV穿墙套管的绝缘性能及其配套开关柜的运行可靠安全。

1 穿墙套管的典型结构设计

1.1 结构设计

40.5 kV开关柜用穿墙套管的结构形式经过了从无屏蔽到双屏蔽的发展过程。由于前期技术水平的限制,绝大部分都是无屏蔽结构,见图1(a),这种结构由于没有任何屏蔽,在套管穿过安装板的边缘部位其电场分布非常集中(具体见后文的电场分析部分),此处极易产生放电造成绝缘老化。目前,常用套管的双屏蔽典型结构见图1(b),这种结构的套管主要由环氧树脂、高压屏蔽、高压引线、接地屏蔽和安装螺母组成。其中,环氧树脂是主绝缘介质,通常环氧树脂的介电强度是30 kV/mm,而空气的介电强度是3 kV/mm。因此,环氧树脂的介电强度是空气的10倍。绝缘设计首先要考虑的是在一定范围内尽量提高环氧树脂中的电场强度、同时降低空气中的场强。接地屏蔽主要是将安装法兰附近空气中的场强引入到环氧树脂内部。高压屏蔽主要是将高电位引入到环氧树脂、同时用来屏蔽高压母排及其高压连接线之间的空气。同时,与接地屏蔽一起形成双屏蔽结构,将主电场引入到环氧树脂中,尽可能的减少空气中的电场。高压引线主要是确保母排与高压屏蔽等电位连接。

在运行现场发现双屏蔽结构的套管运行一段时间后也经常会出现放电、沿面爬电,甚至发生内部击穿短路事故。特别是在同一个站运行的不同厂家的开关柜,有的运行良好,有的就出现了因套管短路造成的爆炸事故。由于同一个站的开关柜运行环境是相同的,可以排除环境因素造成事故的主要原因。因此,通过X光检测排除套管内部存在气泡、微裂纹等缺陷外,事故的主要原因就是结构设计不合理。

1.2 不同结构设计的电场仿真分析

为了进一步说明结构设计对套管绝缘水平的影响,在参考相关文献的基础上^[10-14],文中利用有限元软件对3种结构的套管进行电场分析^[15]。

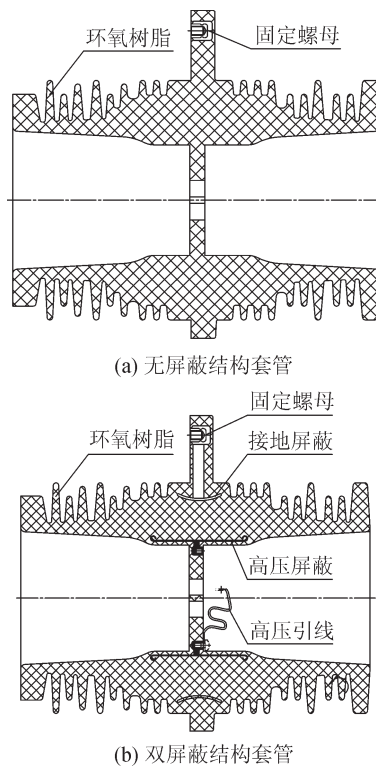


图1 套管的典型结构

Fig. 1 Typical structure of bushing

从套管本身以及与穿过套管的母排配合关系看,其绝缘结构可以简化成二维轴对称的模型。尽管实际装配后的套管和母排的局部部位不成轴对称结构,但是简化后的电场仿真模型不影响关键位置的电场分布。简化后的仿真模型见图2,仿真模型中的母排为常规80 mm宽。其中图2(a)和图2(b)的仿真模型分别对应图1(a)和图1(b)的结构;图2(c)是在图2(b)的基础上经过结构优化后的模型,主要是对靠近套管安装板两侧的伞裙形状和大小进行了优化设计,同时接地屏蔽加高了5 mm,高压屏蔽的尺寸保持变化,使高压屏蔽、接地屏蔽、伞裙和安装板之间进行有效的配合,以期达到理想的屏蔽效果。

