

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.012

海拔 2 500 m 地区 ± 800 kV 特高压阀厅空气间隙操作 冲击放电特性

马旭东^{1,2}, 包正红^{1,2}, 耿江海³, 张成磊^{1,2}, 李渊^{1,2}, 丁玉剑⁴, 蒋玲^{1,2}, 王生富^{1,2}
(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810008; 2. 青海省高海拔电力研究重点实验室, 西宁 810000;
3. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为准确获得 2 500 m 海拔以上的 ± 800 kV 特高压直流工程送端阀厅的内部设计尺寸(汉语是半句话,用句号不太合适,请作者检查)。本文在 2 500 m 海拔的西宁高海拔试验基地,采用升降法开展了相间和相对地间隙的放电特性试验,得到了典型间隙的操作冲击放电电压 U_{50} ,并给出了放电电压与间隙距离的拟合公式。试验结果表明:空气间隙类型决定其放电特性曲线的增长率的不同,电极上均压球电极曲率半径的增大可以显著提高间隙的操作耐受能力,而针对同一种空气间隙来说,正向操作冲击电压施加的电极部位不同会直接导致放电特性曲线的不同。

关键词: 特高压直流; 阀厅; 典型空气间隙; 操作冲击; 放电试验

Switching Impulse Discharge Characteristics for Air Gap of ± 800 kV Ultra High Voltage Valve Hall in 2 500 m Altitude Area

MA Xudong^{1,2}, BAO Zhenghong^{1,2}, GENG Jianghai³, ZHANG Chenglei^{1,2}, LI Yuan^{1,2},
DING Yujian⁴, Jiang Ling^{1,2}, WANG Shengfu^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 2. Qinghai Key Laboratory of High Altitude Electric Power Research, Xining 810000, China;
3. North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: For obtaining accurately the internal design dimensions of the delivery valve hall of the ± 800 kV UHV DC project at altitude above 2 500 m, the discharge characteristic test of the phase-to-phase and phase to ground gap is performed by the lifting and lowering method at Xining high-altitude test base at altitude of 2 500 m, the switching impulse discharge voltage U_{50} of the typical gap is obtained and the fitting formula of the discharge voltage and the gap distance is given. The test results show that the type of air gap determines the magnitude of the growth rate of the discharge characteristic curve, and the increase of the radius of curvature of the grading sphere electrode on the electrode can significantly improve the switching withstanding ability of the gap. However, as for the same kind of air gap, the electrode position applied by the positive switching impulse voltage will not directly lead to the difference of the discharge characteristic curve.

Keywords: UHV DC transmission system; valve hall; typical air gap; switching impulse; discharge test

0 引言

2020 年 9 月,我国明确提出“双碳”目标,为实现碳达峰、碳中和,能源电力行业任务最重、责任最大,将承担主力军作用^[1-6]。《“十四五”规划》明确提出建

设数条特高压输电通道^[7-9]。我国目前在建与规划的多条特高压输电线路将经过高海拔地区,阀厅作为特高压直流输电工程中的枢纽环节,开展高海拔地区特高压阀厅空气间隙放电特性试验对高海拔地区换流站阀厅的外绝缘设计优化具有重要意义。

收稿日期:2023-07-18

基金项目:国网青海省电力公司科技项目(高海拔 ± 800 kV ($\pm 1\ 100$ kV)直流特高压输变电设备外绝缘关键技术研究)。

阀厅内的间隙结构主要有均压球/管母对地、换流阀塔底部对地以及均压球对管母3种。其中均压球/管母对地、换流阀塔底部对地间隙属于相对地典型间隙,均压球对管母之间的间隙属于相间典型间隙。姬大潜等人^[10]开展了低海拔地区阀厅典型间隙放电特性相关研究,针对均压球、管母、均压罩等金具组成的8种典型空气间隙进行操作冲击电压试验,并拟合得到相应的 U_{50} 幂指数曲线。郭贤珊等人^[11]在低海拔地区开展了换流站球-板间隙放电特性研究,针对不同尺寸均压球以及间隙距离进行了操作冲击电压试验,回归得到了大尺寸长间隙均压球-板间隙放电特性曲线,提出了均压球临界直径的计算公式。罗晓庆等人^[12]在0~1 000 m海拔高度下开展了穿墙套管端部均压环空气间隙放电特性研究,进行了均压环对墙不同间隙距离、不同对地高度的操作冲击电压试验,给出了0~1 000 m海拔高度下均压环对墙/地的最小安全间隙距离。以上关于阀厅内部典型空气间隙结构研究得到了不同阀厅金具的放电特性,具有一定的工程意义,但均在低海拔地区开展试验,其放电特性在高海拔地区的准确性有待验证。

廖永力等人^[13]在2 100 m海拔地区开展了直流线路空气间隙放电特性研究,对导线-杆塔间隙结构进行了操作冲击电压试验,得到了导线-杆塔间隙的临界间隙距离。丁玉剑等人^[14]在2011年开展了0~4 300 m海拔高度下直流输电线路塔头间隙放电特性研究,采用插值法得到了0~4 300 m海拔高度下的塔头间隙操作冲击放电电压曲线,提出了修正的海拔校正因数方法。丁玉剑等人^[15]在2013年开展了0~5 000 m海拔高度下典型长空气间隙放电特性研究,对不同间隙距离的棒-板与棒-棒典型长空气间隙进行操作冲击电压试验,对比了IEC 60071-2标准海拔校正方法的误差。以上关于高海拔地区空气间隙^[16]的研究得到了不同海拔高度下不同类型空气间隙放电特性,对海拔校正方法修正具有重要意义,但上述研究集中在高海拔地区典型线路杆塔以及长间隙放电特性上,未包含高海拔地区阀厅内部典型间隙放电特性研究。

本文按照阀厅内部典型间隙结构的配置,在2 500 m某地区的高海拔高压实验室搭建了实验平台,开展了正极性操作冲击放电特性试验,并利用幂指数函数拟合获得典型空气间隙下操作冲击放电电压 U_{50} 值与间隙距离 d 的特征曲线,总结得到间隙放电特性以及放电规律。本文成果可以指

