

## 126 kV 环保型 GIS 隔离接地开关的绝缘性能分析

顾乐<sup>1</sup>, 汤凯航<sup>2</sup>, 叶建斌<sup>1</sup>, 苏海博<sup>1</sup>, 黎旭<sup>1</sup>, 林艺<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620;

2. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518)

**摘要:** 为了减少开关设备中温室气体 SF<sub>6</sub> 的使用, 本文设计了一种采用“真空开断+洁净空气”绝缘方案的 126 kV 环保型 GIS 并重点研究其隔离接地开关的绝缘性能。首先基于 SF<sub>6</sub> 母线绝缘验证试验研究了不同工作气压条件下洁净空气绝缘介质的击穿特性, 依据该特性确定了洁净空气绝缘介质的许用设计场强值; 再利用许用场强值及设备尺寸确定了环保型 GIS 的工作压力(0.65 MPa); 最后以 0.65 MPa 下的洁净空气许用设计场强要求为约束条件, 构建仿真模型研究隔离接地组合开关的结构设计对其内部电场分布特性的影响。结果表明: 隔离触头边缘倒角位置和盆式绝缘子空气、导体、环氧材料三相交界处均为绝缘薄弱环节; 结合 GIS 样机的验证试验, 本文设计的环保型 GIS 隔离接地开关的绝缘性能符合设计要求, 洁净空气绝缘介质的许用场强确定方法具有合理性和裕度。

**关键词:** 空气绝缘 GIS; 洁净空气; 隔离接地开关; 电场分布

## Insulation performance analysis of isolated grounding switch for 126 kV environmental friendly GIS

GU Le<sup>1</sup>, TANG Kaihang<sup>2</sup>, YE Jianbin<sup>1</sup>, SU Haibo<sup>1</sup>, LI Xu<sup>1</sup>, LIN Yi<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Qingyuan 511518, China)

**Abstract:** In order to reduce the use of greenhouse gas SF<sub>6</sub> in switchgear, we designed a 126 kV environmental friendly GIS by an insulating scheme using "vacuum disconnect + clean air", and focused on researching the insulation performance of its isolated grounding switch. Firstly, the breakdown characteristics of clean air insulation medium under different working pressure conditions were researched based on verification test of SF<sub>6</sub> busbar insulation, and the allowable design field strength value of clean air insulation medium was determined based on this characteristic. Then, the working pressure of environmentally friendly GIS (0.65 MPa) was determined by utilizing the allowable field strength value and equipment size. Finally, taking the allowable design field strength requirement of clean air at 0.65 MPa as the constraint condition, a simulation model was constructed to research the influence of the structural design of the isolated grounding switch on its internal electric field distribution characteristics. The results show that the chamfer position at the edge of the isolated contact and the three-phase junction of the air, conductor, and epoxy material of the basin insulator are the weak links in insulation. Combined with the verification test of the GIS prototype, the insulation performance of the environmental friendly GIS isolated grounding switch designed in this paper meets the design requirements, and the method for determining the allowable field strength of the clean air insulation medium is reasonable and sufficient.

**Key words:** air insulated GIS; clean air; isolated grounding switch; electric field distribution

### 0 引言

截至 2023 年 9 月, 已有超 150 个国家作出了“碳中和”承诺, 覆盖了全球 80% 以上的二氧化碳排放量、GDP 和人口。中国承诺在 2030 年前达到碳排放峰值, 2060 年底前实现“碳中和”。2022 年中国碳排

放量约为 121 亿吨, 电力行业碳排放量占全国碳排放总量的 40% 以上, 是我国最大的碳排放部门。因此, 为推动我国“双碳”目标实现, 发展绿色低碳电力势在必行<sup>[1-3]</sup>。

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)是一种强温室效应气体, 其全球变暖潜能指数是二氧化碳的 23 900 倍, 是《京都议定书》中明确限制的温室气体。但 SF<sub>6</sub> 也是一种性能优异的灭弧和绝缘介质, 被广泛应用于电力行