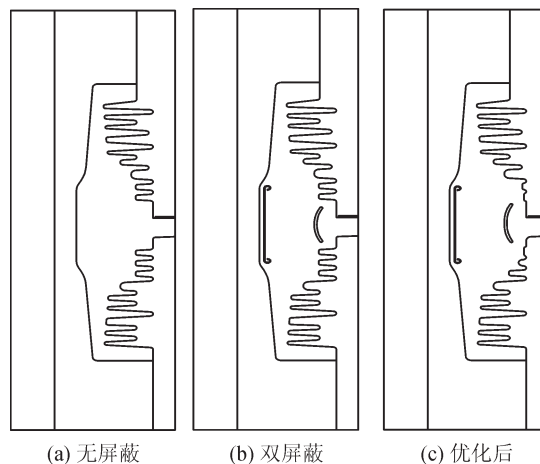


图2 套管仿真分析模型

Fig. 2 Simulation analysis model of bushing

为了保证仿真结果的一致性, 仿真模型和条件作了如下规定^[16]: ①求解区域尺寸完全一致; ②模型剖分采用相同的单元边长度; ③施加电压峰值相同。根据耐压试验的标准要求, 其工频耐压为有效值 95 kV, 由于仿真过程中所加电压为常数, 因此, 需要将其换算为峰值: 即 $95 \text{ kV} \times \sqrt{2} \approx 135 \text{ kV}$ 。

仿真模型中的材质设置为: 环氧树脂的相对介电常数 ϵ 为 4.0, 空气的相对介电常数 ϵ 为 1.0。3 种模型的电场仿真结果对比分别见图 3-6 和表 1, 绝缘测试测试结果见表 2。

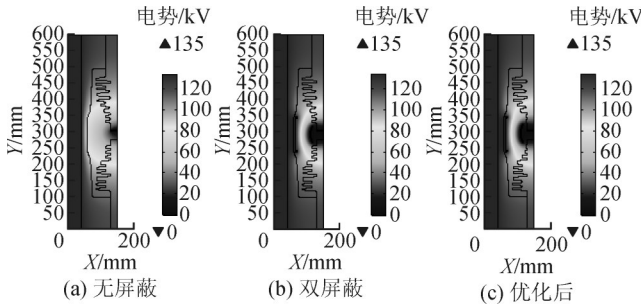


图 3 整个区域电压分布对比
Fig. 3 Comparison of overall voltage distribution

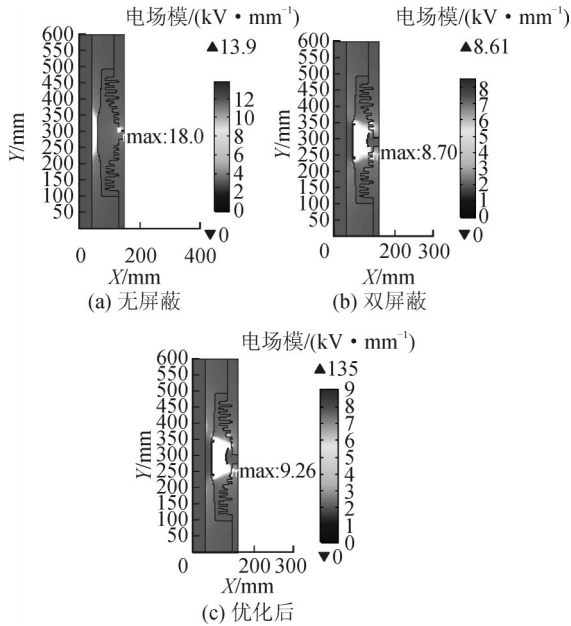


图 4 整个区域电场分布对比
Fig. 4 Comparison of overall electric field distribution

由图 5、6 和表 1、2 可知, 在绝缘尺寸不变的情况, 加载电压为 135 kV 时, 环氧树脂中的最大电场强度由无屏蔽的 12.1 kV/mm 降到双屏蔽的 8.70 kV/mm 和优化后的 9.26 kV/mm, 优化的环氧树脂中最大场强降为无屏蔽的 76%, 场强降低非常明显。空气中的最大电场强度由无屏蔽的 18.0 kV/mm 降到双屏蔽的 4.37 kV/mm 和优化后的 2.36 kV/mm, 优化的空气中最大场强降为无屏蔽的 13%, 场强降低非常明显。1 min 工频耐压极限由无屏蔽的 96 kV 提高到

