

高海拔套管绝缘子沿面电场分布特征及 闪络电压试验研究

张施令¹, 官林¹, 宋伟¹, 彭宗仁², 毕茂强³

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安, 710049; 3. 重庆理工大学 电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘要:首先在试验室环境下开展大型金具-复合绝缘子-金属接地体的实际闪络试验,获得闪络电压与空间净距之间的定量关系曲线。进一步,建立两种典型结构的高压套管复合绝缘子,包括电容式芯体换流变压器套管用和双层金属屏蔽式穿墙套管用复合绝缘子的三维有限元模型,获取运行状态下其典型电压和电场分布特征,分析套管用复合绝缘子局部高场强与电晕、闪络现象之间的关系。基于以上理论分析和试验数据,针对特高压交直流套管用复合绝缘子进行尺寸海拔校正、伞裙轮廓拓扑优化,最终关键部位电场强度均能满足控制要求,证明了套管用复合绝缘子在特高压层面设计的合理性和有效性。

关键词:高压套管复合绝缘子;紧凑型设计;高海拔;绝缘距离;有限元模型

中图分类号:TM216;TM854 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)05-0088-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.05.013

Experimental Study on Surface Electric Field Distribution Characteristics and Flashover Voltage of Bushing Insulator at High Altitude

ZHANG Shiling¹, GONG Lin¹, SONG Wei¹, PENG Zongren², BI Maoqiang³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of electrical and electronic engineering, Chongqing University of technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Firstly, the actual flashover test of large fittings-composite insulator-metal grounding body was carried out in the laboratory environment, the quantitative relationship curve between flashover voltage and space net distance was obtained. Further more, the three-dimensional finite element models of two typical structure of high voltage bushing composite insulators for capacitive core converter transformer and double-layer metal shield through wall were established, and their distribution characteristics of typical voltage and electric field under operating state were obtained, the relationships between local high field strength and corona, flashover phenomena of composite insulators for bushing were analyzed. On the basis of the above theoretical analysis and test data, the size altitude correction and umbrella skirt contour topology optimization of composite insulator for UHV AC/DC bushing were carried out. Finally, all the electric field strength of key parts can meet the control requirements, which proves that the rationality and effectiveness of the design of composite insulator for bushing at UHV level.

Key words: high voltage bushing composite insulator; compact design; high altitude; insulation distance; finite element model

0 引言

复合绝缘子目前在交直流系统变电站的用量巨大,包括线路用复合绝缘子、变电站套管等电力设备用复合绝缘子等。其结构参数随着电压等级

收稿日期:2021-07-26 修回日期:2021-09-07

作者简介:张施令(1986-),男(汉族),重庆人,高级工程师,主要从事超/特高压绝缘结构优化设计和SF₆气体绝缘电力设备运行状态的监测与寿命评估。

的升高呈现非线性增长,特别是在1 000 kV特高压交流、±800 kV特高压直流系统中套管用复合绝缘子具备绝缘距离长和径向直径大的典型特征。目前随着高压电力设备紧凑化优化设计方案的提出,套管用复合绝缘子可通过合理设计内部电容芯体或者金属屏蔽结构优化设计方案有效缩减径向直径,实现其较大长径比的紧凑型设计^[1-5]。当高压复合绝缘子应用在高海拔区域,其绝缘距离将进一步非线性增加。在绝缘结构设计中,可通过引入海拔校正因素 K 校核复合绝缘子空间净距离长度。因此,对于特长高海拔套管用复合绝缘子的沿面电压、电场分布与普通复合绝缘子存在何种特征差异,且如何开展闪络电压试验并对试验数据进行合理预测扩充亟需展开研究。

为此,本研究首先在试验室环境下开展大型金具-复合绝缘子-金属接地体之间的实际闪络试验,建立两种典型结构的套管用复合绝缘子,包括传统电容式芯体换流变压器套管用和双层金属屏蔽式穿墙套管用复合绝缘子三维有限元模型,分析套管用复合绝缘子局部高场强、电压分布曲线与电晕起始电压、闪络电压之间的定量关系^[6-9]。基于以上理论分析、试验数据和最小二乘拟合预测方法,针对特高压直流套管用复合绝缘子进行尺寸海拔校正、伞裙轮廓拓扑优化。针对套管用复合绝缘子的高海拔应用场景,对其拓扑结构尺寸进行海拔校正因素 K 校正。并通过直流耐压、1 min工频耐压等型式试验验证套管用复合绝缘子在特高压层面设计的合理性和有效性。