导青海-河南特高压直流工程的阀厅设计以及后续高海拔地区输变电工程的相关设计。

1 典型间隙试验布局

本文在西宁高海拔试验基地(海拔2 500 m,气压0.78 MPa)开展阀厅内部典型间隙正极性操作冲击电压试验,阀厅内部典型间隙结构可分为相对地典型间隙与相间典型间隙。

1.1 相对地典型间隙

相对地典型间隙^[10]包括均压球对地、换流阀塔底部均压罩对地与管母对地3种结构。其中均压球分为1.2 m、1.6 m、2 m 3个直径等级,均压球对地结构的试验布局见图1(a);换流阀塔底部均压罩对地结构的试验布局见图1(b);管母自身结构为U型,管母管径为300 mm,两端有350 mm的弯头,管母长度为15 m,管母对地结构的试验布局见图1(c)。

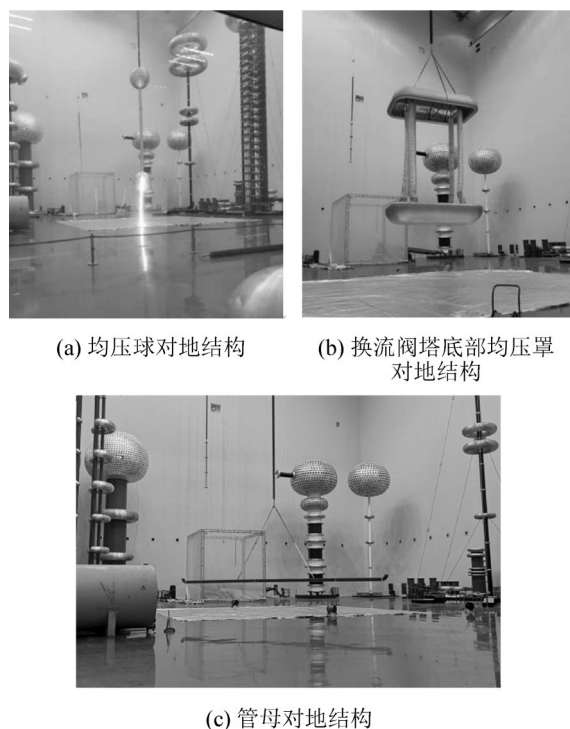


图1 相对地典型间隙试验布局
Fig. 1 Typical gap test layout of phase to ground

1.2 相间典型间隙

相间典型间隙^[10]分为直径1.6 m均压球对水平管母结构(A布局)、直径1.6 m均压球对直径2 m均压球结构(B布局)、直径1.6 m均压球对垂直管母结构(C布局)、水平管母对垂直管母结构(D布局),相间典型间隙试验布局见图2。

图2(a)与图2(c)中,1.6 m直径均压球对水平管母结构(A布局)与1.6 m直径均压球对垂直管母

结构两种试验布局(C 布局),由于加压顺序不同将导致放电电压特性的不同,需要交换加压顺序分别对均压球和管母进行两次试验,分别记为 A-1 与 A-2 试验、C-1 与 C-2 试验,在 A-1 试验中对水平管母施加正极性操作冲击电压,在 A-2 试验中对 1.6 m 直径均压球施加正极性操作冲击电压。同理,在 C-1 试验中对垂直管母施加正极性操作冲击电压,在 C-2 试验中对 1.6 m 直径均压球施加正极性操作冲击电压。

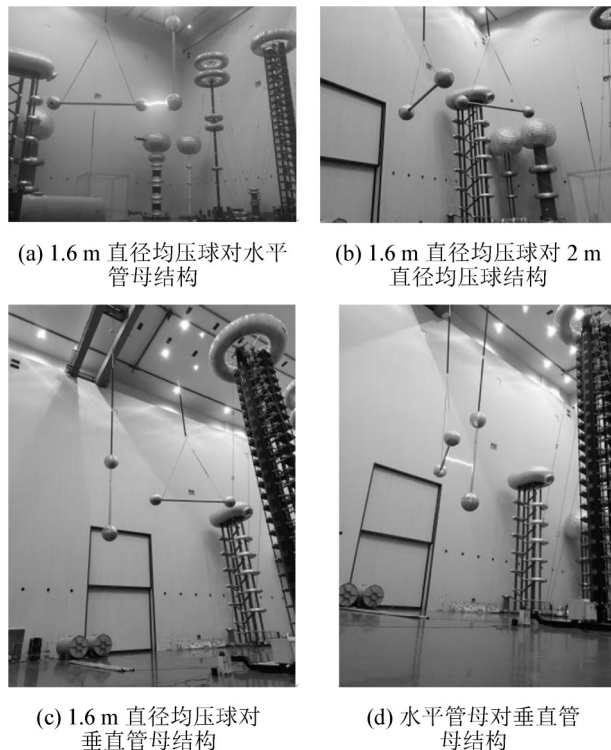


图2 相间典型间隙试验布局
Fig. 2 Typical gap test layout of phase to phase

1.3 试验程序与数据分析方法

本文采用升降法开展阀厅内部典型间隙正极性操作冲击放电特性试验,升降法通过对间隙耐受电压进行升压,对间隙放电电压进行降压以确定 50% 击穿概率间隙放电电压 U_{50} 。升降法试验流程图见图 3,具体试验过程如下:

- 1) 选定初始试验电压 U_0 ,并以 U_0 的 3% 作为电压级差 ΔU ;
- 2) 对试品施加初始试验电压 U_0 ,若间隙击穿,设定试验电压为 $U_1=U_0-\Delta U$,若间隙耐受,设定试验电压为 $U_1=U_0+\Delta U$;
- 3) 对试品施加试验电压 U_1 ,若间隙仍然击穿,设定试验电压为 $U_2=U_1-\Delta U$,若间隙仍然耐受,设定试验电压为 $U_2=U_1+\Delta U$;
- 4) 重复步骤 3) 直至原本发生击穿的电压降至