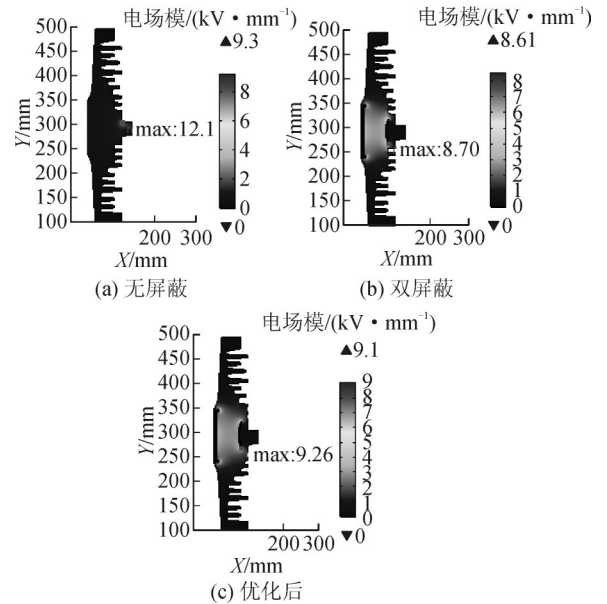


图 5 环氧树脂中电场分布对比
Fig. 5 Comparison of electric field distribution in epoxy resin

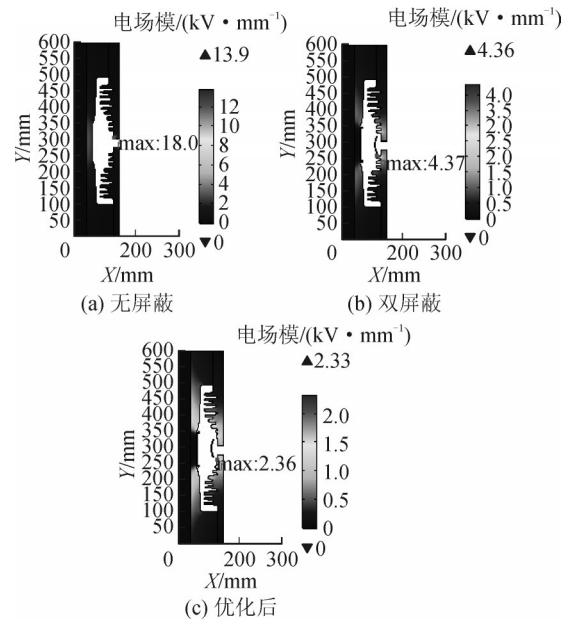


图 6 空气中电场分布对比
Fig. 6 Comparison of electric field distribution in air

表 1 电场仿真结果汇总

结构类型	环氧树脂中最大场强/(kV·mm ⁻¹)	空气中最大场强/(kV·mm ⁻¹)
无屏蔽	12.10	18.00
双屏蔽	8.70	4.37
优化后	9.26	2.36

双屏蔽的 105 kV 和优化后的 110 kV; 额定雷电冲击耐受电压极限由无屏蔽的 $\pm 195 \text{ kV}$ 提高到双屏蔽的 $\pm 210 \text{ kV}$ 和优化后的 $\pm 230 \text{ kV}$; 局部放电熄灭电压

表2 绝缘试验实测绝缘水平

结构类型	1 min工频耐受电压 压极限值 (有效值)	额定雷电冲击耐 受电压极限值(峰 值)	局放 熄灭 电压
无屏蔽	96	±195	18
双屏蔽	105	±210	30
优化后	110	±230	45

由无屏蔽的 18 kV 提高到双屏蔽的 30 kV 和优化后的 45 kV。1 min 工频耐压和额定雷电冲击耐受电压可以大幅度提高,特别是局部放电熄灭电压明显提高了近两倍。因此,通过结构优化和电场仿真分析可以有效提高套管的局放水平、改善其绝缘水平。

2 材料选择

2.1 环氧树脂选择

制作产品的绝缘材料选择由产品结构和制作工艺决定。40.5 kV 开关柜用套管通常采用环氧树脂材料通过 APG 工艺(自动压力凝胶工艺)制作而成。与传统的真空浇注工艺相比,用 APG 工艺生产的环氧制品质量较稳定,生产效率大大提高。因此,40.5 kV 套管用环氧树脂材料的选择主要关注以下几点:

1)首先,需要考虑适合 APG 工艺,根据产品的厚度及重量选择不同凝胶时间和抗开裂指数的环氧树脂。混合料固化前在室温下要有合适的粘度确保其流动性,同时固化后的环氧树脂要有较高的玻璃化温度 T_g ,40.5 kV 套管用环氧树脂的 T_g 不宜低于 95 °C。

