

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.005

## 极端环境下816 kV高压直流隔离开关设备关键技术研究

王巧红, 姚灿江, 孙龙勇, 李 竞, 魏新敬, 李宇鹏

(河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

**摘要:** 816 kV 直流隔离开关是 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程换流站的关键设备,其优异的绝缘性能与良好的机械可靠性直接影响系统安全运行。针对4 500 m超高海拔与 $-60$   $^{\circ}\text{C}$ 极端低温环境,文中开展了隔离开关触头耐磨特性与绝缘性能的系统研究。通过分析温度与镀银层磨损量、接触电阻的影响规律,揭示了低温环境下接触电阻的演化机理,并据此优化了触头结构。采用APDL命令流方法对隔离开关进行参数化建模与电场仿真,分析了支架高度、均压环尺寸、断口间隙等关键参数对电场强度的影响规律,确定了适用于4 500 m海拔条件的最优屏蔽结构。在此基础上,研制了816 kV 直流隔离开关样机,并完成了4 500 m海拔条件下的绝缘试验验证。结果表明,所研制产品满足高海拔地区工程应用要求,具备良好的绝缘性能与运行可靠性。研究结果为极端环境下高压直流隔离开关的设计提供了理论依据与数据支撑。

**关键词:** 816 kV; 直流隔离开关; 4 500 m海拔; 电场仿真

### Research on Key Technologies of 816 kV HVDC Disconnecter Under Extreme Environmental Conditions

WANG Qiaohong, YAO Canjiang, SUN Longyong, LI Jing, WEI Xinjing, LI Yupeng

(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** 816 kV DC disconnector is a critical component in  $\pm 800$  kV UHVDC converter stations, and its excellent insulation performance and reliable mechanical operation directly contribute to the safe operation of the system. Aiming at the extremely high altitude of 4 500 m and the extreme low temperature of  $-60$   $^{\circ}\text{C}$ , in this paper a systematic study on the wear resistance characteristics of the disconnector contacts and its insulation performance is carried out. By analyzing the influence of temperature on the wear amount of the silver coating layer and on the contact resistance, the evolution mechanism of contact resistance under low-temperature environments is revealed and, on this basis, the contact structure is optimized. The APDL command flow method is used for parametric modeling and electric field simulation of the disconnector. The influence of such key parameters as support height, grading ring dimensions and distance across open contacts on electric field intensity is analyzed, and the optimal shielding structure suitable for 4 500 m altitude conditions is determined. Based on these findings, a prototype of the 816 kV DC disconnector is developed and subjected to insulation tests at 4 500 m altitude conditions. The results demonstrate that the developed product meets the engineering application requirements for high-altitude regions and exhibits excellent insulation performance and operational reliability. The research result can provide a theoretical basis and data support for the design of HVDC disconnector in extreme environments.

**Key words:** 816 kV; DC disconnector; altitude at 4 500 m; electric field simulation

## 0 引言

816 kV 直流隔离开关为 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程换流站的关键设备,主要安装直流场极线侧及直流滤波器高压侧,提供可见的安全绝缘距离,用于断路器、换流阀、平波电抗器等电器设备与高压线路进行电气隔离,产品优良的绝缘性能将为操作和维护人员提供可靠的安全屏障。

随着直流输电技术的日益成熟及中国对西北、西南地区风电、水电向东部地区跨省联络传输的实际需求, $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程线路送端逐渐向高海拔地区拓展延伸。青海—河南 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程海南换流站海拔高度 2 880 m;白鹤滩—江苏 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程送端布拖换流站海拔 2 500 m;金上一湖北 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程送端帮果换流站海拔 2 980 m,卡麦换流站海拔 3 750 m。藏东南至粤港澳大湾区 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程送端换流站昌都换流站海拔高度 4 300 m。随着海拔升高,空气密度和压力下降,空气绝缘强度显著降低,隔离开关需要足够的电气间隙和爬电距离来承受工作电压和过电压。同时,高海拔地区常伴随极端低温(如藏东南地区冬季可达 $-40$   $^{\circ}\text{C}$ 以下),低温环境下触头材料的力学性能与电接触特性发生变化,可能影响设备的长期运行可靠性。

目前,国内外学者已开展大量研究。文[1]研究了 2 400 m 海拔下换流站阀厅内金具空气间隙的操作冲击放电特性;文[2]研制了 4 000 m 海拔 1 100 kV GIS 复合套管,提出了外绝缘电压和干弧距离的修正方法;文[3]对 4 000 m 左右高海拔换流站空气间隙放电特性及海拔修正进行了研究。在隔离开关电场仿真方面,文[4-7]针对国内隔离开关电场仿真、均压环设计、长间隙交、直流放电特性开展过研究;文[8-10]对隔离开关梅花触头电镀银层及镀层耐磨性、硬度等也进行过大量研究,但上述研究多侧重于常规环境或单一因素的影响,对于极端低温( $-60$   $^{\circ}\text{C}$ 以下)与超高海拔(4 500 m)复合环境下的触头耐磨特性及其与设备绝缘性能的协同优化研究仍较为缺乏。

开展极端环境下 816 kV 高压直流隔离开关关键技术研究。通过低温机械操作试验,揭示温度对触头镀银层磨损及接触电阻的影响规律;基于 APDL 参数化建模与电场仿真,分析关键结构参数对电场强度的影响,确定适用于 4 500 m 海拔的最

优屏蔽结构,研制样机并完成绝缘型式试验验证。研究成果可为极端环境地区换流站设备设计提供理论依据与数据支撑,并可推广至其他高压产品设计。

## 1 816 kV 高压直流隔离开关结构特点

### 1.1 产品结构特点

4 500 m 海拔直流场 816 kV 直流隔离开关采用双柱折叠插入式结构,见图 1。该结构既能满足合闸时大电流的载流能力,又能在电路检修或与其他设备进行电气隔离时灵活分闸的功能,同时该结构型式设计紧凑,能减少换流站的占地面积,节约工程投资。绝缘子中间的三角框架设计可以增大产品的固有频率,提高产品的抗风稳定性。常规海拔 816 kV 直流隔离开关绝缘参数及 4 500 m 海拔修正后的参数见表 1。

