

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.12.024

±400 kV 电容式胶浸纤维穿墙套管的设计

柯磊¹, 王龙华¹, 张东辉¹, 孙强², 辛万鹏²,
宋静波³, 李杰³, 罗清雷⁴, 王蔚¹

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 南京电器高压套管有限公司, 南京 211106;
3. 苏州电器科学研究院股份有限公司, 江苏 苏州 215104; 4. 国家电网新疆电力公司, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 高压直流穿墙套管是换流变电站输电设备的重要设备之一, 针对高压直流套管的研究工作对中国发展高压直流输电技术具有重大意义。文中以额定电压±400 kV, 额定电流 4 000 A 交流直流互换型穿墙套管为设计对象, 研究了高压直流穿墙套管绝缘结构分析与优化中遇到的关键性问题, 重点对高压直流穿墙套管的机械性强度与强电场环境空间电荷影响下的高压直流设备的电场计算方法以及绝缘材料的选用进行试验研究与计算, 并得出重要结论, 具有重要的应用价值。

关键词: 高压穿墙套管; 胶浸玻璃增强纤维; 直流; 机械强度; 电场强度

Design of ±400 kV Capacitive Resin Impregnated Fiber Wall Bushing

KE Lei¹, WANG Longhua¹, ZHANG Donghui¹, SUN Qiang²,
XIN Wanpeng², SONG Jingbo³, LI Jie³, LUO Qinglei⁴, WANG Wei¹

(1. Wuhan NARI Limited Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. Nanjing Electric HV Bushing Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. Suzhou Electrical Apparatus Science Academy Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215104, China; 4. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, China)

Abstract: High DC voltage bushing is one of the important equipment for the transmission flow of power station equipment. The research of high voltage direct current casing is of great significance to the development of high voltage direct current transmission technology in China. For the design of the rated voltage of ±400 kV, rated current DC 4 000 A swap type bushing, HVDC wall bushings key issues insulation structure analysis and optimization have been studied. This article focuses on the field of HVDC equipment under HVDC wall bushings mechanical strength and strong electric charges affect the environment space is calculated and the selection of insulation materials and calculation of experimental research, and draw important conclusions, which have important application.

Key words: high voltage bushing; resin impregnated glass fiber; direct; mechanical strength; electric field strength

0 引言

高压直流穿墙套管是换流变电站输电设备的重要设备之一, 其安全稳定的运行对变电站直流输电系统的安全有重要意义。随着高压直流输电体系在电网中比例的增加, 高压直流设备在电力系统中的需求也日益增加, 其电压等级也不断提高。而随着换流变电站的不断增多, 作为换流变压器上主要设

备——直流穿墙套管也相对增多^[1]。目前的特高压直流套管主要依赖于进口, 制约了高压直流输电设备发展, 因此进行高压直流套管的研究工作对发展中国的高压直流输电技术有着重大意义^[2]。

高压直流穿墙套管的绝缘系统设计比较复杂, 其中绝缘结构是关键问题^[3], 高压直流穿墙套管的复合空心绝缘及 SF₆ 介质具有明显的强场电压空间电荷累积效应, 能使电场发生复杂畸变, 给电场计算和绝缘结构优化带来困难^[4]。其运行中也使部分区

收稿日期:2015-06-09; 修回日期:2015-07-19

域电场强度分布非常集中,易发生闪络或击穿放电,严重威胁变电站直流输电系统的安全运行^[5]。文中以额定电压 ± 400 kV,额定电流 4 000 A 直流穿墙套管为设计对象,研究了高压直流穿墙套管绝缘结构与设计中遇到的关键性问题,重点对高压直流穿墙套管的机械性强度,强电场环境影响下的高压直流设备的电场计算方法,以及绝缘材料的选用进行针对性研究;同时进行空间电荷与电场的击穿试验,分析高压直流穿墙套管内的绝缘材料性能等。为业内有关高压穿墙直流套管的电场分布和机械性能、绝缘结构的优化提供有效的依据,对中国高压直流输电技术的发展具有一定的学术意义和应用价值。