不发生击穿,或原本耐受的电压升至击穿,记录该施加电压为 U_i 。

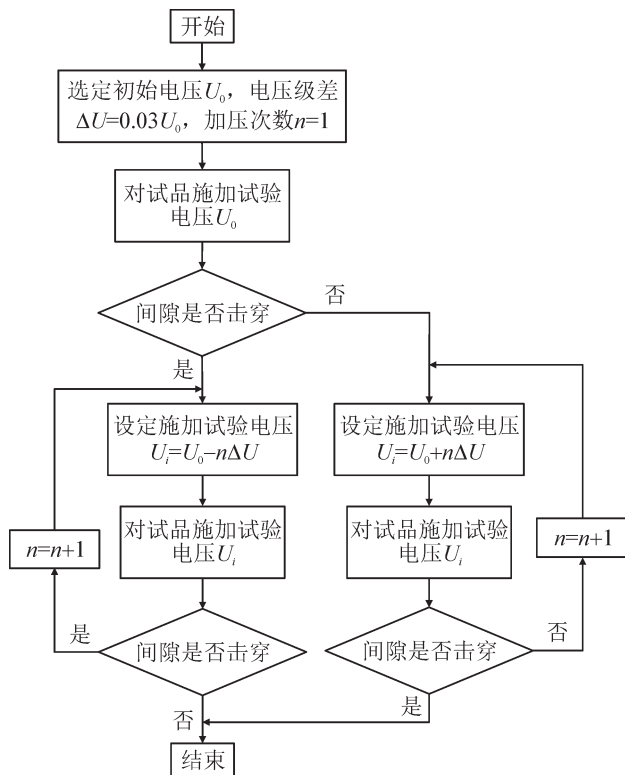


图3 升降法试验流程图
Fig. 3 Test flow chart of the lifting and lowering method

采用升降法进行 40 组试验后,对试验数据采用标准 GB/T 16927—2011.1^[15]中的加权平均方法进行分析处理,试品的 50% 击穿概率间隙放电电压 U_{50} 计算公式为

$$U_{50} = \frac{\sum n_i U_i}{\sum n_i} \quad (1)$$

式中: U_i 为每 i 级试验电压值; n_i 为每 i 级电压的试验次数。

2 放电特性研究

在直流系统运行过程中,不同形式的空气间隙所承受的过电压的等级是不一样的^[18-19],相对地典型间隙考虑到较长尺寸间隙(2~8 m)的放电电压,而相间典型间隙则考虑较短尺寸间隙(1~5 m)的放电电压。

2.1 相对地典型间隙的放电特性研究

采用升降法开展均压球对地、阀塔对地与管母对地 3 种相对地典型间隙正极性操作冲击放电特性试验,其中均压球直径有 1.2 m、1.6 m 与 2.0 m 3 种尺寸,得到不同间隙距离下相对地典型间隙放电电压特性曲线见图 4。

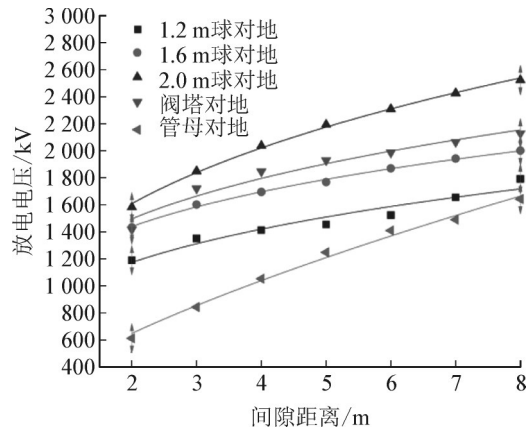


图4 相对地典型间隙的特性曲线
Fig. 4 Characteristic curve of typical gap of phase to ground

由图4可知,在3种不同尺寸均压球对地结构的放电特性曲线中,当±800 kV电压等级的操作冲击耐受水平要求为1 600 kV时,直径1.2 m、1.6 m、2.0 m均压球对地距离分别为6.16 m、3.12 m、1.96 m。即均压球曲率半径越大,操作放电电压越高。在同一间隙距离下,直径2.0 m均压球放电电压比直径1.6 m均压球提高11.7%~18.7%,直径2.0 m均压球放电电压比直径1.2 m均压球提高40.8%~72.4%。

在同一间隙距离下,相同放电电压时,均压球曲率半径的增大将使得间隙电场强度下降,使得间隙绝缘性能增大^[20-22],即在相同间隙距离下,大曲率半径均压球对地结构需要更高的放电电压。因此增加均压球的曲率半径可以很好的提高其耐受操作冲击的能力。

根据相对地典型间隙放电特性试验数据,采用幂指数拟合得到均压球对地、阀塔对地与管母对地拟合函数见表1。

表1 相对地典型间隙的幂指数拟合 Table 1 Power index fitting of typical gap pf phase to ground	
试验布局	拟合函数
直径1.2 m均压球对地	$U_0 = 970.74d^{0.27471}$
直径1.6 m均压球对地	$U_0 = 1\,221.58d^{0.23713}$
直径2.0 m均压球对地	$U_0 = 1\,281.31d^{0.32906}$
阀塔对地	$U_0 = 1\,247.52d^{0.26294}$
管母对地	$U_0 = 405.29d^{0.67969}$

由图4与表1可知,根据阀塔对地拟合函数可得到,±800 kV电压等级的操作冲击耐受水平为1 600 kV时的阀塔对地间隙距离为2.58 m,即阀塔底部均压罩对地放电电压在短间隙时可以满足±800 kV电压等级的操作冲击要求,因此在考虑阀塔底部对地的距离时,可以通过设置短间隙就足以

满足阀塔的绝缘要求。
管母对地结构的放电电压在4.0 m间隙距离以下时很低,在1 050 kV以下,但该结构的放电电压随着间隙距离的增大将显著增大。管母对地结构的在间隙距离达到8 m以上时,将满足±800 kV特高压直流绝缘要求。