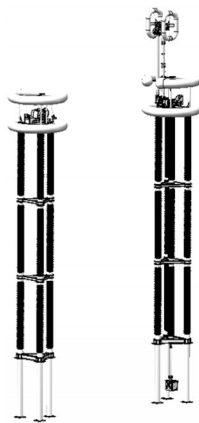


图1 816 kV 直流隔离开关总体方案

Fig. 1 Overall design of the 816 kV DC disconnector

表1 816 kV 直流隔离开关海拔修正参数

Table 1 Altitude correction parameters for 816 kV DC disconnector

| 项目       | 额定电压/kV | q 值  | 修正系数  | 修正后电压/kV |
|----------|---------|------|-------|----------|
| 直流耐受电压   | 1 224   | 0.90 | 1.472 | 1 801    |
| 雷电冲击耐受电压 | 1 950   | 1.00 | 1.536 | 2 995    |
| 操作冲击耐受电压 | 1 675   | 0.70 | 1.351 | 2 262    |
| 无线电干扰电压  | 816     | 0.75 | 1.380 | 1 126    |

### 1.2 空气间隙距离与对地间隙设计

#### 1.2.1 空气间隙设计

在计算隔离开关空气间隙距离的时候,首先需要确定隔离开关断口两侧的间隙类型并确定产品的间隙系数。针对双柱水平折叠插入型直流隔离开关,通常把隔离开关断口看作棒—棒间隙,并根据标准正极性 50% 操作冲击电压来确定断口间隙<sup>[11-13]</sup>。

$$U_{50RP} = 3\,450 / (1 + 8/d) \quad (1)$$

式(1)中: $d$ 为间隙距离,m; $U_{50RP}$ 为 50% 统计操作冲击电压,kV。

用简化统计法计算统计标准正极性50%操作冲击电压 $U_{50}$ 可得

$$U_{50} = U / (1 - 1.3\sigma_i) \quad (2)$$

式(2)中: $U$ 为断口间标准操作冲击耐受电压,取2 262 kV; $\sigma_i$ 为绝缘标准偏差,取0.06。

对于4 500 m海拔816 kV直流隔离开关,将 $U=2 262$  kV代入式(3)得

$$U_{50} = U / (1 - 1.3\sigma_i) = 2 262 / (1 - 1.3 \times 0.06) = 2 453.4 \text{ kV} \quad (3)$$

对于隔离开关断口间放电过程归纳为棒—棒放电过程,用棒—棒间隙系数 $k$ 进行修正。则令

$$kU_{50RP} = U_{50} \quad (4)$$

式(4)中, $k$ 为操作冲击典型间隙系数,断口间间隙系数1.48(根据设计经验得到)。

对于4 500 m 816 kV直流隔离开关

$$U_{50RP} = U_{50} / k = 2 453.4 \div 1.48 = 1 657.7 \text{ kV} \quad (5)$$

将 $U_{50RP}$ 代入式(1)得

$$d = \frac{8 \times U_{50RP}}{3 450 - U_{50RP}} = \frac{8 \times 1 657.7}{3 450 - 1 657.7} = 7.4 \text{ m} \quad (6)$$

计算得最小断口间隙 $d=7.4$  m。为预留绝缘安全裕度,同时避免断口过大增加主导电系统制造难度,将隔离开关最小断口间隙确定为8 m。

### 1.2.2 对地间隙设计

根据招标技术规范要求,直流场极线设备爬电比距要求不小于57 mm/kV,CF系数不超过4.2,816 kV直流隔离开关爬距计算时电压按850 kV。根据以上参数要求,4 500 m海拔隔离开关所设计绝缘子支柱总高度15 m,爬电距离57 m(大于48.45 m),干弧距离13.74 m,CF系数4.15,满足设计要求。

## 2 低温环境下触头耐磨特性研究

### 2.1 试验平台与方案

触头作为隔离开关的核心组件,其材料选择与工艺处理直接影响整体运行寿命。理想触头需兼具抗熔焊性、高导电导热性、耐电弧侵蚀及耐磨性,但因性能间存在相互制约,单一材料或工艺难以全面满足要求。触头电寿命可通过理论模型较准确推算,然而耐磨性能难以通过仿真精确获取,尤其在低温等严苛环境中。因此,需依托高寒条件下的专项耐磨试验,对触头磨损特性进行实证研究,从而为其寿命评估提供可靠依据。

针对816 kV高压直流隔离开关,构建专用机械操作试验平台见图2。在不同低温环境(0、-20、-40、-60 ℃)下,分别执行干摩擦与涂覆导电润滑脂两种试验方案,每种方案累计2 000次机械操作。每种工况均设置3组平行试验,试验结束后系统检测触

头的回路电阻、镀层磨损量及表面形貌粗糙度,以综合评价其性能演变规律。



图2 816 kV高压直流隔离开关机械操作试验平台

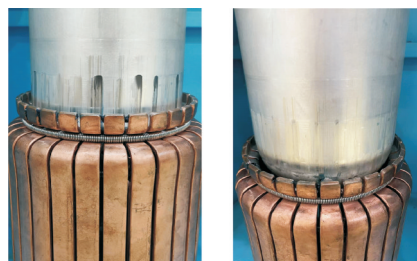
Fig. 2 Mechanical operation test platform of the 816 kV DC disconnect

试验首先在0 ℃环境下进行,待温度稳定8 h后,测量回路电阻并采用涂镀层测厚仪测量触头初始镀层厚度;随后执行2 000次机械操作,同步测量回路电阻变化及操作后的镀层厚度。完成该温点测试后,更换新触头进行下一阶段试验。在降温至-20 ℃前,预先测量3次电阻作为基准;待-20 ℃稳定8 h后,执行2 000次操作并完成相应数据采集。后续温点测试依此序贯进行,全部试验结束后将设备恢复至常温并停机。

### 2.2 试验结果与分析

#### 2.2.1 触头表面形貌分析

在-60~-0 ℃的条件下,通过在高低温试验平台内进行2 000次机械操作后,触头有无润滑脂外观状态,其中-20 ℃工况下触头对比见图3。



(a) 有润滑脂

(b) 无润滑脂

图3 -20 ℃时触头外观对比图

Fig. 3 Comparison of contact appearance at -20 ℃

由图3可知,涂抹润滑脂的触头在完成机械操作后,其接触线段区域表面较为光滑,且接触区域因材料致密化或氧化膜形成而呈现颜色加深现象;相比之下,未润滑触头在同一区域则出现明显的线状磨痕,表明存在直接的磨粒磨损或粘着磨损。