1 高压直流穿墙套管机械强度的计算

1.1 设计要求

机械强度是设计该产品的重要基础,其挠度(挠度是在受力或非均匀温度变化时,杆件轴线在垂直于轴线方向的线位移或板壳中面在垂直于中面方向的线位移)决定高压直流穿墙套管(以下简称套管)的电容和电阻分布情况,带来的电场强度畸变主要依据^[6],在电场强度计算过程中还要考虑挠度的设计裕度,防止挠度过大而改变电场强度。在机械强度计算过程中与实际试验的误差约为 3% 左右,范围包括地震力、风力、压力、套管的总弯矩的计算以及弯曲阻力检测样本的分析,根据其结果进行产品的统一优化设计。

套管的设计参数见表 1。

表 1 套管设计参数

Table 1 Casing design parameters

参数	数值
套管外径 D_o/m	0.536
套管内径 D_i/m	0.500
硅橡胶增爬伞裙 D_j/m	0.710
临界断面到户外端重心点的距离 $d_{p外}/m$	2.897
临界断面到户内端重心点的距离 $d_{p内}/m$	2.025
临界断面到户外端套管上部(不包括终端部分)的距离 $d_{h外}/m$	5.455
临界断面到户内端套管上部(不包括终端部分)的距离 $d_{h内}/m$	3.830
临界断面到户外端套管上部终端的中心的距离 $d_{up外}/m$	5.970
临界断面到户内端套管上部终端的中心的距离 $d_{up内}/m$	4.370
户外端套管的重量 $m_{h外}/kg$	2 256.000
户内端套管的重量 $m_{h内}/kg$	1 875.000
固有频率的阻尼 $d/\%$	2.000
套管安装角度 α	π
地震系数 A_f	1.370
设计风速 $W_{1sq}/(km \cdot h^{-1})$	80.000
终端横向负荷 F_{up}/kg	133.000

1.2 机械压力计算

令重力因数 G 为 9.81, 根据上述设计参数进行地震力的计算。

户外端重心水平力

$$F_{h外}=1.2A_fm_{h外} \times 9.81=3.64 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (1)$$

户内端重心水平力

$$F_{h内}=1.2A_fm_{h内} \times 9.81=3.02 \times 10^6 \text{ N}。 \quad (2)$$

户外端重心垂直力

$$F_{v外}=0.6A_fm_{h外}b \times 9.81+9.81m_{h外}=4.03 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (3)$$

户内端重心垂直力

$$F_{v内}=0.6A_fm_{h内} \times 9.81+9.81m_{h内}=3.35 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (4)$$

户外端压缩力

$$F_{a外}=F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha = 3.81 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (5)$$

户内端压缩力

$$F_{a内}=F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha = 3.17 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (6)$$

户外端弯曲力

$$F_{b外}=F_v \cos \alpha + F_h \sin \alpha = 4.25 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (7)$$

户内端弯曲力

$$F_{b内}=F_v \cos \alpha + F_h \sin \alpha = 3.53 \times 10^5 \text{ N}。 \quad (8)$$

户外端地震时的弯矩

$$M_{bs外}=F_{b外}d_{p外}=4.24 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}。 \quad (9)$$

户内端地震时的弯矩

$$M_{bs内}=F_{b内}d_{p内}=3.16 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}。 \quad (10)$$

根据设计参数进行风力计算。

户外端风的弯曲力

$$F_{1w外}=0.021d_{h外}(D_e+D_s)W_{1sq2}=913.507 \text{ N}。 \quad (11)$$

户外端风的弯矩

$$M_{1bw外}=F_{1w外}d_{p外}=2 464.43 \text{ N} \cdot \text{m}。 \quad (12)$$

终端负荷的弯矩

$$M_{biip外}=F_{up外}d_{up外} \times 9.81=7.789 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}。 \quad (13)$$

由于户内端不受风力影响,不做计算。

因此,套管的总弯矩为

$$M_{tot外}=M_{bs外}+M_{1bw外}+M_{biip外}=4.34 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}。 \quad (14)$$

由上述计算结果可得断面系数:

$$Z=\frac{\pi}{32}+\frac{D_e^4-D_i^4}{D_e}=135 \times 10^{-3} \text{ m}^3; \quad (15)$$