2.2 相间典型间隙的放电特性研究

采用升降法开展直径1.6 m均压球对水平管母结构(A布局)、直径1.6 m均压球对直径2 m均压球结构(B布局)、直径1.6 m均压球对垂直管母结构(C布局)、水平管母对垂直管母结构(D布局)4种相间典型间隙正极性操作冲击放电特性试验,其中A布局与C布局分别对不同相的试品加压进行A-1、A-2以及C-1、C-2试验,得到不同间隙距离下相间典型间隙放电电压特性曲线见图5与图6。

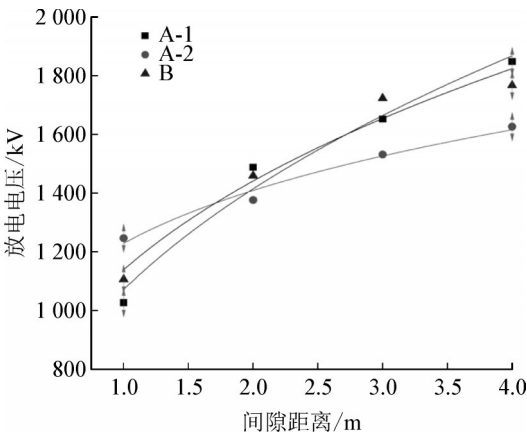


图5 相间典型间隙的特性曲线1
Fig. 5 Characteristic curve 1 of typical gap of phase to phase

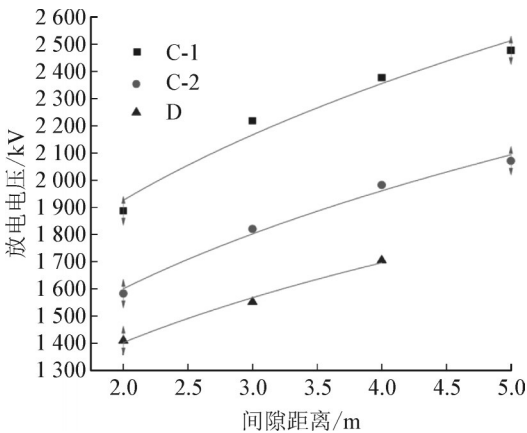


图6 相间典型间隙的特性曲线2
Fig. 6 Characteristic curve 2 of typical gap of phase to phase

对相间典型间隙的各组试验中得到的操作冲击放电电压值进行幂指数曲线拟合,得到操作冲击放电电压 U_{50} 与空气间隙距离 d 的幂指数函数拟合

结果见表2。

表2 相间典型间隙的幂指数拟合
Table 2 Power index fitting of typical gap of phase to phase

试验布局	拟合函数
水平管母对直径1.6 m均压球(A-1)	$U_0 = 1\,071.86d^{0.400\,88}$
直径1.6 m均压球对水平管母(A-2)	$U_0 = 1\,229.49d^{0.197\,34}$
直径1.6 m均压球对直径2 m均压球(B)	$U_0 = 1\,139.30d^{0.339\,81}$
垂直管母对直径1.6 m均压球(C-1)	$U_0 = 1\,257.49d^{0.290\,61}$
直径1.6 m均压球对垂直管母(C-2)	$U_0 = 1\,305.46d^{0.293\,34}$
水平管母对垂直管母(D)	$U_0 = 1\,158.81d^{0.274\,53}$

对比图5与图6中A布局试验与C布局试验的放电特性曲线可知,相同间隙尺寸下C布局试验的放电电压比A布局试验的高1.8%~7.2%,即垂直管母相对于水平管母来说,均压效果更好;对比A-1和A-2试验布局、C-1和C-2试验布局的放电曲线可知,对于同样的空气间隙,在正向操作冲击施加点发生变化时,其放电特性也会因此改变^[23-26]。

对于水平管母与均压球的试验(A布局),当间隙距离小于2.0 m时,其正向操作冲击施加点在均压球上的间隙布置(A-2)的放电电压高;当间隙距离大于2.0 m时,其正向操作冲击施加点在水平管母上的间隙布置的(A-1)放电电压高。对于垂直管母与均压球的试验(C布局),随着间隙距离的增大,正向操作冲击施加点在均压球的间隙布置的放电电压均高于施加点在垂直管母的间隙布置。

对比直径1.6 m均压球对直径2.0 m均压球结构(B布局)与水平管母对垂直管母结构(D布局)放电特性曲线可知,当间隙距离小于2.0 m时,均压球与均压球之间的放电电压低于水平管母与垂直管母之间的放电电压,但是由于均压球与均压球之间增长率较高,在间隙距离大于2.0 m时,均压球与均压球之间的放电电压将高于水平管母与垂直管母之间放电电压。

3 间隙电场仿真计算

3.1 相对地典型间隙电场仿真

3.1.1 不同均压球对地放电

两均压球的直径为1.2 m,管母直径为0.35 m,间隙长度取为2 m,绝缘子长度为8 m,仿真时在均压球表面施加800 kV电压。

电场仿真见图7。由图7可知,均压球半径为1.2 m时,最大场强为1 233 kV/m左右,位置位于为均压球底部。

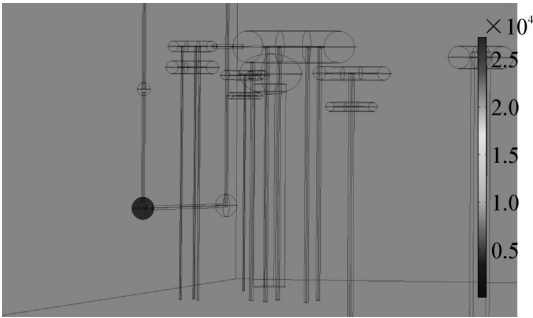


图7 1.2 m均压球对地的电场仿真
Fig. 7 Electric field simulation of 1.2 m grading sphere to ground

两均压球的直径为1.6 m,管母直径为0.35 m,间隙长度取为2 m,绝缘子长度为8 m,仿真时在均压球表面施加800 kV电压。电场仿真见图8。由图8可知,均压球半径为1.6 m时,球底部电场强度较大,为958 kV/m左右。



图8 1.6 m球对地放电的电场仿真
Fig. 8 Electric field simulation of discharge to ground of 1.6 m sphere