1 特高压空气间隙闪络试验及复合绝缘子定量修正

1.1 特高压空气间隙闪络试验

首先开展特高压套管空气间隙闪络试验,实验中采用实际特高压套管设计的均压环,均压环为双环结构,如图1所示^[10-11],均压环上下层保持一致,直径为1 000 mm,管径为220 mm。试验采用接地圆盘状金属筒来模拟接地变压器本体,套管本体高度为8 500 mm,套管筒径过渡区域离地约4.5 m。

布置试验对象模拟套管的实际运行场景。采用双参数威布尔分布函数对击穿试验数据进行分析。根据威布尔概率统计理论,空气间隙在特高压等级电压作用下的闪络概率如式(1)所示。

$$F(E; \alpha, \beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right\} = 0.5 \quad (1)$$

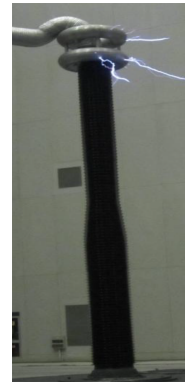


图1 空气间隙试验布置

Fig.1 The air gap test arrangement

式(1)中: E 为击穿场强,kV/mm; α 为击穿概率为50%时的击穿强度,尺度参数,kV/mm; β 为形状参数。

根据套管均压环的尺寸和位置,进行了耐压试验。试验期间气象条件如下:温度为25℃,相对湿度为35%,气压为114.7 kPa。试验前对2 100 kV操作冲击耐受电压进行气象修正,修正结果为2 094 kV。耐压试验结果如图2所示。

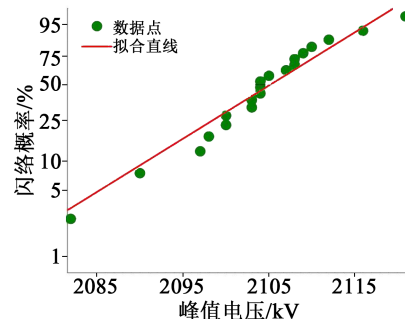


图2 现场试验结果

Fig.2 Test results on-site

从图2可以看出,所得20个数据点在威布尔坐标下基本呈线性分布,数据点的轻微离散说明了试验结果的可靠性^[12-13]。击穿概率为50%时的闪络电压约为2 105 kV,该处数据点比较密集,说明以50%闪络概率作为实际闪络电压具有一定的合理性。

根据修正结果,进一步得到+1%置信区间和+3%置信区间内试验结果,如图3所示。从图3可知,空气间隙闪络电压满足威布尔分布,在+1%和+3%置信区间内均呈现良好线性拟合关系,因此试验数据具有较高可靠性。

1.2 特高压套管用空心复合绝缘子闪络试验

在试验室针对特高压套管用空心复合绝缘子进行闪络试验,其布置如图4所示。其中套管用空

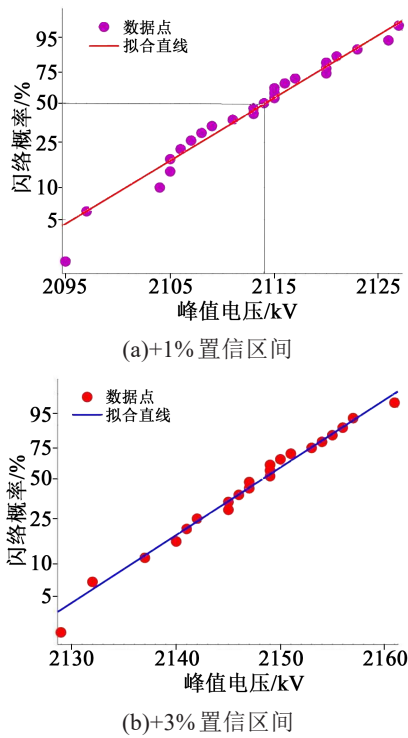


图3 不同置信区间试验结果

Fig.3 Test results under different deviation tolerance

心复合绝缘子内部安装电容芯体,套管端部均压环施加高电压,套管尾部全部浸入变压器油中模拟实际运行环境^[14-15]。在工频电压作用下套管端部均压环会发生初始闪络放电,当发生对地闪络时记录施加电压值。