#### 2.2.2 触头磨损量分析

触头机械操作前后镀层参数见表2,形成的触头镀银层磨损量变化趋势见图4。

表2 触头机械操作前后镀层参数表

Table 2 Contact coating parameter table before and after mechanical operation

| 温度/℃ | 编号 | 硬度变化量/HV |      | 磨损量/ $\mu\text{m}$ |       |
|------|----|----------|------|--------------------|-------|
|      |    | 有润滑      | 无润滑  | 有润滑                | 无润滑   |
| 0    | 1  | 3.5      | -1.6 | 2.13               | 9.70  |
|      | 2  | 4.6      | -0.9 | 2.21               | 12.82 |
|      | 3  | 6.0      | 1.8  | 1.57               | 8.13  |
| -20  | 1  | 0.8      | -2.1 | 1.43               | 5.66  |
|      | 2  | 2.2      | -3.1 | 2.11               | 7.12  |
|      | 3  | 3.6      | -1.3 | 1.59               | 8.31  |
| -40  | 1  | -3.7     | 1.9  | 1.28               | 4.67  |
|      | 2  | -0.7     | 0.3  | 1.66               | 3.08  |
|      | 3  | -0.6     | 2.5  | 1.84               | 6.67  |
| -60  | 1  | 0.5      | 1.2  | 1.82               | 2.34  |
|      | 2  | 1.3      | -3.0 | 2.34               | 3.88  |
|      | 3  | -0.9     | 2.6  | 2.75               | 4.40  |

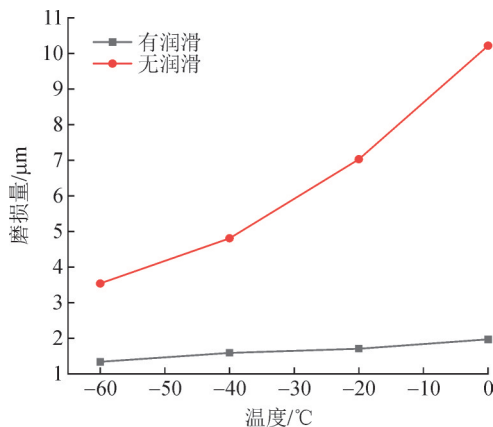


图4 触头镀银层磨损量变化趋势图

Fig. 4 Wear amount change trend chart of contact silver plating layer

由表2可知,经过润滑处理的触头镀层耐磨性显著提高,同时其回路电阻测量值保持在较低且稳定的范围内,这说明润滑脂有效抑制了表面磨损与氧化,维持了接触界面的导电稳定性。

由图4可知,镀银层的材料损耗率与工作温度呈负相关关系。在无润滑摩擦过程中,界面摩擦热效应使得接触区域维持较高温升,这导致镀银层产生蠕变软化现象,进而促进微观裂纹的萌生与扩展。同时材料表层硬度下降会加剧粘着磨损机制,显著提升体积磨损率。摩擦作用引发的基体塑性变形会在亚表层产生空位缺陷与微裂纹网络,造成材料组织结构疏松化及力学性能退化,最终形成的软化过渡层将严重损害镀银层的整体耐磨特性。

### 2.2.3 接触电阻分析

触头回路电阻检测参数见表3,形成的接触电阻变化规律见图5。

表3 触头回路电阻测量数值表

Table 3 Data sheets of contact loop resistance measurement

| 温度/℃ | 编号 | 有润滑电阻值/ $\mu\Omega$ |     | 无润滑电阻值/ $\mu\Omega$ |     |
|------|----|---------------------|-----|---------------------|-----|
|      |    | 操作前                 | 操作后 | 操作前                 | 操作后 |
| 0    | 1  | 16                  | 18  | 15                  | 19  |
|      | 2  | 16                  | 18  | 15                  | 21  |
|      | 3  | 16                  | 19  | 15                  | 20  |
| -20  | 1  | 16                  | 18  | 16                  | 19  |
|      | 2  | 15                  | 17  | 16                  | 20  |
|      | 3  | 16                  | 17  | 16                  | 20  |
| -40  | 1  | 16                  | 17  | 15                  | 19  |
|      | 2  | 16                  | 17  | 15                  | 17  |
|      | 3  | 16                  | 17  | 15                  | 17  |
| -60  | 1  | 16                  | 16  | 15                  | 16  |
|      | 2  | 16                  | 17  | 15                  | 17  |
|      | 3  | 16                  | 17  | 15                  | 17  |

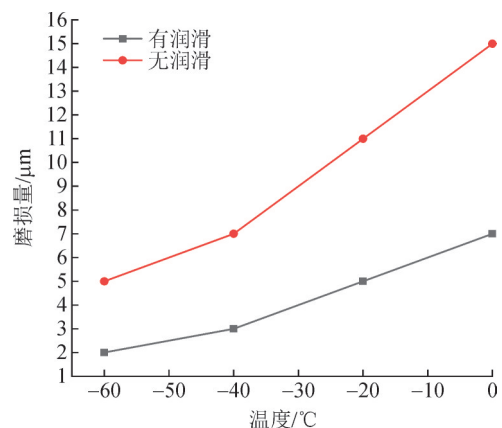


图5 接触电阻变化趋势图

Fig. 5 Change trend chart of contact resistance

由图5分析可知,接触电阻和工作温度呈正相关关系。在无润滑工况下,电阻增长随温度降低而减小,与磨损量变化规律一致。在有润滑工况下,各温度点操作后电阻平均值维持在17~18  $\mu\Omega$ ,波动范围小,且明显低于无润滑工况。分析认为:随着接触副持续磨损,表面形貌粗糙度衰减,微观尺度下形成离散分布的凸起体。实际导电接触仅发生于局部接触峰点,有效接触点数量减少及单点接触面积收缩,根据电接触理论,导致收缩电阻增大。

### 2.2.4 触头结构优化建议

基于上述试验结果,提出触头结构优化建议:

1)必须采用润滑措施:润滑脂可显著降低磨损量、稳定接触电阻,在高寒环境下不可或缺。

2)镀银层厚度设计。考虑低温下磨损量较小,但考虑设备全寿命周期,建议镀银层厚度不小于20  $\mu\text{m}$ ,并预留安全裕度。

3)需在已确定触头结构的基础上,将研究扩展至

高海拔低气压环境,重点探究其绝缘特性演变规律。

### 3 高海拔绝缘性能研究

基于上述确定的触头结构,对 816 kV 直流隔离开关开展绝缘性能仿真。

#### 3.1 理论基础

对于处于空气域中的直流隔离开关来讲,空气域可视为理想绝缘体,而隔离开关可视为电阻率为有限值的非理想绝缘体,电场分布同时取决于两种材料的介电常数和电阻率<sup>[4]</sup>,材料交界面条件为法向全电流连续,即

$$-\nabla \cdot (\gamma \nabla \psi) - \nabla \cdot [\varepsilon \nabla (\partial \varphi / \partial t)] = 0 \quad (7)$$

式(7)中: $\psi$ 为电位; $\gamma$ 为介质电导率; $\varepsilon$ 为介质介电常数<sup>[14]</sup>。

双层介质复合绝缘模型见图6。

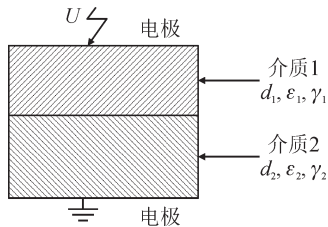


图6 双层介质复合绝缘模型

Fig. 6 Two-layer composite insulation model

图6中:设极板面积为 $S$ ;外施电压为 $U$ ;两层介质承担的电压分别为 $U_1$ 、 $U_2$ ;对应介质内部电场强度分别为 $E_1$ 、 $E_2$ ;介质1相对电容率为 $\varepsilon_1$ ,电导率为 $\gamma_1$ ,厚度为 $d_1$ ;介质2相对电容率为 $\varepsilon_2$ ,电导率为 $\gamma_2$ ,厚度为 $d_2$ 。忽略边缘效应,在任何时刻有

$$U = U_1 + U_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (8)$$

结合式(7)、(8),可得:

$$E_1 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_1} U + \left[ \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \right] U e^{-t/\tau} \quad (9)$$

$$E_2 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_1} U + \left[ \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} - \frac{\gamma_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \right] U e^{-t/\tau} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, $\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}{\gamma_2 d_1 + \gamma_1 d_2}$ ,为整体模型的时间常数。

根据式(9)、(10)可知,当耐受稳定直流电压时,耐受时长趋于无穷大,远大于时间常数,因此可应用恒定电场单元进行电场分布计算。而在冲击电压下,由于绝缘介质的电导率通常很小,时间常数很大,界面极化建立时间较长,在冲击电压的作用时间内无法形成界面极化,可即可认为冲击电压作用时间远小于时间常数,此时电场按容性分布,

可应用静电场单元对各时刻的电场分布进行计算。

#### 3.2 参数化建模

文章采用 APDL 参数化建模方法对 816 kV 直流隔离开关进行模型建立,在建模过程中,分别对产品的基础支架高度、动静侧支柱间距、均压环管径、均压环环径、动侧均压环球径、中间屏蔽环管径与环径进行参数化设定<sup>[15-16]</sup>,并分析各参数对电场强度的影响,得出各参数对产品电场强度的影响规律。在 APDL 命令中定义的上述参数见表4。

表4 参数化建模定义

Table 4 Parametric modeling definition

| 参数              | 数值/mm | 参数              | 数值/mm  |
|-----------------|-------|-----------------|--------|
| 基础支架高度 $L$      | 5 000 | 动静侧支柱间距 $D$     | 9 700  |
| 均压环(实心)管径 $R_1$ | 0     | 绝缘子高度 $H$       | 15 000 |
| 均压环管径 $R_2$     | 250   | 屏蔽环(实心) $Rad_1$ | 0      |
| 均压环环径 $R_3$     | 1 650 | 屏蔽环管径 $Rad_2$   | 150    |
| 均压环球径 $R_4$     | 350   | 屏蔽环环径 $Rad_3$   | 600    |

在对 816 kV 直流隔离开关进行建模时,分别建立有绝缘子及无绝缘子模型,两者仿真结果差别在 5% 范围内,为了定性以上各参数对隔离开关计算电场的影响,同时由于绝缘子距离加压位置较远,且自身为绝缘体,对空间场强影响较小,其表面及邻近空间场强亦较小,因此在物理模型中忽略了绝缘子结构;由于均压环对电场的屏蔽与均匀化作用,均压环之间的底座焊装、静触头等复杂结构在物理模型中采用长方体替代,具体建模过程略去。为兼顾仿真精度与计算效率,直流隔离开关外分别建立尺寸为 20 m×10 m×30 m 和 60 m×50 m×60 m 的两个长方体作为空气域。

#### 3.3 材料属性、网格划分

816 kV 直流隔离开关模型有基础钢支架、导电系统及屏蔽系统,材料相对介电常数及电阻率见表5。

表5 材料参数表

Table 5 Material parameter table

| 材料         | 相对介电常数                   | 电阻率/(Ω·mm)                |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| H 型钢 Q235A | 1.000 00×10 <sup>5</sup> | 0.097 00×10 <sup>-5</sup> |
| 铝合金        | 1.000 00×10 <sup>5</sup> | 0.026 35                  |
| 空气         | 1.000 58                 | 1.000 00×10 <sup>17</sup> |

采用 Smart Size 剖分网格,整个空气域采用 3 级网格划分,而对加压部分,采用细分网格划分。静侧加压时,对静侧均压环分别采用尺寸 25、50、100 mm 的四面体网格,得出不同网格尺寸下的单元数量与最大场强计算结果见表6。表6结果显示,网格尺寸为 50 mm 与网格尺寸为 25 mm 时计算的场强最大值

偏差小于1%,验证了所选网格密度计算的可靠性。

表6 不同网格下计算场强

Table 6 Electric field under different mesh sizes

| 网格尺寸/mm | 网格数       | 电场强度/(kV·mm <sup>-1</sup> ) | 偏差/% |
|---------|-----------|-----------------------------|------|
| 100     | 153 311   | 3.23                        | —    |
| 50      | 391 540   | 3.19                        | 1.30 |
| 25      | 1 057 965 | 3.16                        | 0.94 |