套管断面的临界压力为

$$\sigma=\frac{M_{tot外}}{Z} \times 10^{-6}=3.2 \text{ N/mm}^2。 \quad (16)$$

胶浸纤维的检测样本数据见表 2。表 2 为在常温环境下的实际检测数值。弯曲强度被定义为在最外层的纤维的最大应力,弯曲试验产生的拉伸应力在试样的凸侧,压缩应力在试样的凹侧。因此从试样的表面上的应力形变与挠度曲线的斜率计算弯曲阻力。该样品测试时,考虑到其弯度对产品内部结构的影响,所以在中心弯曲垂直直线距离 20 mm 时,反

复 5 次, 间隔时间 10 min, 记录其弯曲力。

表 2 胶浸纤维的样本检测数据

检测类型	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5
弯曲阻力/N	168	152	171	155	163

胶浸纤维的平均压力

$$\sigma_{av} = \frac{1}{2} \text{平均值}(168, 152, 171, 155, 163) = 80.9 \text{ N/mm}^2.$$

胶浸纤维的总标准偏差

$$s = \frac{1}{2} \text{偏差值}(168, 152, 171, 155, 163) = 4.084 \text{ N/mm}^2.$$

所以, 套管上可允许的弯曲压力

$$R_c = \sigma_{av} - 2s = 72.7. \quad (17)$$

安全系数

$$S_c = \frac{R_c}{\sigma} = 22.7 > 2. \quad (18)$$

根据以上地震力、风力和终端负荷的计算结果, 套管的安全系数远远大于规定的安全系数 2, 即在恶劣的环境条件下, 可以满足 10 级地震和 12 级狂风的要求。

2 电场强度计算

电场强度计算比较复杂, 考虑因数比较多, 包括空间电荷的累积情况、极性反转、直流耐压、雷电冲击等一系列的因数^[7]。为了更好地改善电场强度和设计累积电荷释放等问题, 可采用电场分布轴对称相等法和径向极板平衡法来计算电场强度, 从而对系统进行优化。

要对各层电容屏的长度及电容量以及层间沿面场强进行计算。

套管的电容为同轴圆柱式电容, 其电容量为

$$C = (2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l) / \ln(r_2/r_1). \quad (19)$$

式(19)中: ϵ_0 为真空的介电系数; ϵ_r 为玻璃纤维浸环氧树脂材料的相对介电系数; r_2 、 r_1 分别为同心圆柱体电容的外、内半径。

半径 r_1 处的层间场强:

$$E_r = U / (r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}). \quad (20)$$

式(20)中, U 为该层同心圆柱体电容所承受的工频电压。

沿面场强为

$$EL = U/L. \quad (21)$$

式(21)中, L 为该层同心圆柱体电容屏梯差。

通过以上计算方式得出的结果见图 1。图 1 为电容心子径向与轴向场强分布曲线。

从图 1 可以看出, 径向场强是趋于平稳下降的,

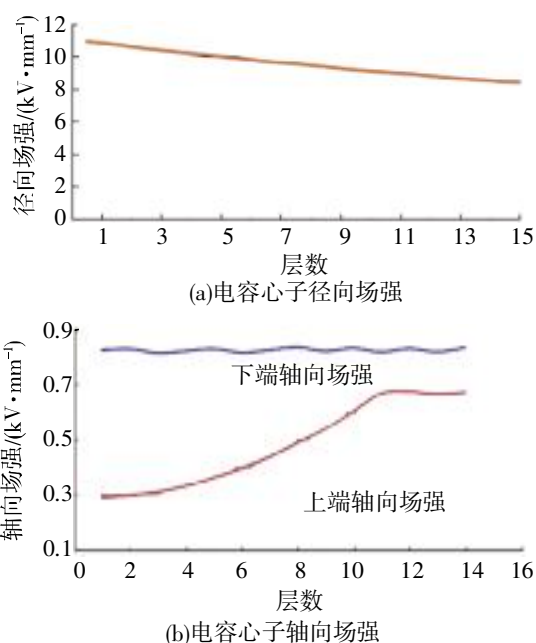


图 1 电容心子径向与轴向场强分布曲线

Fig. 1 The field distribution curve of radial and axial capacitor cores

没有尖端场强, 这样第 1 屏与末屏可以形成电位差, 使场强电压走向逐渐降低, 电场强度不受累积电荷的影响而畸变。即使瞬间电压提高, 末屏径向场强与空间累积电荷使场强发生变化也不能高于第 1 屏的径向场强, 所以该方法是稳定可靠的。