实际上,在设计空心复合绝缘子绝缘结构尺寸

表1 不同电压等级套管绝缘水平与绝缘距离比较

Tab.1 Comparison of insulation level and insulation distance of bushing with different voltage level

项目	常规 800 kV 套管	1 100 kV 套管	高海拔 800 kV 套管
操作冲击峰值电压/kV	1 760	1 950	1 860
绝缘距离/mm	6 935	9 630	8 500
比值系数	0.25	0.20	0.22

外绝缘设计验证:根据干弧距离大于 7 400 mm 及外绝缘水平的要求,800 kV 套管的外绝缘干闪距离 L_g 取 8 500 mm,外绝缘电气性能计算结果如下:

工频干闪络电压 U_g 为 1 830.4 kV(均方根),大于设计要求的 1 150 kV(均方根),裕度为 1.59。

工频湿闪络电压 U_s 为 1 637.4 kV(均方根),大于设计要求的 1 150 kV(均方根),裕度为 1.43。

雷电全波冲击耐受电压为 4 058 kV(峰值),大于设计要求的 2 860 kV(峰值),裕度为 1.42。



图4 空心绝缘子闪络试验布置

Fig.4 Flashover arrangement site of hollow insulator

时主要考核操作冲击耐受试验电压,根据操作冲击干耐受电压及正极性操作冲击湿耐受电压闪络是沿最短路径发生的实际情况考虑,将套管的绝缘水平与绝缘距离进行比较,如表 1 所示,其中比值系数为操作冲击峰值电压与绝缘距离之间的比值。从表 1 可以看出,高海拔 800 kV 套管的比值系数为 0.22,因此从现场实际应用角度考虑,该套管具有良好的安全裕度^[16-17]。另一方面,根据 1.1 节试验装置,在标准大气压下通过调节测试条件可定量得到雷电全波冲击干/湿闪络电压、正操作波干/湿闪络电压、工频干闪络电压(有效值)、工频湿闪络电压(有效值)4 种条件下复合绝缘子在空气中的闪络电压与绝缘距离的关系,如图 5 所示,并应用公式 $U_{50} = AL_d^B$ 进行非线性拟合,其中 U_{50} 为放电概率为 50% 的闪络电压值, L_d 为绝缘子干闪络距离, A 和 B 为待定系数。常数 A 、 B 的具体数值如表 2 所示。

操作冲击湿耐受电压为 2 490.3 kV(峰值),大于设计要求的 1 860 kV(峰值),裕度为 1.34。

经以上计算可知,当复合绝缘子绝缘距离为 8 500 mm 时,计算得到的工频耐受电压、全波冲击耐受电压、操作冲击耐受电压均高于要求电压值,满足工程对套管外绝缘电气性能的要求。

对于海拔高于 1 000 m 的地区外绝缘水平应进行海拔校正,海拔校正因数 K 按照式(2)进行计算:

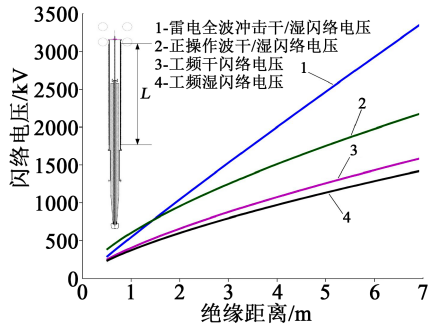


图5 空心复合绝缘子在空气中的闪络电压与绝缘距离的关系

Fig.5 Relationship between flashover voltage and insulation distance of hollow composite insulator in the air

表2 空心复合绝缘子在空气中的闪络电压与绝缘距离的定量拟合参数

Tab.2 Quantitative fitting parameters between flashover voltage and insulation distance of hollow composite insulator in the air

试验电压种类	A	B
雷电全波冲击干/湿闪络电压	545.5	0.937 7
正操作波干/湿闪络电压	603.4	0.662 4
工频干闪络电压(有效值)	404.6	0.705 3
工频湿闪络电压(有效值)	372.3	0.692 1

$$K = e^{q \frac{(H - 1000)}{8150}} \quad (2)$$

式(2)中: H 为海拔高度,m; q 为承受电压系数,对于雷电冲击电压和对于空气间隙和套管空心复合绝缘子的短时工频耐受电压, $q=1$ 。对于海拔高度 $H=3\,500\text{ m}$,代入式(2)中计算得到 $K=1.36$,则 $3\,500\text{ m}$ 海拔工频试验电压校正值为 $960 \times 1.36=1\,305\text{ kV}$ (均方根),雷电冲击试验电压校正值为 $2\,100 \times 1.36=2\,855\text{ kV}$ (峰值),操作冲击试验电压校正值为 $1\,550 \times 1.26=1\,950\text{ kV}$ (峰值)。高海拔电抗器套管外轮廓如图6所示。