业,主要作为高压开关设备的灭弧介质或作为气体绝缘组合电器设备(gas insulated switchgear, GIS)的绝缘介质。据估算,中国电力工业对 SF<sub>6</sub> 的需求量超过 10 000 吨<sup>[4-7]</sup>。

随着我国“双碳”战略目标的稳步实现,电力工业的快速发展和温室气体减排之间的矛盾日益加剧。构建深度低碳、绿色的电力系统是落实“双碳”国家战略,实现电力系统高质量发展的大势所趋,这对以 SF<sub>6</sub> 为代表的温室气体的使用和替代技术提出了新的要求<sup>[8-11]</sup>。探索开关设备灭弧和绝缘介质的替代方案是降低 SF<sub>6</sub> 使用量的重要途径。例如,日本明电舍公司曾经在 145 kV 和 204 kV 的真空开断设备中使用真空开断代替 SF<sub>6</sub> 气体,从而降低 SF<sub>6</sub> 的用量。此外,降低 GIS 中 SF<sub>6</sub> 绝缘气体的用量是电力工业实现去 SF<sub>6</sub> 的另一个重要落脚点<sup>[12-16]</sup>。

近年来,针对电力系统去 SF<sub>6</sub> 技术开展的大量探索和研究逐步形成了两种技术方案:①使用 SF<sub>6</sub> 替代气体(CF<sub>3</sub>I、C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N、C<sub>3</sub>F<sub>10</sub>O、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、CF<sub>4</sub>、HFO 等)作为开断和绝缘介质。这些新型环保气体展现出良好的介电性能和环保潜力,但也存在工作性能对电场不均匀程度较敏感、分解过程产物复杂且会对本身绝缘能力造成影响等问题。此外,大量研究工作还寄希望于向纯 SF<sub>6</sub> 气体中加入稀释气体(氮气、空气、氦气等)以期在略微降低绝缘性能的前提下尽可能减少 SF<sub>6</sub> 的用量。但是广泛实验结果表明,稀释后混合气体的绝缘强度与 SF<sub>6</sub> 的组分含量成正比,保证混合气体的绝缘强度和降低 SF<sub>6</sub> 使用量之间存在着矛盾。②研制真空开断型环保 GIS,即采用真空开断技术实现电流开断,采用环保绝缘气体(如洁净空气)实现设备内部绝缘与隔离开关等的小电流开断功能,从而实现 GIS 的 SF<sub>6</sub> 零使用<sup>[17-19]</sup>。

真空断路器是中压配电系统中的核心开关设备,具有介质恢复快、开断能力强、可靠性高、维护简单等优点,其灭弧性能超过目前其他的 SF<sub>6</sub> 替代环保气体。另外,通过对比 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N、C<sub>3</sub>H<sub>10</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、洁净空气等 SF<sub>6</sub> 替代气体发现,洁净空气除绝缘性能较差外,在环境友好、成本低廉、长期稳定性和安全可靠等方面均优于其他气体介质。近年来,真空开断技术快速向高电压应用场合发展,而洁净空气绝缘性能较差的问题也可以通过增加工作压力加以弥补。“真空开断+洁净空气绝缘”的技术方案

兼具真空开断优异的灭弧性能,以及洁净空气环保、稳定的优点,能够在较好地满足电力设备中灭弧和绝缘的要求下做到零碳排放,是一种前景广阔的 GIS 技术路线。2019 年,西门子首台采用单断口“真空开断+清洁空气绝缘”的 145 kV/40 kA Blue GIS 成功安装调试,并于 2020 年一季度投入商业运行。世界主流输配电装备制造制造商 ABB、通用电气、明电舍等均有相近技术方案及产品面市。2022 年江苏清舒变电站投运了国内第一套 Blue GIS。国内高水平输变电装备制造制造商平高电气、思源电气,以及相关高等院校如西安交通大学、沈阳工业大学等针对这一技术方案开展了大量的探索并取得了长足的进展<sup>[20-23]</sup>。