2)其次,环氧树脂需要具有一定的耐电痕性。该性能直接决定着环氧制品和开关柜的绝缘水平、环境适用性和使用寿命^[17-19]。由于 40.5 kV 开关柜用套管属于典型的“插入式”的电极布置方式,电场分布十分集中^[20];同时,40.5 kV 开关柜防护等级一般为 IP4X,只能防护直径不超过 1 mm 的固体异物,无法防护灰尘等污秽。运行一段时间后,在套管的表面经常积存一定的污秽层,如果同时存在潮湿和凝露,极易造成套管表面爬电或污闪,因此,起绝缘作用的环氧树脂需要具有一定的耐电痕性。根据相关标准要求,环氧树脂的耐电痕性必须达到标准规定的 1A2.5 级^[21]。

3)机械强度要求。由于 40.5 kV 套管是用 4 个螺栓固定安装在开关柜的柜板上,母排穿过套管的中心孔,母排与套管之间的正常接触压力一般最大为母排的重力。因此,套管用环氧树脂材料的机械强

度在满足自重的基础上留有适当的裕度即可,常规的环氧材料即可满足机械强度要求。

2.2 屏蔽材料选择及加工要求

2.2.1 屏蔽材料选择

套管用接地屏蔽和高压屏蔽的加工制作一般采用金属材料,前期的接地屏蔽有时采用半导体材料,由于半导体材料的屏蔽效果不如金属材料,目前基本被金属材料取代。为了研究高压屏蔽和接地屏蔽材料对套管的局部放电熄灭电压的影响,文中采用优化后的结构设计、屏蔽尺寸完全相同、分别使用线膨胀系数不同的不锈钢、铝和黄铜 3 种不同的屏蔽材质加工制作套管,然后试验测试套管的局部放电熄灭电压,其结果见表 3。

表3 不同屏蔽材质的套管的熄灭电压实测值

Table 3 Measured value of the extinguishing voltage of different shielding materials

屏蔽材质	20 ~ 100 °C时线膨胀系数/ ($10^{-6} K^{-1}$)	局部放电 熄灭电/kV
不锈钢	16.0	45 ~ 46
铝	23.6	48 ~ 52
黄铜	20.6	54 ~ 56

注:文中制作套管使用的环氧树脂材料的线膨胀系数为 22.9/($10^{-6} K^{-1}$)。

由表 3 可以看出,铝的线膨胀系数 23.6/($10^{-6} K^{-1}$)与环氧树脂的 22.9/($10^{-6} K^{-1}$)最接近,其次是黄铜的 20.6/($10^{-6} K^{-1}$)、最后是不锈钢 16.0/($10^{-6} K^{-1}$)。因此,单从材料的线膨胀系数来看,铝材屏蔽在套管生产过程中因固化收缩产生的内应力最小,其局部放电熄灭电压理应最高,但测试结果是黄铜材质的屏蔽熄灭电压最高。其中,造成这一差别的主要原因是与黄铜和不锈钢相比,铝材硬度较低,用其制作的屏蔽在加工、运输和套管生产过程中容易变形而影响电场分布,进而影响局部放电熄灭电压,从其熄灭电压波动较大也能说明这一点。从屏蔽的加工、运输、局放水平和质量稳定性考虑,屏蔽材质宜采用黄铜。

2.2.2 屏蔽加工要求

在屏蔽的加工过程中会产生一个光面和一个毛面,毛面由于加工的原因残留大量的金属尖端,见图 7。高压屏蔽和接地屏蔽选择不同的光面朝向对套管的绝缘水平特别是局部放电水平影响较大,一般原则是屏蔽的功能面选用光面、非功能面选用毛面。见图 8,套管的高压屏蔽的功能面为外侧,因此外侧应为光面,接地屏蔽的功能面为内侧,因此内侧应为光面。