表3为常规和高海拔800 kV套管的电气特性、力学性能对比分析。从表3可以看出,高海拔800 kV套管额定电压 $U_r=800\text{ kV}$ 处于中间水平,额定电

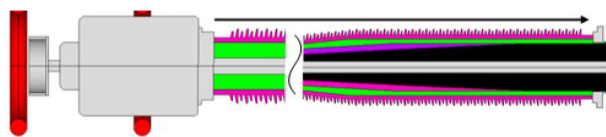


图6 电抗器套管绝缘子轮廓

Fig.6 The outline of reactor bushing insulator

表3 常规和高海拔800 kV套管的电气性能和力学性能对比分析

Tab.3 Comparative analysis of electrical and mechanical performance between normal and high altitude 800 kV bushing

项目	常规800 kV套管	高海拔800 kV套管
额定电压/kV	800	800
额定电流/A	2 500	2 500
操作冲击湿耐受电压(峰值)/kV	1 760	1 950
雷电冲击耐受电压(峰值)/kV	2 550	2 855
工频耐受电压(均方根)/kV	1020	1305
额定电压下局部放电量/pC	<10	<10
介质损耗因数tanδ	≤0.4	≤0.4
弯曲负荷/N	5 000	5 000
油中高度/mm	1270	1270
空气端绝缘高度/mm	6 930	8 500
爬电距离/mm	24 000	29 760
倾斜30°安装抗震等级	VIII	VIII
VIII级地震最大应力(水平加速度0.3 g)/MPa	21	23
许用应力/MPa	60	60
套管总质量/kg	4 480	4 900

流 $I_N=2\,500\text{ A}$ 处于较高水平,其操作冲击湿耐受电压(峰值)为 $1\,950\text{ kV}$ 、雷电冲击耐受电压(峰值)为 $2\,855\text{ kV}$ 和工频耐受电压(均方根)为 $1\,305\text{ kV}$,均高于常规套管。同时其力学性能方面保持了较好设计裕度值,VIII级抗震复合绝缘子最大应力设计为 23 MPa ,许用应力设计为 60 MPa ,套管总质量设计为 $4\,900\text{ kg}$,弯曲负荷设计为 $5\,000\text{ N}$,以上设计均考虑了良好设计裕度值。

2 特高压复合绝缘子局部电场强度分析

2.1 特高压线路复合绝缘子局部电场分布

特高压复合绝缘子整体电场分布情况直接决定其在各类电压型式下的闪络电压值,复合绝缘子发生闪络主要由于局部存在高场强区域导致电晕起始放电。选取输电线路具有典型代表性的“V串”和“I串”进行分析。图7为线路复合绝缘子在有均

压环和无均压环两种条件下的整体电场分布情况。由图 7(a)可知,有均压环条件下电场强度最大值位于均压环和线路导线表面,且复合绝缘子最大场强处于均压环上端部。由图 7(b)可知,无均压环条件下复合绝缘子最大场强位于高压端,说明设置了均压环后其最大电场强度位置发生了位移^[9]。图 8 中列出了 V 串和 I 串复合绝缘子串轴向场强的分布情况。从图 8 可见,V 串和 I 串复合绝缘子串轴向电场强度均呈现先上升后下降,随后又上升再下降的变化趋势,且最大场强位置均位于线路复合绝缘子端部。