从图 1(b)可看出, 其电压的最高不超过 0.9 kV/mm, 其设计裕度完全可以满足其在工艺制作过程中的误差要求。

3 套管材料的选用

套管材料的选用是套管设计的重要方面, 要求其金属材料必须有满足要求的机械强度, 且不能产生磁场^[8]; 主绝缘采用环氧树脂浸渍玻璃纤维; 芯体与空心绝缘子填充的介质为 SF_6 气体。

3.1 金属材料的选择

金属材料主要选用的主要为铜材和航空合金铝质材料。

3.1.1 合金铝质材料的选择

通过 X 射线和能谱分析, 选用的合金铝型号为 ZL101A, 该合金铝主要是采用高纯度原材料, 降低了各种杂质含量, 添加微量元素使其合金具有更高的力学性能。

其化学成分: 硅为 6.5%~7.5%、镁为 0.25%~0.45%、钛为 0.08%~0.20%、铁(砂型铸造)为 0~0.2%、铁(金属型铸造)为 0~0.2%、铜 $\leq 0.1\%$ (杂质)、锰 $\leq 0.10\%$ (杂质)、锌 $\leq 0.1\%$ (杂质)、稀 $\leq 0.20\%$ (杂质)、锡 $\leq 0.01\%$ (杂质)、铅 $\leq 0.03\%$ (杂质)。使用热处理后, 其力学性

能: 抗拉强度的范围为 295~380 MPa、伸长率 $\delta^s \geq 3\%$ 、硬度大于 80 HB, 物理性能见表 3。

表 3 合金铝质材料的物理性能

Table 3 The physical properties of the alloy aluminum materials

参数	数值
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.68
熔化温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	557.00~613.00
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 时平均线膨胀系数 $\alpha/[\mu\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	21.40
100 $^{\circ}\text{C}$ 时比热容 $c/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	963.00
25 $^{\circ}\text{C}$ 时热导率 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	150.00
20 $^{\circ}\text{C}$ 时电导率 $\kappa/(\% \text{IACS})$	36.00
20 $^{\circ}\text{C}$ 时电阻率 $\rho/(\text{n}\Omega \cdot \text{m})$	44.20

通过上述技术指标的分析可知, 该合金铝质材料抗老化防腐性能优异, 机械强度满足套管重量要求, 微量杂质少, 导电性能强, 完全符合套管的设计要求。

3.1.2 铜质材料的选用

通过 X 射线和能谱分析, 选用了型号为 T₂ 的紫铜材料, 该紫铜有良好的导电、导热、耐蚀和加工性能, 方便焊接和钎焊, 并且含电阻性、导热性的杂质较少, 微量的氧对导电、导热和加工等性能影响不大, 不足之处是宜在高温还原性气氛中(大于 370 $^{\circ}$)加工和使用时可能引起“氢病”(普通紫铜在含氢或一氧化碳的还原性气氛中加热时, 氢或一氧化碳易与晶界的氧化亚铜(Cu_2O)作用, 产生高压水蒸气或二氧化碳气体, 可使铜破裂的现象)。

其化学成分: 铜与银为 99.90%、铋为 0.001%、镉为 0.002%、砷为 0.002%、铁为 0.005%、铅为 0.005%、硫为 0.005%。进行热处理后, 其力学性能: 抗拉强度的范围为 295~380 MPa、伸长率 $\delta^s \geq 3\%$ 、硬度范围为 90~120 HB。物理性能见表 4。