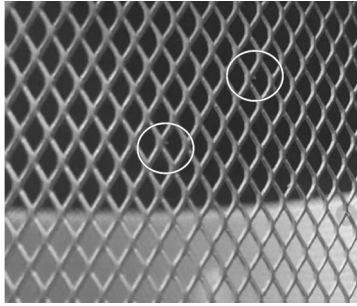


图7 铜网表面残留的金属尖端

Fig. 7 Metal tip remaining on the surface of the copper

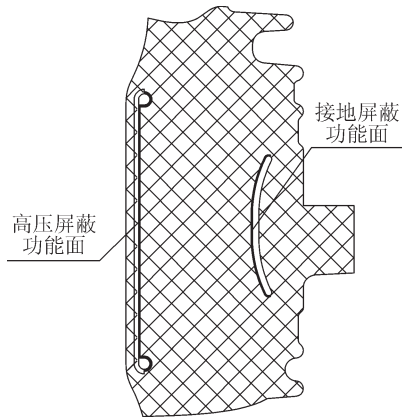


图8 套管屏蔽的功能面

Fig. 8 Functional surface of bushing shield

3 套管的选型、安装

3.1 套管的选型

40.5 kV 套管的选型需要综合考虑开关柜的柜宽、柜深和柜高,套管安装处的空间、以及与触头盒、支柱绝缘子的尺寸配合。目前,常见的40.5 kV 开关柜有1.4 m和1.2 m两种柜宽,与之配套的套管型号由于柜子内部结构布置不同,特别是套管的布置方式不同而不同,常见的套管布置方式有“一字型”、“品字形”和“三角形”,这3种布置的特点分别如下:

1)“一字型”布置:三相套管紧贴,伞群最外边缘之间的空气净距很小,容易引起相间短路。相间距离是设计的关键,特别是当母排平放时,对绝缘设计挑战性大。若满足了相间距离,相对地距离就成为不可解决的问题。因此,相对地距离和相间距离不可调和。

2)“品字形”和“三角形”布置:是解决“一字型”安装中两个不可调和矛盾的折中办法。但在实际应用中,经常出现主母排和支排搭接而引发新的绝缘问题;特别是,套管高度选型不合理,容易造成因空气绝缘净距不足造成的套管对触头盒或支排对套管端部的放电,其典型缺陷见图9。因此,在套管选型时需重点关注绝缘配合距离,建议常规开关柜

选用总高度395 mm的套管,同时保证不同绝缘件之间的空气净距不低于50 mm。

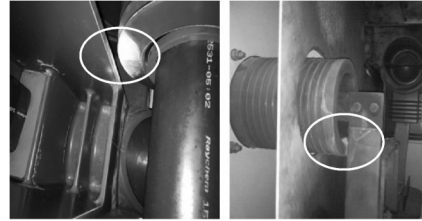


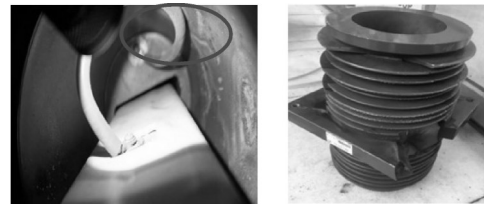
图9 套管选型典型缺陷

Fig. 9 Typical defects of bushing selection

3.2 套管的安装

3.2.1 套管安装常见问题

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。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,在潮湿、凝露和污秽联合作用下,高压引线附近的三介质(环氧树脂、空气、高压引线的绝缘层)造成高压引线附近的电场发生畸变、增大,在运行电压下持续放电,久而久之就会造成绝缘老化加速,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,其典型缺陷见图10。



(a) 高压引线对内壁放电 (b) 高压引线悬浮引起爆炸

图10 套管安装典型缺陷

Fig. 10 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2(c)优化后结构的双屏蔽套管正常连接和高压引线悬浮两种工况进行二维轴对称电场仿真分析、对比,加载电压135 kV时,两种工况下的电场分布分别见图11-14。