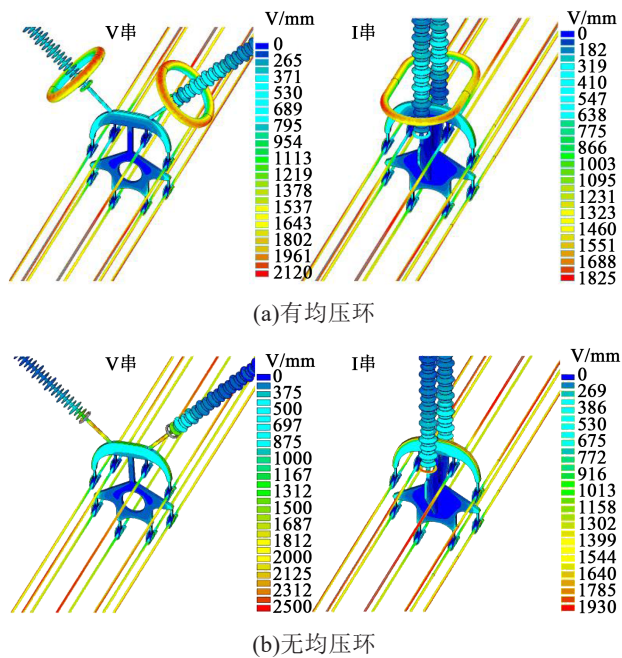


图 7 绝缘子高压端整体电场分布

Fig.7 Electric field distribution around high voltage end of insulator strings

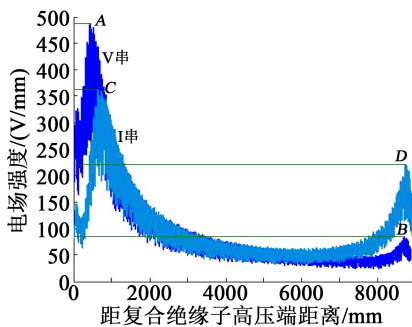


图 8 沿复合绝缘子串轴向场强分布

Fig.8 Electric field distribution along insulator strings

2.2 特高压套管复合绝缘子端部均压装置

为提高套管复合绝缘子的闪络电压,需配置结

构合理的端部均压罩以均匀沿复合绝缘子的电压分布。另外,套管端部有接线板、汇流金具、管母引出线等关键结构部件,在套管端部安装均压环后可有效屏蔽以上不规则导体表面的尖角与突起,抑制电晕放电以及由此引发的外绝缘闪络。图 9 为无套管均压罩和安装不同结构型式均压罩后的电场分布。

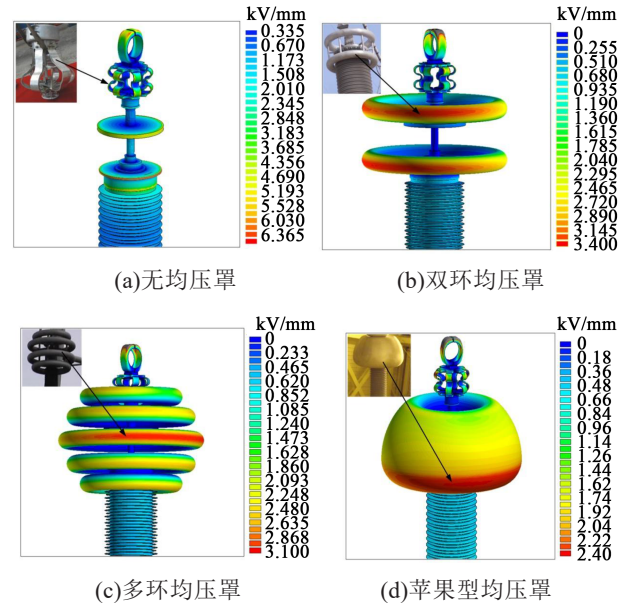


图 9 套管均压罩的结构型式及电场分布

Fig.9 The structure of high voltage bushing corona ring and electric field distribution

由图 9(a)可知,在未安装均压罩的情况下,高场强区域集中在汇流金具边缘,最大场强达到 6.7 kV/mm,高于空气的击穿强度 3 kV/mm,因此在金具边缘区域将产生电晕放电。装设双环均压罩后,汇流金具位于均压罩内部的低场强区域,且最大场强降低为 3.4 kV/mm,出现在均压罩表面,如图 9(b)所示。为进一步改善套管端部电场分布情况,采用多环均压罩的结构型式,如图 9(c)所示,可见最大场强出现的位置转移到均压罩中间部位,且最大场强值为 3.1 kV/mm,双环均压罩和多环均压罩在高压变电站中均有实际工程应用。高压换流站阀厅内部的电力设备端部一般采用苹果型的均压罩,如图 9(d)所示,可以看到,苹果型均压罩可将汇流金具完全包覆在低场强区域内部,均压罩表面电场分布均匀,最大场强值为 2.4 kV/mm,低于空气的击穿强度,但苹果型均压罩的制造难度较大。考虑制造成本和安装难度,套管复合绝缘子端部均压罩可以采