均压球半径为2 m时,对地放电的电场仿真见图9。由图9可知,均压球半径为2.0 m时,最大场强为774 kV/m左右,位置位于为均压球底部。

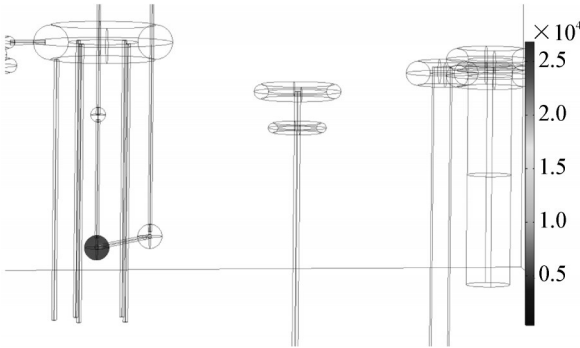


图9 2 m球对地放电的电场仿真
Fig. 9 Electric field simulation of discharge to ground of 2 m sphere

在考虑均压球对地距离对电场的影响时,分别设置间隙距离1 m、2 m、3 m,发现间隙距离为1 m,表面最大场强为902 kV/m;间隙距离为2 m,表面最大场强为774 kV/m;间隙距离为3 m,表面最大场强为673 kV/m,因此间距距离越大,表面最大电场场强越小。

3.1.2 管母对地放电

管母对地放电仿真见图10。由图10可知,当管母对地放电时,管母弯头处场强较大,随着间隙距离的增加,弯头处场强也逐渐减小,当管母距离地面1 m时,管母弯头处场强在1 170 kV/m左右,当管母距离地面5 m时,管母弯头处场强在1 004 kV/m左右,当管母距离地面9 m时,管母弯头处场强在940 kV/m左右。

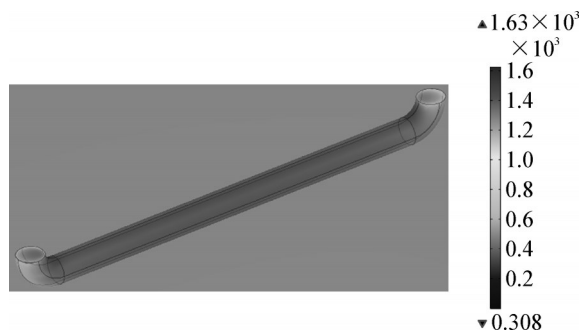


图10 管母对地放电仿真
Fig. 10 Discharge simulation of tube bus to ground

3.1.3 换流阀底部均压罩对地放电

仿真时在均压罩表面施加800 kV电压,改变阀塔与地面之间的距离(3~5 m)进行计算。换流阀底部均压罩对地放电仿真见图11。

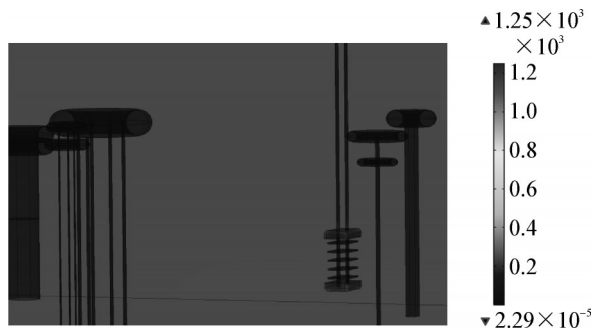


图11 换流阀底部均压罩对地放电仿真
Fig. 11 Discharge simulation of grading cover at the bottom of converter valve to the ground

由图11可知,当间隙距离不变时,场强最大区域出现在阀塔顶端,当间隙距离为3 m时,最大场强为580 kV/m左右;当间隙距离为4 m时,最大场强为371 kV/m左右;当间隙距离为5 m时,最大场强为210 kV/m左右。随着间隙距离增大,最大场强变小。

3.2 相间典型间隙电场仿真

3.2.1 水平管母与垂直管母放电

两管母直径均为0.35 m,长度为10 m,距地高度为10 m。仿真时在垂直管母表面施加800 kV电压,水平管母接地。改变垂直管母与水平管母的间隙距离进行仿真计算。水平管母与垂直管母放电仿真见图12。

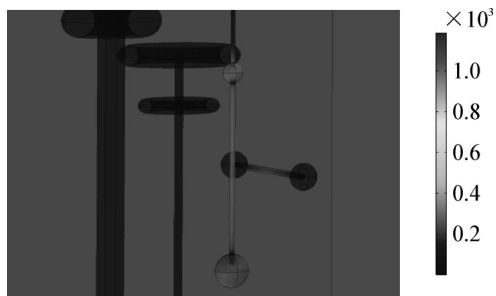


图12 水平管母与垂直管母放电仿真
Fig. 12 Discharge simulation of horizontal and vertical tube bus

由图12可知,当间隙距离不变时,场强最大区域出现在管母最短间隙两侧区域,当间隙距离为3 m时,最大场强为1 600 kV/m左右;当间隙距离为4 m时,最大场强为800 kV/m左右;当间隙距离为5 m时,最大场强为350 kV/m左右。随着间隙距离增大,最大场强变小。

3.2.2 均压球对垂直管母放电

均压球对垂直管母放电的电场仿真图见图13。由图13可知,均压球和垂直管母最短间隙两侧区域场强最大,为260~420 kV/m。



图13 均压球对垂直管母放电的电场仿真
Fig. 13 Electric field simulation of grading sphere to the vertical tube bus

3.2.3 垂直管母对均压球放电

垂直管母对均压球放电图见图14。由图14可知,均压球和垂直管母最短间隙两侧区域场强最大,为220~330 kV/m。

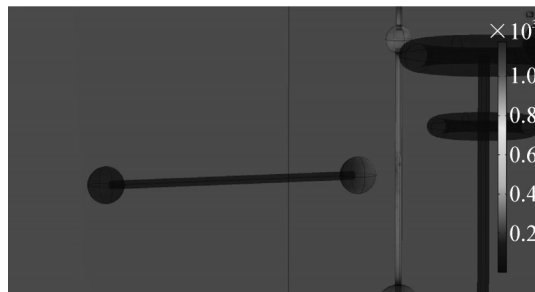


图14 垂直管母对均压球放电
Fig. 14 Discharge of vertical tube bus to the grading sphere

3.2.4 水平管母对均压球放电

均压球的直径为1.6 m,距离地面高度为10 m,

仿真时在水平管母表面施加电压,均压球接地。水平管母对均压球放电图见图 15。由图 15 可知,均压球和垂直管母最短间隙两侧区域场强最大,场强为 210~510 kV/m。