表 4 铜质材料的物理性能

Table 4 The physical properties of copper materials

参数	数值
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	8.9
熔化温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	1 083.0
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 时平均线膨胀系数 $\alpha/[\mu\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	16.7
100 $^{\circ}\text{C}$ 时比热容 $c/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	420.0
25 $^{\circ}\text{C}$ 时热导率 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	280.0
20 $^{\circ}\text{C}$ 时电导率 $\kappa/(\% \text{IACS})$	101.5
20 $^{\circ}\text{C}$ 时电阻率 $\rho/(\text{n}\Omega \cdot \text{m})$	18.0

该材料的材料设计关系到套管的导流性能, 套管在正常运行状态的温度为 70~90 $^{\circ}\text{C}$, 即使在非正常状态下, 其温度也不会超过 120 $^{\circ}\text{C}$ 的临界温度。而

该套管的环氧树脂的设计温度为 135 $^{\circ}\text{C}$, 该材料在产生“氢病”时的温度为 370 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 远大于套管的运行温度, 所以该材料在套管的正常和极限状态均能满足其设计要求。

3.2 主绝缘性材料的选用

套管的主绝缘性材料在缠绕过程中, 凝胶时间不得过长或过短, 在化学反应时, 应保持充分的通风时间, 使内部的反应气体充分挥发, 使其固化后内部无残留气体, 从而使制造工艺更加可靠稳定^[9-10]。综合考虑以上要求, 文中选用的材料为环氧树脂, 其基本特性见表 5。

表 5 环氧树脂的基本特性

Table 5 Basic properties of epoxy resins

参数	数值	检测标准
凝胶时间(100 $^{\circ}\text{C}$)/min	20.5	GELNORM
肖氏硬度(IOS 868)/D	85.0	IOS 868
T_g (DSC)/ $^{\circ}\text{C}$	125.0	IEC 61006—2014
电气强度/(MV $\cdot \text{m}^{-1}$)	25.0	IEC 60243
损耗因数(25 $^{\circ}\text{C}$, 50 Hz)tan $\delta/\%$	0.16	IEC 60250—1969

从表 5 可以看出, 环氧树脂材料的凝胶时间、固化后的硬度(机械强度)、电气性能均能满足设计要求, 尤其是介质损耗不大于 0.2%, 很适合作为套管的主绝缘性材料使用。

3.3 内部绝缘介质材料的选用

套管在运行直流电压时, 芯体表面具有空间吸附电荷作用, 为了不增加套管整体重量也不改变绝缘性能, 套管内的内部绝缘介质选用 SF_6 气体, 对其在均匀场强和不均匀场强中分别作耐压试验。基本击穿特性见图 2。

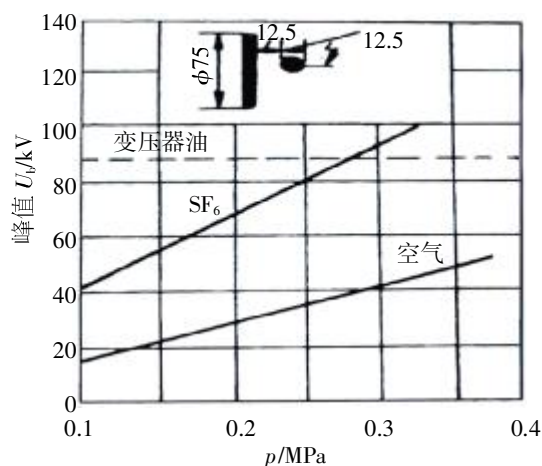


图 2 SF_6 气体、空气、变压器油在工频电压下的击穿电压
Fig. 2 Breakdown voltage of SF_6 gas, air and transformer oil in the power frequency voltage

图 2 显示了在均匀场强和不均匀场强中 SF_6 的

击穿特性。其中,均匀电场中 SF_6 介电强度约为相同气压下空气的 2.5~3.0 倍,在 0.3 MPa 时与在变压器油中的介电强度相当。

试验结果分析:

1)极强的电负性,容易吸附电子形成负离子,阻碍放电现象的形成;

2)分子直径相对大,使电子平均自由行程缩短,不易积累能量,而 SF_6 的电离电位较大,从而减小了电离的可能性;