### 3.4 边界条件

分别考虑隔离开关分闸、合闸两种状态,将分闸状态下主开关侧定义为动侧,静触头侧定义为静侧。电场工况表分为合闸加压及分闸状态下的动侧加压、静侧加压。除去加压部件,其余位置施加电压为0。因为隔离开关绝缘试验主要有直流耐受电压、雷电冲击电压及操作冲击电压试验,在实际开展绝缘试验时,操作冲击电压试验对产品绝缘性能的考核较严苛,因此在施加电压时以操作冲击电压值作为输入进行计算,详细电压施加工况见表7。

表7 电压工况表

Table 7 Voltage operating conditions table

| 工况 |       | 电压值/kV |       |     |     |
|----|-------|--------|-------|-----|-----|
|    |       | 动侧     | 静侧    | 底座  | 空气层 |
| 分闸 | 动侧加压  | 2 262  | 0     |     |     |
|    | 静侧加压  | 0      | 2 262 | 零电位 | 零电位 |
| 合闸 | 主闸刀加压 | 2 262  | 2 262 |     |     |

### 3.5 计算结果

按电场工况表的电压值分别对隔离开关分闸、合闸进行电场计算,得到典型工况电压施加图及电场强度云图。

#### 3.5.1 分闸工况下动侧加压

动侧加压2 262 kV,静侧及空气域边缘接地,施加电压云图见图7。计算求得动侧电场强度分布见图8。

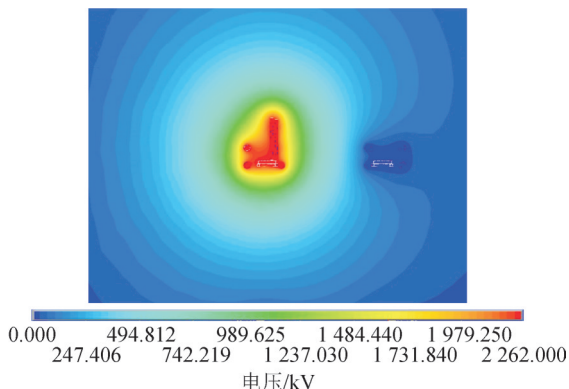


图7 动侧加压云图

Fig. 7 Pressure contour plot of the moving side

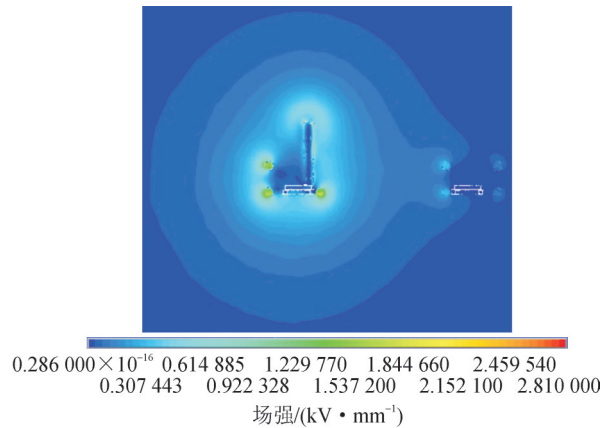


图8 电场强度云图

Fig. 8 Electric field intensity contour plot

#### 3.5.2 分闸工况下静侧加压

静侧加压2 262 kV,动侧及空气域边缘接地,施加电压云图见图9。计算求得静侧电场强度分布图见图10。

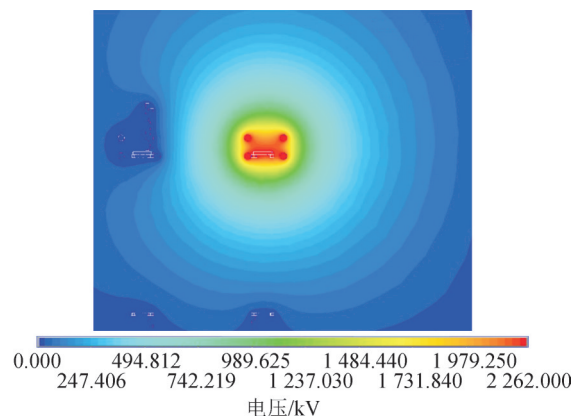


图9 静侧加压云图

Fig. 9 Pressure contour plot of the stationary side

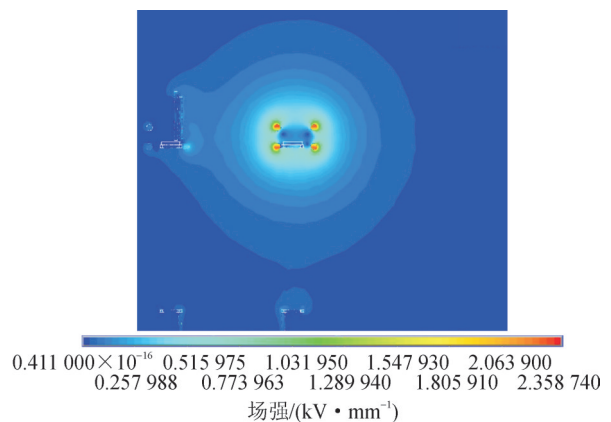


图10 电场强度云图

Fig. 10 Electric field intensity contour plot

#### 3.5.3 合闸工况下主开关加压

合闸时,主开关加压2 262 kV,基础及空气域接

地,施加电压见图11。计算求得主开关电场强度分布见图12。

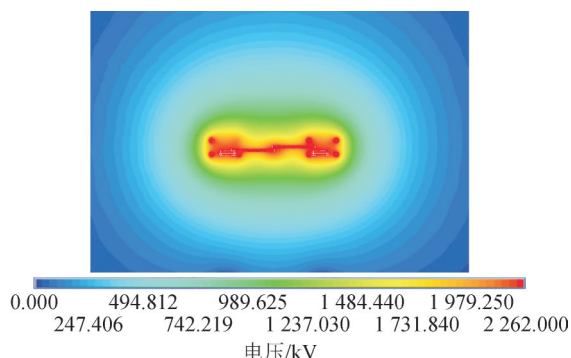


图11 施加载荷云图

Fig. 11 Applied voltage contour plot

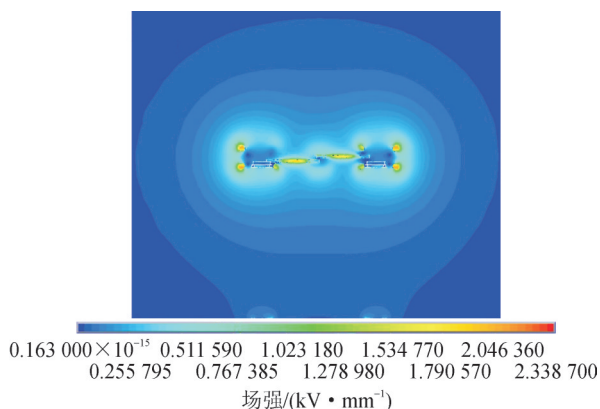


图12 电场强度云图

Fig. 12 Electric field intensity contour plot

### 3.6 结果分析

本节主要讨论了816 kV直流隔离开关在分闸状态下,隔离开关静侧施加2 262 kV电压,分别改变钢支架高度、均压环管径、均压环环径及双柱间空气间隙距离及对地距离,隔离开关电场强度的变化规律,计算结果及分析如下。