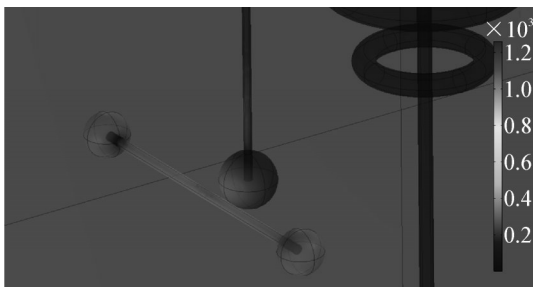


图 15 水平管母对均压球放电
Fig. 15 Discharge of horizontal tube bus to the grading sphere

3.2.5 均压球对水平管母放电

均压球的直径为 1.6 m,距离地面高度为 10 m,仿真时在均压球表面施加电压,水平管母接地。均压球对水平管母放电图见图 16。由图 16 可知,均压球和垂直管母最短间隙两侧区域场强最大,场强为 300~450 kV/m。

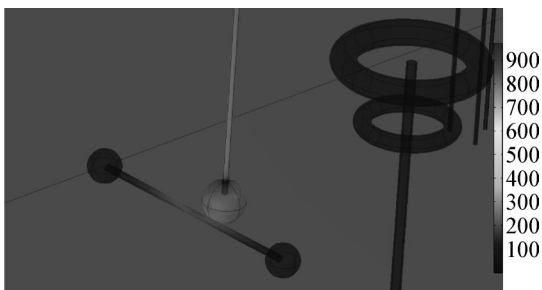


图 16 均压球对水平管母放电
Fig. 16 Discharge of grading sphere to the horizontal tube bus

3.2.6 均压球对均压球放电

均压球的直径为 1.6 m,距离地面高度为 10 m,仿真时在右侧均压球表面施加 800 kV 电压,左侧均压球接地。均压球对均压球放电图见图 17。由图 17 可知,球-球最短间隙两侧区域电场强度最大,在 80~621 kV/m。

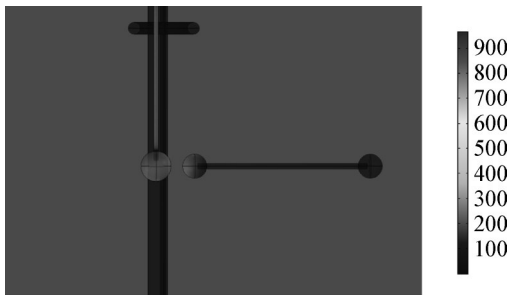


图 17 均压球对均压球放电
Fig. 17 Discharge of grading sphere to grading sphere

通过电场仿真得出,以下结论:

1)均压球对地、阀塔对地的典型间隙最大电场强度相对较低,而管母对地布局的最大场强相对较高;

2)在调整间隙距离时可以看到,距离越大,最大电场强度就越低,因此距离越大,间隙放电电压就越高;

3)垂直管母与直径 1.6 m 均压球、水平管母与直径 1.6 m 均压球的电场仿真中,同样间隙下加压方向在不同位置时,电场强度也会不同,这便导致最终放电电压的不同。

4 典型间隙距离推荐值

4.1 绝缘配合原则

换流站设备的绝缘水平应包括:直流短时耐受电压、额定操作冲击耐受电压和额定雷电冲击耐受电压^[27~32]。确定与直流电压水平相应的空气间隙时,操作冲击是比雷电冲击重要的决定因素。考虑到直流电压在高海拔地区放电特性的不同,因此在确定最终净距时只需要考虑操作冲击对间隙距离的影响^[33]。

通过式 2 可以计算获得相对地基准电压为 50% 的直流放电电压。

$$U_{50} = \frac{U_w}{(1 - 2\sigma)} \quad (2)$$

式中: U_w 为外绝缘要求的耐受电压水平; σ 为标准偏差;直流电压取为 0.03;操作冲击电压取 0.06。换流站阀塔 HY 换流变压器阀侧端-地额定操作耐受电压为 1 600 kV,HD 换流变压器阀侧端-地额定操作耐受电压为 1 300 kV,因此,换流站阀塔 HY 换流变压器阀侧端-地参考操作电压为 1 818 kV,而 HD 换流变压器阀侧端-地参考电压为 1 478 kV。

在考虑相间推荐距离时,则需增加安全系数 $K_a = 1.05$,公式为

$$U_{50} = \frac{K_a U_w}{(1 - 2\sigma)} \quad (3)$$

因此,相间绝缘水平可以参考取相对地避雷器保护水平的 1.7~1.8 倍, σ 取 0.035,因此,HY 换流变压器阀侧端-地参考相间操作冲击参考电压为 2 368 kV,HD 换流变压器阀侧端-地相间操作冲击参考电压为 1 858 kV,直流参考电压为 1 596 kV。

4.2 海拔 2 500 m 地区典型间隙距离推荐值

在考虑到操作冲击放电电压的影响后,得到最终海拔 2 500 m 地区阀厅净距推荐值见表 3。在综合考虑操作冲击放电电压和直流放电电压的影

响后,并考虑到放电曲线的饱和效应,得到最终海拔2 500 m地区阀厅净距推荐值见表4。

表3 海拔2 500 m地区的阀厅相对地净距推荐值
Table 3 Recommended net clearance of phase to ground of valve hall in 2 500 m altitude area

间隙类型	阀厅HD套管侧	阀厅HY套管侧
	1 478 kV/m	1 818 kV/m
1.2 m均压球对地	4.98	9.49
1.6 m均压球对地	2.99	5.82
2.0 m均压球对地	2.18	3.59
管母对地	2.62	4.84
阀塔对地	6.78	9.17