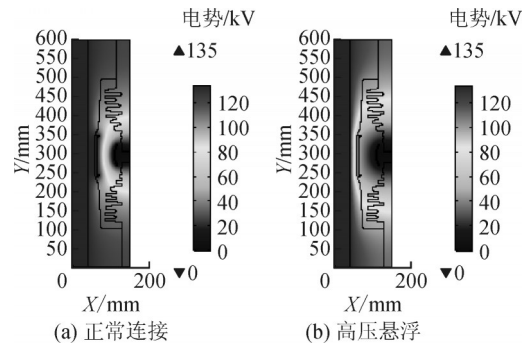


图11 整体电压分布

Fig. 11 Overall voltage distribution

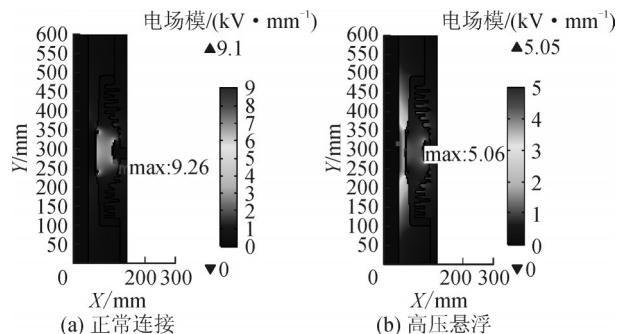


图12 整体电场分布

Fig. 12 Overall electric field distribution

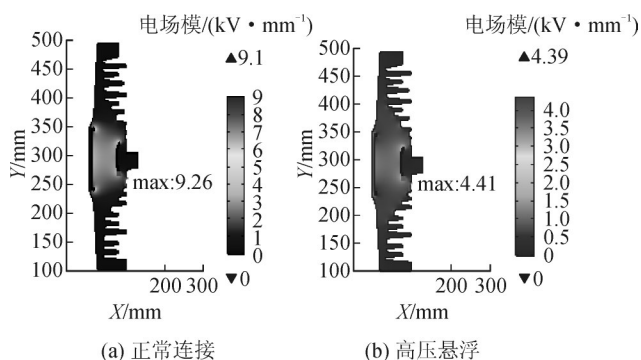


图13 环氧树脂中电场分布

Fig. 13 Electric field distribution in epoxy resin

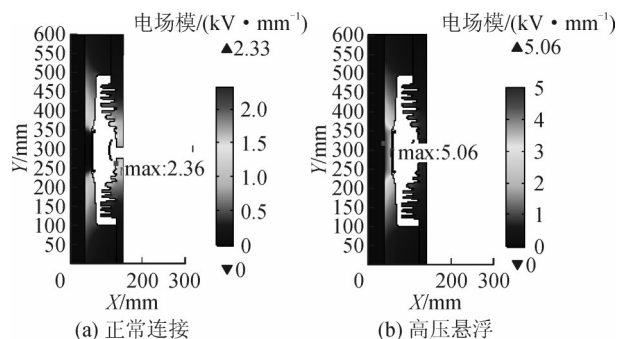


图14 空气中电场分布

Fig. 14 Electric field distribution in air

从图11-14的电场分布图中可以看出:正常连接工况下电场集中在环氧树脂中,环氧树脂中的电场场强较高为9.26 kV/mm、空气中的电场强度较低为2.23 kV/mm,绝缘利用系数较高,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较低为4.41 kV/mm、空气中的电场强度较高为5.06 kV/mm,已远超空气的平均击穿场强3 kV/mm,极易产生放电,绝缘利用系数很低。因此,为了确保双屏蔽套管及其开关柜的安全运行,安装、使用时严禁高压屏蔽悬浮、高压屏蔽必须与母排可靠等电位连接。

3.2.2 套管安装关键技术

为了规范双屏蔽套管的安装使用,防止因安装不规范造成运行中的套管及其开关柜存在绝缘隐患,提高系统的安全可靠性,需采取以下防范措施:

- 1)高压引线应与母排可靠、牢固等电位连接,防止因虚接造成高压屏蔽悬浮。
- 2)整根高压引线应位于高压屏蔽的屏蔽范围内,不能超出其屏蔽范围,见图15。

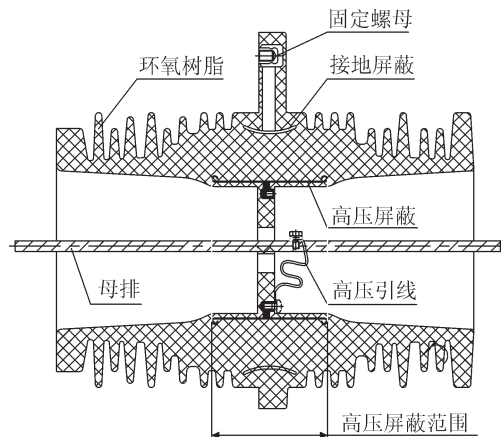


图15 双屏蔽套管接线示意图

Fig. 15 Wiring diagram of double shielding bushing

- 3)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,建议用绝缘自粘带将高压引线固定在母排上,典型接线见图16。