#### 3.6.1 钢支架高度对隔离开关电场强度的影响

均压环管径250 mm,均压环环径1 700 mm,绝缘子高度15 m,静侧施加2 262 kV操作冲击电压,电场强度随基础支架高度的变化规律见图13,产品钢支架从1 m到10 m的过程中,产品电场强度最大值在2.4 kV/mm上下波动,且无明显的增长或下降趋势,说明在此范围内基础钢支架的高低对产品电场强度影响较小。分析认为,底座钢支架在电场中处于零电位,它们的存在会使电场线大多终止于附件的接地体,实际感受到的电场已经很弱,因此,当绝缘子高度大于14 m时,主开关位置施加电压,已经不能“辐射”到钢支架处,因此当绝缘子高度高于

一定范围,基础支架高度的变化对电场影响较小。

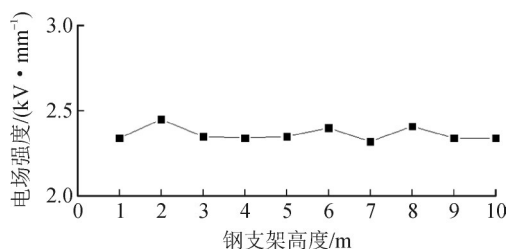


图13 电场强度随钢支架高度的变化规律

Fig. 13 Variation of electric field intensity with the height of steel support

#### 3.6.2 均压环管径对隔离开关计算电场的影响

基础支架高5 m,均压环环径1 700 mm,绝缘子高度15 m,双柱间距9.7 m,电场强度随均压环管径的变化规律见图14。均压环管径从140~340 mm增大的过程中,可以看出产品电场强度出现较明显的下降趋势,当均压环管径从150 mm变化到230 mm,电场强度从3.9 kV/mm下降到2.8 kV/mm,下降值为1.1 kV/mm,下降幅度为28%。均压环管径从240 mm增加到310 mm,电场强度仅从2.8 kV/mm下降到2.3 kV/mm,下降值为0.5 kV/mm,下降幅度为17.8%,电场强度下降趋势随着均压环管径的增大减缓,电场强度对均压环管径的增大似乎也呈现出类似“饱和”的特性。分析认为,在稍不均匀电场中,增加电极曲率半径,改进电极形状可以明显改善电场分布,综合考虑屏蔽效果与经济性,暂均压环管径为300 mm。

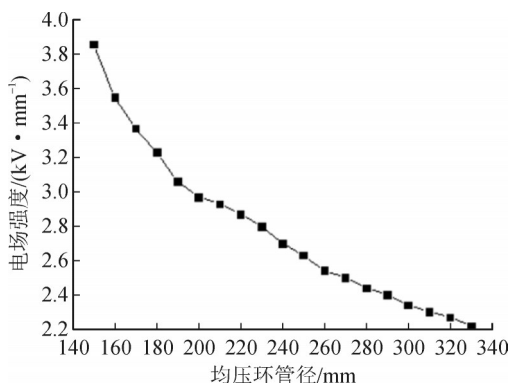


图14 电场强度随均压环管径的变化规律

Fig. 14 Variation of electric field intensity with the pipe diameter of the grading ring

#### 3.6.3 均压环环径对隔离开关计算电场的影响

基础支架高5 m,双柱间距9.7 m,绝缘子高度15 m,均压环管径250 mm,电场强度随均压环环径的变化规律见图15。均压环环径从1 640 mm增大到1 820 mm,产品电场强度基本都在2.6 kV/mm上下波动,略有下降趋势,说明在此条件下,电场强度对均压环环径的变化不敏感,分析认为:改变均压

环环径不能显著改变电极形状,因此对电场的改善也有限,因此在设计均压环环径时,以使其完全包络零部件并留有小间隙为准。

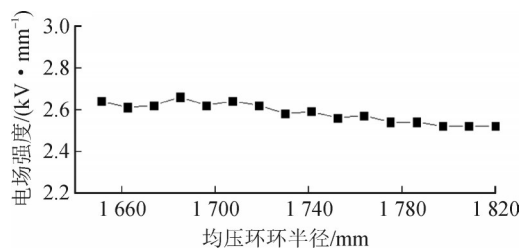


图15 电场强度随均压环环径的变化规律

Fig. 15 Variation of electric field intensity with the ring diameter of the grading ring

### 3.6.4 空气间隙对隔离开关计算电场的影响

基础支架高5 m,均压环管径300 mm,均压环环径1 700 mm,电场强度随空气间隙的变化规律见图16。从图16中可以看出,双柱间距从4 m到11 m的变化中,隔离开关最大场强随着间隙距离的增大有明显减少的趋势,当隔离开关断口间隙大于8 m后,电场强度稳定在2.34 kV/mm。分析认为:间隙距离加大到一定程度,基础结构已处于电场的远场区,电场强度主要受施加电压及电极形状影响,不再随间隙变化<sup>[17-19]</sup>。