表4 海拔2 500 m地区的阀厅相间净距推荐值
Table 4 Recommended net clearance of phase-to-phase of valve hall in 2 500 m altitude area

间隙类型	阀厅HD套管侧	阀厅HY套管侧
	1 858 kV/m	2 368 kV/m
均压球与水平管母	7.03	—
均压球与均压球	2.70	5.05
均压球与垂直管母	5.09	—
水平管母与垂直管母	4.58	—

5 结语

1)不同典型间隙放电曲线由于电极和尺寸的不同而有所不同。相对地典型间隙中,管母对地的放电电压远低于其他几种典型间隙。在相同间隙长度下,典型间隙结构的放电电压由高到低依次为2.0 m均压球对地结构、阀塔对地结构、1.6 m均压球对地结构、1.2 m均压球对地结构、管母对地结构。

2)增大电极曲率半径可以显著提高耐受操作冲击的能力。±800 kV电压等级的操作冲击要求为1 600 kV时,直径1.2 m、1.6 m、2.0 m均压球对地的放电间隙距离为6.16 m、3.12 m、1.96 m。对青海—河南特高压直流输电工程,可以使用更大曲率半径的电极来提高其相同间隙下的设备外绝缘操作耐受水平。

3)垂直管母相较于水平管母的均压效果更好。在相同间隙距离下,垂直管母与均压球的放电电压高于水平管母与均压球的放电电压1.8%~7.2%。

4)对于同一相间典型间隙,当正向操作冲击施加点发生变化时,放电特性将改变。水平管母与均压球结构下,间隙距离小于2.0 m时,冲击电压施加在均压球上的放电电压高,间隙距离大于2.0 m时,冲击电压施加在管母上的放电电压高。垂直管母与均压球结构下,均是冲击电压施加在均压球上的

放电电压高。

5)根据电场仿真计算和放电特性计算,海拔2 500 m地区的典型阀厅相对地净距推荐值见表3,阀厅相间净距推荐值见表4。

参考文献

- [1] 余碧莹,赵光普,安润颖,等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(2):17-24.
YU Biying,ZHAO Guangpu,AN Runying,et al. Research on China's CO₂ emission pathway under Carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition),2021,23(2): 17-24.
- [2] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18): 6245-6258.
LI Hui,LIU Dong,YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(18): 6245-6258.
- [3] 谭显东,刘俊,徐志成,等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力,2021,54(5):1-6.
TAN Xiandong,LIU Jun,XU Zhicheng,et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year plan period under the goal of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Electric Power,2021,54(5): 1-6.
- [4] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang,KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a Carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(8): 2806-2818.
- [5] 丁涛,孙瑜歌,贺元康,等. 西北地区清洁供暖发展现状与典型案例(一):政策现状与现存问题[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4881-4891.
DING Tao,SUN Yuge,HE Yuankang,et al. Analyzing current development and typical cases of clean heating supply in northwest China (I): policy status and existing problems[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(15): 4881-4891.
- [6] 丁涛,牟晨璐,贺元康,等. 西北地区清洁供暖政策现状与典型案例(二):典型案例与经济性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(16):5126-5135.
DING Tao,MU Chenlu,HE Yuankang,et al. Analyzing current development and typical cases of clean heating supply in northwest China (II): typical cases and techno-economic analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(16): 5126-5135.
- [7] 余潇潇,宋福龙,周原冰,等. “新基建”对中国“十四五”

- 电力需求和电网规划的影响分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 11-17.
- YU Xiaoxiao, SONG Fulong, ZHOU Yuanbing, et al. Investigations on the impact of new infrastructure on electricity forecast and power system planning during the 14th Five-Year plan period[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 11-17.
- [8] 潘尔生, 李晖, 肖晋宇, 等. 考虑大范围多种类能源互补的中国西部清洁能源开发外送研究[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 158-164.
- PAN Ersheng, LI Hui, XIAO Jinyu, et al. Research on the development and transmission of clean energy in western China considering wide range coordination of multi-energy[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 158-164.
- [9] 路亮, 柳璐, 程浩忠, 等. 经济转型对西南地区能源需求的影响及预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7): 117-122.
- LU Liang, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Influence of economic transition on energy demand in southwest China and its prediction[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7): 117-122.
- [10] 姬大潜, 刘泽洪, 张进, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统阀厅空气间隙操作冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1864-1869.
- JI Daqian, LIU Zehong, ZHANG Jin, et al. Switching impulse characteristics for air gap of valve hall in ± 800 kV ultra high voltage DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1864-1869.
- [11] 郭贤珊, 丁玉剑, 姚修远, 等. ± 1 100 kV 特高压直流换流站球-板间隙放电特性及取值研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3701-3710.
- GUO Xianshan, DING Yujian, YAO Xiuyuan, et al. Study on discharge characteristics and value of ball plate gap in 1 100 kV UHVDC converter station[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3701-3710.
- [12] 罗晓庆, 胡伟, 徐涛, 等. ± 1 100 kV 直流U型结构穿墙套管空气间隙放电特性及间隙距离选择[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 946-952.
- LUO Xiaoqing, HU Wei, XU Tao, et al. Air gap flashover characteristics and selection of gap distances for ± 1 100 kV DC U-shaped wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 946-952.
- [13] 廖永力, 高超, 李锐海, 等. 高海拔地区 ± 800 kV特高压直流线路空气间隙操作冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3161-3165.
- LIAO Yongli, GAO Chao, LI Ruihai, et al. Impact - discharge characteristics of ± 800 kV UHVDC line air gap operation in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3161-3165.
- [14] 丁玉剑, 廖蔚明, 孙昭英, 等. ± 1 000 kV 直流输电线路塔头间隙冲击放电特性试验及海拔校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 156-162.
- DING Yujian, LIAO Weiming, SUN Zhaoying, et al. Experimental study on impact discharge characteristics and altitude correction of Tower head gap in ± 1 000 kV DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 156-162.
- [15] 丁玉剑, 李庆峰, 廖蔚明, 等. 高海拔地区典型长空气间隙的操作冲击放电特性和海拔校正[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1441-1446.
- DING Yujian, LI Qingfeng, LIAO Weiming, et al. Switching impulse discharge characteristics and altitude corrections for typical long air gaps at high altitude areas[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1441-1446.
- [16] 万启发, 霍锋, 谢梁, 等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2499-2505.
- WAN Qifa, HUO Feng, XIE Liang, et al. Summary of research on flashover characteristics of long air-gaps[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2499-2505.
- [17] 高电压试验技术: GB/T 16927. 1—2011 [S]. 2011.
- High voltage test technology: GB/T 16927. 1—2011 [S]. 2011.
- [18] 马丽斌, 刘磊, 高超, 等. 2 400 m海拔下换流站阀厅内金具空气间隙操作冲击电压放电特性[J]. 南方电网技术, 2016, 10(11): 9-15.
- MA Libin, LIU Lei, GAO Chao, et al. Impulse discharge characteristics of air gap operation in the valve hall of converter station at 2 400 m altitude[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 9-15.
- [19] 黄永瑞, 李芳芳, 何青连, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统换流站绝缘配合研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 81-86.
- HUANG Yongrui, LI Fangfang, HE Qinglian, et al. Research on converter station insulation coordination of ± 800 kV ultra high voltage direct current power transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 81-86.
- [20] 陈锡磊, 周浩, 王东举, 等. 参数修正法用于浙西 ± 800 kV换流站阀厅空气净距设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2185-2189.
- CHEN Xilei, ZHOU Hao, WANG Dongju, et al. Air clearance design for valve hall of zhexi ± 800 kV UHVDC converter station using parameter g[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2185-2189.
- [21] PHILLIPS T A, ROBERTSON L M, ROHLFS A F, et al. Influence of air density on electrical strength of transmission line insulation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(8): 948-961.
- [22] HARADA T, AOSHIMA Y, ISHIDA Y, et al. Influence of air density on flashover voltages of air gaps and insulators