用双环结构,但需进一步加大结构尺寸。

针对特高压换流变套管空心复合绝缘子的伞型结构,设计了一种开放式大小伞结构,其剖面图和实物图如图10所示。

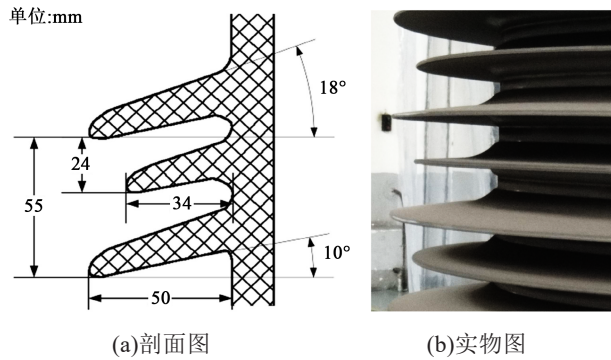


图10 特高压换流变套管用复合绝缘子伞型

Fig.10 Umbrella structure of composite insulator for UHV converter bushing

由图10可计算得,设计的复合绝缘子结构中单组大小伞净增爬电距离为152 mm,大伞间距为55 mm,大伞宽度和相邻大伞间距的比值为0.91,外绝缘的爬电距离 L_x 可由式(3)计算。

$$L_x = nv + h \quad (3)$$

式(3)中: n 为大小伞的组数; v 为一组大小伞所增加的泄漏距离,mm; h 为空心复合绝缘子的绝缘距离,mm。特高压换流变套管的最小公称爬电距离 L_c 可按式(4)计算。

$$L_c = \lambda \times U_r \times k_D \quad (4)$$

式(4)中: λ 为最小公称爬电比距; U_r 为设备的额定电压; k_D 为直径系数。

由于特高压换流变套管绝缘子区域的污秽等级达到III级,根据GB/T 5582-1993《高压电力设备外绝缘污秽等级》中污秽等级与爬电比距的对应关系,此时 λ 取值为25 kV/mm;按照IEC/TS 60815-2001《污染条件用高压绝缘子的选择和尺寸选定》要求,对于平均直径大于500 mm的绝缘子,需对爬电距离进行1.2倍修正^[20]。

根据式(4)计算得到换流变套管的最小公称爬电距离 L_c 为24 000 mm,技术条件中取一定安全裕度,要求 L_c 大于26 630 mm,因此在设计中拟采用136组大小伞,则空心复合绝缘子的绝缘距离应不小于5 958 mm。根据空心复合绝缘子的制造条件和规格,最终将其绝缘高度设计为7 490 mm,大伞外径为835 mm,小伞外径为803 mm,且空心复合绝缘子的内筒径为687 mm,其结构示意图如图11

所示。

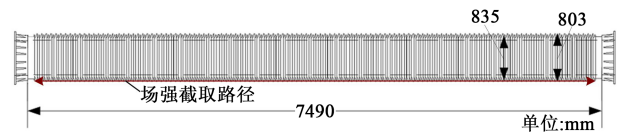
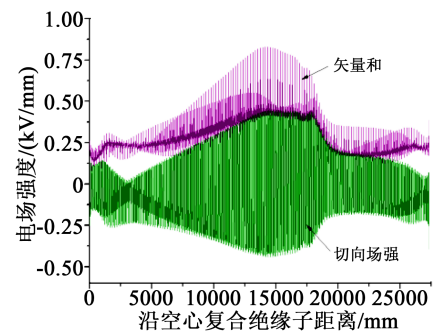


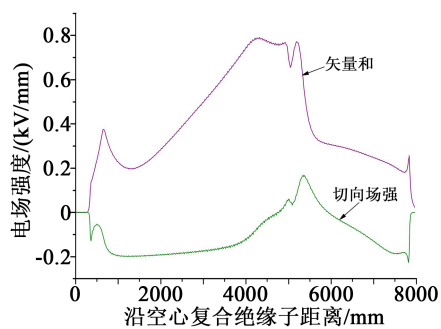
图11 特高压换流变套管空心复合绝缘子结构

Fig.11 Hollow composite insulator structure for UHV converter bushing

在雷电冲击试验电压2 405 kV下对空心复合绝缘子沿面场强分布进行校核计算,主绝缘芯子结构尺寸采用改进等裕度法优化设计结果。截取其内外表面场强的矢量和和切向分量,场强截取路径如图11所示,场强分布情况如图12所示。