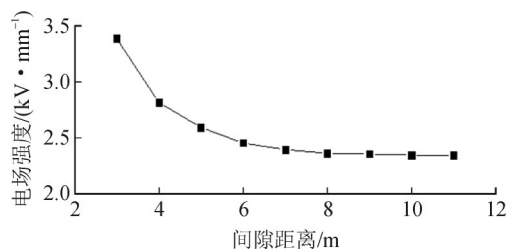


图16 电场强度随空气间隙变化规律

Fig. 16 Variation of electric field intensity with air gap

### 3.6.5 绝缘子高度对隔离开关电场强度的影响

在合闸状态下,均压环管径300 mm,基础支架5 m,双柱间距9.7 m,电场强度随绝缘子高度变化规律见图17。从图17中可以看出,绝缘子高度从6 m到10 m的变化中,隔离开关最大场强随着绝缘子高度的增大而减小,而当隔离开关断口间隙大于14 m后,电场影响区域几乎不能“辐射”到底座钢支架处,电场强度最大值趋于稳定,并且稳定在2.34 kV/mm。分析认为:间隙距离加大到一定程度,隔离开关电场强度几乎不再受间隙距离影响,这与关述基础支架的高度对电场影响不大机理类似<sup>[20-23]</sup>。

### 3.6.6 结果分析

综合以上分析,确定816 kV高压直流隔离开关关键设计参数:均压环管(半)径300 mm,均压环环(半)径1 700 mm,隔离开关双柱间距9.7 m,均压环环径1 700 mm,断口间间隙距离8 m,产品合闸对地

绝缘距离15 m。

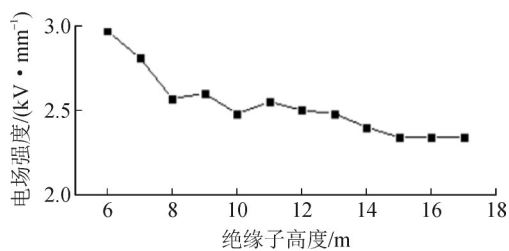


图17 电场强度随绝缘子高度变化规律

Fig. 17 Variation of electric field intensity with insulator height

## 4 样机研制与型式试验

依据以上参数设计的4 500 m海拔816 kV直流隔离开关样机在西安高压电器研究院完成绝缘试验验证,试验姿态见图18,试验结果见表8。



图18 816 kV 隔离开关试验姿态

Fig. 18 Test configuration of the 816 kV disconnector

表8 试验结果

Table 8 Test results

| 试验项目         | 试验参数/kV | 试验结果  |
|--------------|---------|-------|
| 直流耐受电压(干试)   | 断口      | 1 801 |
|              | 对地      | 1 801 |
| 直流耐受电压(湿试)   | 断口      | 1 801 |
|              | 对地      | 1 801 |
| 雷电冲击电压试验     | 断口      | 2 996 |
|              | 对地      | 2 995 |
| 操作冲击电压试验(干试) | 断口      | 2 262 |
|              | 对地      | 2 262 |
|              | 断口      | 2 262 |
|              | 对地      | 2 262 |
| 操作冲击电压试验(湿试) | 断口      | 2 262 |
|              | 对地      | 2 262 |
| 无线电干扰电压试验    | 断口      | 1 126 |
|              | 对地      | 1 126 |

通过

## 5 结论

1)通过-60~0℃低温机械操作试验,揭示了温度与润滑条件对触头镀银层磨损及接触电阻的影响规律。建议触头设计采用专用低温润滑脂,镀银层厚度不小于20 μm。触头磨损受温度、载荷、润滑

条件等多因素耦合影响,本研究为后续建立多因素耦合作用下的磨损预测模型提供了数据基础。

2)基于有限元分析的APDL方法,对影响816 kV直流隔离开关电场强度的钢支架高度、绝缘子高度、断口距离、均压环管径、均压环环径进行计算,得到影响816 kV直流隔离开关电场强度的影响规律,结果表明:均压环管径对场强影响显著;断口间隙与绝缘子高度大于临界值后,场强趋于稳定;均压环环径与支架高度影响较小。