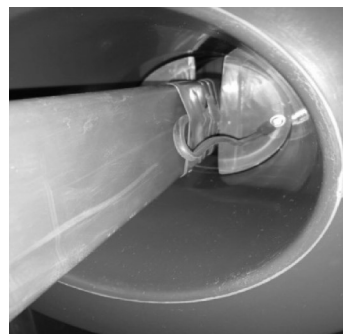


图16 双屏蔽套管高压引线典型接线

Fig. 16 Typical wiring of double shielded bushing high voltage lead

- 4)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。如果套管的安装板是非金属的绝缘板,则套管的全部固定螺母都要可靠接地,否则同样存在接地屏蔽悬浮的风险。

4 结论

文中针对40.5 kV开关柜用穿墙套管的关键技术进行综合分析,从套管的结构设计、环氧树脂材料选择、屏蔽的材料选择及加工、模具结构设计、套管选型和安装等多方面研究,同时结合套管的典型缺陷分析论证,得出以下几点结论:

- 1)40.5 kV开关柜用穿墙套管的结构设计是影响和制约其绝缘性能的关键因素,可以通过结构优化和电场仿真分析相结合的方式快速、有效地提高

其绝缘水平;

2)套管的合理选型和规范的安装是套管及其配套开关柜可靠运行的有力保证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 Switcher, 2008(4):65-66.
- [3] 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, 38(1):48-49.
HUANG Xiaosheng. Prevention measures of accident on 10~35 kV metal-enclosed switchgear[J]. Yunnan Electric Power, 2010, 38(1):48-49.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 姜东飞, 蔡晶, 赵海鹏, 等. 振动模式下复合套管电场仿真分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(11):112-116.
JIANG Dongfei, CAI Jing, ZHAO Haipeng, et al. Simulation analysis of electric field in composite bushing under vibration modes[J]. Smart Power, 2018, 46(11):112-116.
- [8] 刘玉春, 郎福成, 谭东现, 等. 40.5 kV穿墙套管事故分析及其结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2015(6):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(6):39-42.
- [9] 杨定乾, 陈赟, 丁杨, 等. 典型40.5kV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.
- [10] 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. Simulation of internal electric field of high-voltage metal-enclosed switchgear and influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6):154-160.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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 bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1):113-118.
- [14] 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.
- [15] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
WANG Gang, AN Lin. Engineering practice and theoretical simulation of COMSOL Multiphysics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [16] 谭东现, 贺弋玲, 林钧, 等. 12 kV复合绝缘开关设备的绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4):28-33.
TAN Dongxian, HE Yiling, LIN Jun, et al. Investigations on

- insulation characteristics of 12 kV composite insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 28-33.
- [17] 杜伯学. 有机绝缘耐电痕性的评定与发展[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 10-13.
- DU Boxue. Research and development of test method on tracking resistance of polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 10-13.
- [18] 郑一泉. 有机绝缘材料耐电痕化的影响因素探讨[J]. 绝缘材料, 2012, 45(4): 55-59.
- ZHENG Yiquan. Factors influencing the tracking resistance of organic insulating materials[J]. Insulating Materials, 2012, 45(4): 55-59.
- [19] 田付强, 彭 潇. 耐电晕耐电痕化绝缘材料研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 3-13.
- TIAN Fuqiang, PENG Xiao. The research progress of corona-resistant and tracking - resistant insulating materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 3-13.
- [20] 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 Electric Power Press, 2007.
- [21] 严酷环境条件下使用的电气绝缘材料 评定耐电痕化和蚀损的试验方法: GB/T 6553—2014[S]. 2014.
- Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion: GB/T 6553—2014[S]. 2014.
- 张 卓(1983—), 男, 双学士, 高级工程师, 长期从事变电设备检修与运维管理、标准制定、故障分析等相关工作(E-mail: zhang-zhuo@msn.com)。

《高压电器》2020年11期广告单位

彩色广告

封一: 西安高压电器研究院有限责任公司

封二: 史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司

封三: 莱茵技术(上海)有限公司

封四: 上海乐研电气有限公司

前插1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前插2: 江苏现代电力科技股份有限公司

前插3: 成都凯赛尔电子有限公司

前插4: 珠海经济特区恒迪科技有限公司

前插5: 陕西龙翔电器有限公司

前插6: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

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(认证中心)