(a)绝缘子外表面



(b)绝缘子内表面

图12 空心复合绝缘子内外表面场强分布

Fig.12 Field strength distribution on inner and outer surface of hollow composite insulator

从图12可以看出,空心复合绝缘子内外表面场强矢量和均大于切向场强,且外表面场强出现强烈振荡,这主要是由于外场强截取路径交替沿着大小伞的表面,因此图12(a)的横坐标约等于空心复合绝缘子的爬电距离 L_x ;内表面场强的截取路径未穿过大小伞,因此曲线较为平滑,且图12(b)的横坐标约等于空心复合绝缘子的绝缘高度 L_d 。内、外表面场强矢量和的最大值分别为0.79 kV/mm、0.82 kV/mm,满足0.90 kV/mm的场强允许值;切向场强的最大值

分别为 0.17 kV/mm、0.38 kV/mm, 满足 0.40 kV/mm 的切向场强允许值。

将套管用复合绝缘子进行三维建模分析, 考虑套管内部金属极板、外部均压环、换流阀厅墙壁, 研究特高压套管用复合绝缘子的沿面电场分布规律^[21]。图 13 为特高压穿墙套管等位线分布。由图 13 可知, 套管电压等位线被中间墙体明显分隔为两部分, 且户内、户外电位分布不对称, 表明墙体对套管整体电位、电场分布具有一定畸变作用, 需运用三维模型将墙体的影响考虑在计算中, 套管本体的三维电场分布如图 14 所示。

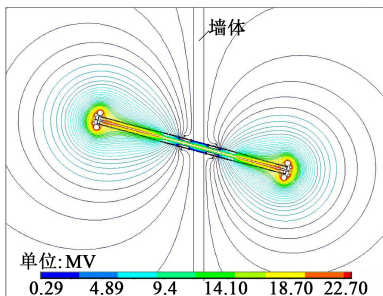


图 13 特高压穿墙套管电压等位线分布

Fig.13 Equipotential potential distribution of UHV bushing

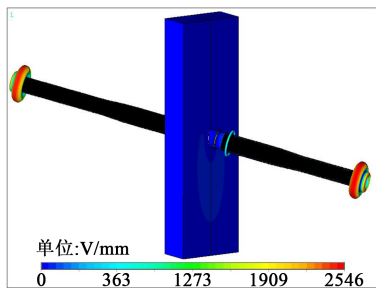


图 14 特高压穿墙套管本体三维电场分布

Fig.14 The 3D electric field distribution of UHV bushing

从图 14 可以看出, 穿墙套管外部最高场强位于两端引出线高压均压环表面, 其最大电场强度值为 2 546 V/mm, 考虑到外界空气击穿强度一般为 3 000 V/mm, 因此该均压环基本满足场强控制要求。高压双均压环结构可有效屏蔽套管中心导电杆和进出套管导线之间的连接装置, 将最大场强值控制在较低水平, 避免电晕放电的发生^[22-23]。大均压环以下为硅橡胶空心绝缘子与高电位金具接触部位, 应通过该均压环对三接触点进行有效屏蔽, 避免硅橡胶在高场强作用下的电晕烧蚀。考虑到穿墙套管外绝缘特性, 其中间法兰与墙体形成的三角区域为关键部位, 若该处电场过高易引起硅橡胶

空心绝缘子端部放电, 最终会导致套管高压端的闪络放电, 故研究了特高压穿墙套管此处的三维电场分布, 结果如图 15 所示。

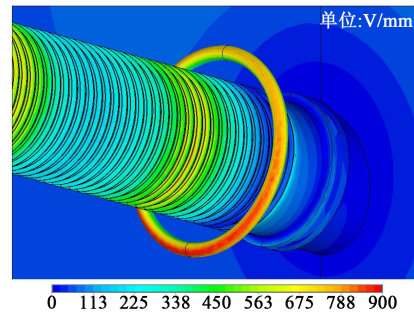


图 15 特高压穿墙套管低压均压环电场分布

Fig.15 Electric field distribution of low voltage corona ring for UHV bushing

从图 15 可以看出, 低压均压环和墙体之间形成了较好的屏蔽区域, 使空心复合绝缘子与接地法兰间的三接触点位于低场强区, 但最高场强出现在低压屏蔽环表面, 其值约为 900 V/mm, 远小于空气的击穿强度。同时空心复合绝缘子表面最高场强出现在低压屏蔽环前端, 这是由于穿墙套管内部屏蔽层结构对外部电场分布的调制作用导致。