3)根据关键设计参数,制造816 kV直流隔离开关样机,产品通过了4 500 m海拔绝缘试验验证,验证了产品的绝缘性能,满足了工程需求。

## 参考文献:

- [1] 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. Switching impulse flashover characteristics of air gap of electric power fittings in value hall at the altitude of 2 400 m[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11):9-15.
- [2] 随祥旭,卢鹏,刘旭,等. 4 000 m高海拔1 100 kV GIS复合套管研制[J]. 高压电器, 2025, 61(6):236-244.  
Sui Xiangxu, Lu Peng, Liu Xu, et al. Development of 1 100 kV GIS composite bushing at altitude of 4 000 m[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(6):236-244.
- [3] 方雅琪,王力农,李瑞,等. 高海拔带电作业间隙操作冲击放电特性及放电电压校正[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12):2681-2688.  
Fang Yaqi, Wang Linong, Li Rui, et al. Switching impulse flashover characteristics of live working air gaps in high altitude areas and discharge voltage correction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12):2681-2688.
- [4] 田冀焕,沙彦超,周远翔,等. 800 kV等级高压隔离开关的交、直流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5):1216-1223.  
Tian Jihuan, Sha Yanchao, Zhou Yuanxiang, et al. Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5):1216-1223.
- [5] 王巧红,王占杰,孙玉洲,等. 基于Ansys的1 120 kV直流隔离开关的电场仿真[J]. 高压电器, 2017, 53(6):36-41.  
Wang Qiaohong, Wang Zhanjie, Sun Yuzhou, et al. Electric field simulation of the 1 120 kV DC disconnecter based on Ansys[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6):36-41.
- [6] 夏喻,李卫国,陈艳. 高空下棒—板间隙直流放电特性及电压校正[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9):2115-2120.  
Xia Yu, Li Weiguo, Chen Yan. DC discharge performance and voltage correction of air gaps under high altitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9):2115-2120.
- [7] 魏晓斌,邢毅,樊艳,等. 超高海拔特高压直流支柱绝缘子均压环结构研究[J]. 电工技术, 2025(23):277-280.  
Wei Xiaobin, Xing Yi, Fan Yan, et al. Research on the structure of voltage equalizing rings for ultra-high altitude UHV DC pillar insulators[J]. Electric Engineering, 2025(23):277-280.
- [8] 李宏楼,徐刚,姚灿江,等. 高低温条件下隔离开关触头耐磨特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7):46-52.  
Li Honglou, Xu Gang, Yao Canjiang, et al. Study on wear resistance characteristics of disconnecter contacts under high and low temperature conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7):46-52.
- [9] 周少珍,吴明孝,杨威,等. 不同厚度铜基银镀层的耐腐蚀和摩擦磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(15):9-14.  
Zhou Shaozhen, Wu Mingxiao, Yang Wei, et al. Corrosion and friction wear resistance of copper-based silver coatings of different thicknesses[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(15):9-14.
- [10] 余亚东,孙浩,薛亚许. 柱上隔离开关不同镀银层参数的导电及磨损性能实验研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(5):58-64.  
Yu Yadong, Sun Hao, Xue Yaxu. Experimental study on conductivity and wear properties of different silver coating parameters of column disconnecting switch[J]. Plating & Finishing, 2024, 46(5):58-64.
- [11] GB/T 11022—2020 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S].  
GB/T 11022—2020 Common specifications for high-voltage alternating-current switchgear and controlgear standards[S].
- [12] GB 311.1—2012 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则[S].  
GB 311.1—2012 Insulation coordination—Part 1: definitions, principles and rules[S].
- [13] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.  
Yan Zhang, Zhu Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [14] 李金迪. 特高压直流隔离开关端部金具电气特性优化研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.  
Li Jindi. The study on optimization of electrical characteristics of the end fitting with UHVDC disconnecter[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [15] 杨亚奇,李卫国,夏喻,等. 低气压下长间隙交直流放电特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5):1143-1150.  
Yang Yaqi, Li Weiguo, Xia Yu, et al. Research of AC and DC discharge characteristics of long gap under low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5):1143-1150.
- [16] 孙健,张子敬,赵赢峰,等. 特高压换流阀层间间隙放电试验及海拔修正[J]. 电工电气, 2025(10):55-60.  
Sun Jian, Zhang Zijing, Zhao Yingfeng, et al. Interlayer gap discharge testing and altitude correction for ultra-high voltage converter valves[J]. Electrotechnics Electric, 2025(10):55-60.
- [17] 丁玉剑,廖蔚明,孙昭英,等.  $\pm 1\,000$  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 studies on impulse flashover characteristics of tower head air gaps

(下转第58页)

- (10):13-17.
- [21] 舒胜文,史绍梅,黄勇,等.基于SVM-PSO混合算法的12 kV 开关柜触头盒双屏蔽结构三维电场优化研究[J]. 高压电器, 2023,59(10):46-53.
- Shu Shengwen, Shi Shaomei, Huang Yong, et al. Research on 3D electric field optimization of double shielding structure of contact box in 12 kV switchgear cabinet based on SVM - PSO hybrid algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(10):46-53.
- [22] Yao Penghui, Zheng Haiming, Yao X S, et al. A method of monitoring partial discharge in switchgear based on ozone concentration[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1):654-660.
- [23] Wang Lijun, Li Xiaolin, Lin Jing, et al. Studies of modeling and simulation method of temperature rise in medium-voltage switchgear and its optimum design[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(3):439-446.
- [24] 李汉伟. 基于Ansys的中压开关柜温度场建模及热分析[D]. 上海:上海工程技术大学, 2020.
- Li Hanwei. Temperature field modeling and thermal analysis of medium voltage switchgear based on Ansys[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [25] 徐敏捷. 中压开关柜内组件温度场分析及监测系统开发[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- Xu Minjie. Temperature field analysis of components in medium voltage switchgear and development of monitoring system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [26] 李璨. KYN系列高压开关柜真空断路器运行状态诊断技术研究与应用[D]. 淄博:山东理工大学, 2023.
- Li Can. Research and application of operation state diagnosis technology for vacuum circuit breaker in KYN series high voltage switchgear[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [27] Fjeld E, Rondeel W G J, Attar E, et al. Estimate the temperature rise of medium voltage metal enclosed switchgear by simplified heat transfer calculations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2):853-860.
- [28] GB/T 24622—2022 绝缘子表面湿润性测量导则[S].
- GB/T 24622—2022 Guide for the measurement of wettability of insulator surfaces[S].
- 桂媛(1988—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电网设备状态评价与诊断分析(通信作者)(E-mail:331892271@qq.com)。

(上接第49页)

- of  $\pm 1\ 000$  kV DC transmission lines and altitude correction methods [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34):156-162.
- [18] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- DL/T 620—1997 Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S].
- [19] 蒋兴良,王军,苑吉河,等.模拟与自然环境0.5~1.5 m空气间隙正极性操作冲击放电电压校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28):13-17.
- Jiang Xingliang, Wang Jun, Yuan Jihe, et al. Correction method of positive switching impulse discharge voltage for 0.5 ~ 1.5 m air gap under artificial and natural conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28):13-17.
- [20] 梅忠恕. 空气间隙击穿电压的等值相对空气密度校正法[J]. 高电压技术, 1987, 13(1):62-67.
- Mei Zhongshu. Equivalent relative air density correction method for air gap breakdown voltage[J]. High Voltage Engineering, 1987, 13(1):62-67.
- [21] 马乃祥. 长间隙放电[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- Ma Naixiang. Long gap discharge[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [22] 曹晶,万启发,张勤,等. 高海拔换流站相间操作冲击放电特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12):2896-2901.
- Cao Jing, Wan Qifa, Zhang Qin, et al. Analysis on phase-to-phase switching impulse discharge characteristic of high altitude converter station[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12):2896-2901.
- [23] 李三,曹晶,陈勇,等. 高海拔地区750 kV开关站空气间隙选择研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6):206-208.
- Li San, Cao Jing, Chen Yong, et al. Research on air gaps selection of 750 kV switching station in high altitude area[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6):206-208.
- 王巧红(1983—),女,正高级工程师,研究方向为高压电器产品研发设计(E-mail:286364100@qq.com)。
- 姚灿江(1990—),男,工程师,研究方向为高压电器产品研发设计(通信作者)(E-mail:962860830@qq.com)。