3)电子与气体分子相遇时,因极化增加能量损耗,减弱其碰撞电离能力。

试验结果中, SF_6 工频击穿电压与间隙距离的关系见图 3。

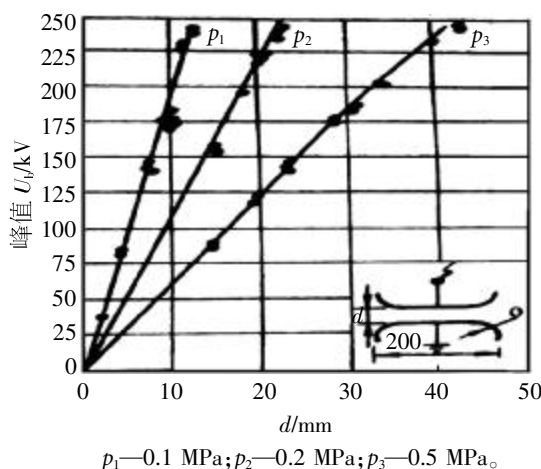


图 3 均匀电场中, SF_6 工频击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 3 In a uniform electric field, the relationship between the breakdown voltage of SF_6 and gap distance

图 3 显示在均匀场强中 SF_6 的击穿现象与电极表面状态。实际击穿的 E/p 小于 (E/p) 的临界值,呈现的巴申曲线有分支。其原因是因为电极表面有突出物。当电子崩由突出物处开始发展,达到一定长度而使崩头电子数达到临界值时,间隙击穿。

套管的内部主绝缘是固态的环氧树脂,腐蚀物对主绝缘性能无法产生影响。将套管注入 0.3 MPa 的 SF_6 气体,静放 24 h,进行电气试验。试验中产品表面状况为脏污、受潮等;脏污来源主要有组装遗留的杂质、开关操作时产生的微粒、运行中因放电引起的气体分解、生成物对绝缘材料的腐蚀产物;水分来源主要有气体本身含水、密封不好渗入的水分,水分形成霜的影响可以忽略。

试验结果证明,其介质损耗和局部放电试验均可通过。根据套管的电气试验可以判断,如果该气体内的污秽和水对套管有影响,其电气试验的介质损耗和局部放电是无法通过的。所以该气体适合该

产品的绝缘介质。

4 结语

文中对额定电压 ± 400 kV 的直流穿墙套管的绝缘性能进行了优化分析,对高压直流穿墙套管的绝缘结构与性能优化进行了针对性试验研究,对试验过程与选用材料进行了计算分析,最终结果满足了设计指标,产生了以下结论:

1)该产品的机械性能优异,按理论分析,其套管的抗弯系数已经远远超过了安全系数,适用于重震地区。满足高长度、高重量的特高压等级的穿墙套管产品的设计要求。

2)套管的主绝缘材料主要是由玻璃纤维和环氧树脂组成,其固化后的材料性质存在绝缘强度高,场强设计裕度大,制作工艺局限性少等特点,为设计套管的特高压等级的绝缘性能奠定了基础。

3)套管设计选用的金属材料 and 绝缘介质(SF_6 气体),各项电气试验均通过了国家标准,或高出国际标准,证明其运行稳定,且运行成本较低,可较好地满足此类套管的设计要求。

参考文献:

- [1] 陈忠,伍衡,黄和燕,等. ± 800 kV 直流穿墙套管耐压试验发生外闪原因分析及改进措施[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2133-2139.
CHEN Zhong, WU Heng, HUANG Heyan, et al. Cause analysis and improvement measure of ± 800 kV DC wall bushing occurring flashover during overvoltage withstand test[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2133-2139.
- [2] 刘振,卞星明,王黎明,等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 137-141.
LIU Zhen, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Calculation of electric field distribution along composite insulator strings and design of grading ring of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 137-141.
- [3] 张国强,张元录,崔翔华. 高压套管均压球电极形状优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 38-41.
ZHANG Guoqiang, ZHANG Yuanlu, CUI Xianghua. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 38-41.
- [4] 孙昭英,宿志一. 解决高压直流穿墙套管非均匀淋雨闪络的措施和途径[J]. 中国电力, 1994, 26(4): 36-39.
SUN Zhaoying, SU Zhiyi. The measures and approaches method of H VDC wall busing non-uniform the wet flashover[J]. Electric Power, 1994, 26(4): 36-39.
- [5] 王仲奕,童军心,赵彦珍. 高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 9-11.