3 结论

(1) 特高压空气间隙闪络试验表明闪络电压与间隙距离满足威布尔分布规律, 且得到了套管用复合绝缘子在空气中的闪络电压与绝缘距离的定量拟合关系, 同时将海拔修正指数 K 设定为 1.36。

(2) 通过定量校核计算确定高海拔换流变套管复合绝缘子空气端绝缘高度为 8 500 mm, 爬电距离为 29 760 mm。力学性能方面保持了较好的设计裕度值, VIII 级抗震复合绝缘子最大应力设计为 23 MPa, 许用应力设计为 60 MPa, 套管总质量设计为 4 900 kg, 弯曲负荷设计为 5 000 N, 以上设计均考虑了良好设计裕度值。

(3) 建立了特高压套管用复合绝缘子三维有限元模型, 仿真模拟得到复合绝缘子的三维电场分布与其实际运行情况更加接近, 外表面场强矢量和均大于切向场强, 且外表面场强出现强烈振荡, 因此具备不同的电压闪络特征。

参考文献:

- [1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理: 下册[M]. 北京: 机械工业出版社

- 社,1992.
- [3] 张学成,檀金华,牛万宇. $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电工程换流变压器阀侧套管的设计[J]. 高电压技术,2012,38(2):393-399.
- [4] 陈忠,伍衡,黄和燕,等. $\pm 800\text{kV}$ 直流穿墙套管耐压试验发生外闪络原因分析及改进措施[J]. 高电压技术,2011,37(9):2133-2139.
- [5] 张施令,彭宗仁. 换流变压器套管的电气绝缘结构研究与设计优化[J]. 绝缘材料,2020,53(12):65-72.
- [6] KANNO M, OOTA N, SUZUKI T, et al. Changes in ECT and dielectric dissipation factor of insulating oils due to aging in oxygen[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001,8(6):1048-1053.
- [7] KOHTOH M, KANEKO S, OKABE S, et al. Aging effect on electrical characteristics of insulating oil in field transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6):1698-1706.
- [8] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):230-239.
- [9] ISOGAI T, IKEMOTO N, INOUE T. Epoxy-resin-impregnated paper insulation system for ultra-high-voltage applications[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1971,EI-6(2):94-100.
- [10] 魏晓光,宗文志,王高勇,等. $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流换流阀外绝缘操作冲击放电试验及海拔校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(12):1996-2003.
- [11] 王永强,欧阳宝龙,连莎莎,等. 高海拔地区积雪复合绝缘子沿面电场分布研究[J]. 高压电器,2016,52(6):115-123.
- [12] 王健一,李金忠,李军,等. 高海拔直流工程主设备状态评估的修正方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4786-4792.
- [13] 肖淦,昌明辉,吴学恩,等. 浅析高海拔地区使用的套管内绝缘长度改变[J]. 变压器,2017,54(10):10-13.
- [14] JACOB N D. On-line monitoring of partial discharges in a HVDC station environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(3):925-935.
- [15] 廖永力,李锐海,李小建,等. 典型空气间隙放电电压修正的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):171-176.
- [16] 徐建源,任春为,司秉娥,等. 40.5kV SF_6 充气式开关柜三维电场分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):136-140.
- [17] 张施令,彭宗仁,吴昊. $\pm 800\text{kV}$ 换流变压器阀侧干式套管的损耗分析[J]. 电网技术,2014,38(7):1758-1764.
- [18] 党沙沙,许洋,张红松. ANSYS12.0多物理耦合场有限元分析入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010:254-311.
- [19] MONGA S, GORUR R S, HANSEN P, et al. Design optimization of high voltage bushing using electric field computations[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation,2006, 13(6):1217-1224.
- [20] TANG L, RAGHUVVEER M R. Modelling of HVDC wall bushing flashover due to uneven wetting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,14(1):194-199.
- [21] 王晓琪,吴春风,李璿,等. 1000kV GIS 用套管的设计[J]. 高电压技术,2008,34(9):1792-1796.
- [22] 戴佳民,齐波,卓然,等. 油浸纸套管电容薪资极板边缘电场分布的仿真及优化方法[J]. 电网技术,2017,41(5):1683-1688.
- [23] 刘奋霞,刘晔,禹云长,等. 特高压油浸式铁心并联电抗器内部温度场数值计算与实验研究[J]. 高压电器,2017,53(1):163-168.