- [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(6): 1192-1202.
- [23] 章润陆, 陆宠惠. 超高压线路外绝缘气象修正系数的统计分布和海拔修正[J]. 高电压技术, 1979(4): 3-15.
ZHANG Runlu, LU Chonghui. Statistical distribution and altitude correction of meteorological correction coefficient of extra-high voltage line insulation[J]. High Voltage Engineering, 1979(4): 3-15.
- [24] 范彩云, 黄永瑞, 刘堃, 等. ± 800 kV 滇西北至广东特高压直流输电工程阀厅空气净距研究[J]. 电工技术, 2016(10): 23-24.
FAN Caiyun, HUANG Yongrui, LIU Kun, et al. Study on clear air distance of valve hall in ± 800 kV UHVDC transmission project from northwest Yunnan to Guangdong[J]. Electric Engineering, 2016(10): 23-24.
- [25] 徐健涛, 徐光辉, 常林晶, 等. $\pm 1 100$ kV 特高压换流站阀厅金具空气净距计算研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 28-33.
XU Jiantao, XU Guanghui, CHANG Linjing, et al. Calculation of air clearance in fittings of valve hall of $\pm 1 100$ kV UHVDC converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 28-33.
- [26] 陈赦, 庄池杰, 曾嵘, 等. 大直径球-板结构改进间隙系数及其在特高压直流换流站空气间隙净距计算中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1360-1366.
CHEN She, ZHUANG Chijie, ZENG Rong, et al. Improved gap factor of large sphere-plane and its application in calculating air gap clearance in UHVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1360-1366.
- [27] 孔志达, 孙仕达, 卢毓欣. 高压直流换流站电气设计标准化及优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 20-27.
KONG Zhida, SUN Shida, LU Yuxin. Research on standardization and optimization of electrical design of HVDC converter stations[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 20-27.
- [28] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 特高压换流站高压换流变及防火墙上设备减隔震分析研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 204-212.
SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Analysis and research on vibration control and isolation of high voltage converter transformer and equipment on firewall in UHV converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 204-212.
- [29] 王磊, 万磊, 殷幼军, 等. ± 500 kV 混合直流受端 VSC 换流站的雷电侵入波过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 82-89.
WANG Lei, WAN Lei, YIN Youjun, et al. Overvoltage of lightning intruding waves of ± 500 kV vsc converter station in hybrid hvdc system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 82-89.
- [30] 张吼, 韩幸军, 郭安琪, 等. 柔直换流站穿墙套管绝缘击穿分析及材料改性机理研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(5): 113-119.
ZHANG Hou, HAN Xingjun, GUO Anqi, et al. Analysis of insulation breakdown of the wall bushing in a flexible DC converter station and modification mechanism research on the material[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 113-119.
- [31] 刘志远, 于晓军, 李秀广, 等. 直流换流站中性母线避雷器组故障仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 86-92.
LIU Zhiyuan, YU Xiaojun, LI Xiuguang, et al. Fault simulation of neutral bus arrester in DC converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 86-92.
- [32] 王帅, 任军辉, 姜彦涛, 等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 11-17.
WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.
- [33] 绝缘配合 第3部分: 高压直流换流站绝缘配合程序: GB/T 31. 3—2017 [S]. 2017.
Insulation match — Part 3: HVDC converter station insulation match procedure: GB/T 31. 3—2017 [S]. 2017.
- 作者简介:**
马旭东(1992—), 男, 工程师, 主要从事输电线路及外绝缘技术研究工作。E-mail: 1157575912@qq.com。
包正红(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术及外绝缘技术研究工作。
耿江海(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术及外绝缘技术研究工作。
张成磊(1996—), 男, 助理工程师, 主要从事输电线路及外绝缘技术研究工作。
李渊(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术及外绝缘技术研究工作。
丁玉剑(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事高电压技术及外绝缘技术研究工作。
蒋玲(1988—), 女, 高级工程师, 主要从事高电压技术及外绝缘技术研究工作。
王生富(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事输电线路及外绝缘技术研究工作。