- WANG Zhongyi, TONG Junxin, ZHAO Yanzhen. Comparison, analysis and improvement of the electric field distribution in high voltage AC and DC capacitive bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 9-11.
- [6] 江 汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-18.
- JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-18.
- [7] 范建斌, 宿志一, 李武峰, 等. 高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 1-6.
- FAN Jianbin, SU Zhiyi, LI Wufeng, et al. Research on profiles of HVDC post insulator and bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 1-6.
- [8] 关志成, 张福增, 王 新, 等. 特高压直流输电线路外绝缘设计和绝缘子选型[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 120-124.
- GUAN Zhicheng, ZHANG Fuzeng, WANG Xin, et al. Consideration on external insulation design and insulator selection of UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 120-124.
- [9] 吴光亚, 王 钢, 蔡 炜, 等. ± 500 kV 直流复合绝缘子的电位分布特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 132-135.
- WU Guangya, WANG Gang, CAI Wei, et al. Research of potential distribution of ± 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 132-135.
- [10] 吴光亚, 蔡 炜, 王 钢, 等. 输电线路不同型式绝缘子的特性分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 72-74.
- WU Guangya, CAI Wei, WANG Gang, et al. Performance analysis on all kinds of type of insulators for transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 72-74.
- [11] 柯钜金, 尹项根, 雷 蓉. 某大型变压器高压套管爆炸的原因分析及防范措施[J]. 广东电力, 2002, 15(6): 58-60.
- KE Jujin, YIN Xianggen, LEI Rong. Analysis of HV bushing explosion of a high-power transformer and improvement[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(6): 58-60.
- [12] 李华良, 郝宇亮, 钟 磊, 等. 一起 550 kV 油浸纸变压器套管工频闪络原因分析[J]. 高压电器, 2011, 39(2): 68-71.
- LI Hualiang, HAO Yuliang, ZHONG Lei, et al. Investigation on AC flashover of a 550 kV oil impregnated paper transformer bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 39(2): 68-71.
- [13] 毕 杰. 110 kV 变压器高压套管事故分析[J]. 变压器, 2002, 39(3): 41-42.
- BI Jie. Failure analysis of 110 kV transformer bushing[J]. Transformer, 2002, 39(3): 41-42.
- [14] 任晓红, 王 伟, 郑健康, 等. 500 kV 变压器套管典型故障及分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2513-2516.
- REN Xiaohong, WANG Wei, ZHENG Jiankang, et al. Research on typical failure of 500 kV transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2513-2516.
- [15] 蔡敬毅. 变压器高压油浸纸套管与环氧浸纸套管运行情况比较[J]. 广东电力, 2007, 20(8): 56-58.
- CAI Jingyi. Operation comparison between HV oil impregnated paper bushing epoxy resin impregnated paper bushings of transformers[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(8): 56-58.
- [16] 刘宏亮, 宋立杰, 刘海峰, 等. 220 kV 变压器油纸电容式套管缺陷分析[J]. 河北电力技术, 2009, 28(6): 23-24.
- LIU Hongliang, SONG Lijie, LIU Haifeng, et al. Defect analysis on 220 kV transformer oil-immersed capacitor bushing[J]. Hebei Electric Power, 2009, 28(6): 23-24.
- [17] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1973.
- LIU Qichang. Handbook of electrical insulation design[M]. Beijing: China Machine Press, 1973.
- [18] 张国强, 张元录, 崔 翔. 高压套管均压球电极形状优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 37-40.
- ZHANG Guoqiang, ZHANG Yuanlu, CUI Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 37-40.
- [19] SIMA W, YUAN T, YANG Q, et al. Effect of non-uniform pollution on the withstand characteristics of extra high voltage(EHV) suspension ceramic insulator string[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 445-455.
- 柯磊(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压技术、应用及相关管理工作。