当前,“真空开断+洁净空气绝缘”型环保 GIS 的技术方案仍有许多问题需要解决:①GIS 中环保绝缘气体的绝缘性能和隔离开关的小电流开断问题仍是关键技术瓶颈。②洁净空气绝缘介质的绝缘性能和 SF<sub>6</sub> 存在较大差距,环保型 GIS 中的洁净空气绝缘介质通常需要很高的工作压力或较大的间隙距离,这对罐体外壳强度、密封性能提出更为严苛的要求。同时,增加间隙距离可能会导致设备整体尺寸增大,因此,研究真空开断型环保 GIS 内部核心设备的绝缘配合是非常必要的。

本文设计一款采用“真空断路器灭弧+洁净空气绝缘”技术方案的 126 kV 真空开断型环境友好 GIS。首先,基于 SF<sub>6</sub> 母线绝缘验证试验,研究不同工作气压条件下洁净空气绝缘介质的击穿特性,依据试验结果确定洁净空气绝缘介质的设计许用场强值,综合考虑许用场强值及设备尺寸来确定环保 GIS 的工作压力。然后以确定工作压力下的洁净空气许用设计场强要求为约束条件,构建数值仿真计算模型研究隔离接地组合开关(DES)的结构设计对其内部电场分布特性的影响,经过对 DES 内部的电场集中位置和绝缘薄弱环节的分析,表明本文所设计的真空开断型环保 GIS 的绝缘性能符合设计要求。最后,制作样机开展绝缘验证,以此来确定洁净空气许用设计场强的合理性和裕度。希望研究结果可以为特高压隔离接地组合开关、盆式绝缘子结构和绝缘性能的优化设计提供理论支持。

## 1 工作压力的确定

洁净空气早在 20 世纪 70 年代就已经被用作

GIS设备的绝缘介质,其在绝缘、隔离和小电流开断方面的有效性和可靠性是毋庸置疑的。但是,洁净空气的绝缘能力远低于 $\text{SF}_6$ 气体,欲使其达到 $\text{SF}_6$ 相当的绝缘水平,将必然导致GIS绝缘介质的工作压力或设备尺寸的大幅增加。洁净空气相较于 $\text{SF}_6$ 绝缘水平的量化差异对于使用洁净空气作为绝缘介质的环保型GIS工作压力的确定至关重要。然而,针对这一问题的大量研究成果仍显示出较大分散性,这可能是实验条件的差异所致。

“真空开断+洁净空气绝缘”型环保GIS的工作压力主要由介质的设计许用场强指标、产品的布置尺寸需求和行业的密封技术水平确定。因此,本文首先通过母线绝缘验证试验来确定绝缘气体的击穿场强,并推算设计许用场强值。

为确保工作可靠性及指标参数裕量,126 kV 洁净空气绝缘环保型GIS的绝缘性能对标上海思源高压开关有限公司额定电压为145 kV、绝缘气体为 $\text{SF}_6$ 的GIS产品。使用该GIS的隔离开关和母线搭建试验样机,其结构如图1所示。试验过程分为三步:①采用纯 $\text{SF}_6$ 气体,额定压力为0.35 MPa,进行

126 kV 等级正常绝缘试验以验证样机的可靠性。

②采用纯 $\text{SF}_6$ 气体,表压为0.35 MPa,进行3次578 kV 负极性雷电冲击试验;通过后电压每增加5%再次试验,直到样机放电;放电后降低5%电压,施加3次正、负极性雷电冲击和1 min 相对应百分比的工频电压,若不放电则通过,若放电则需拆解后重新按照此档电压进行3次正、负雷电冲击试验,直至通过。③采用洁净空气,表压为0.8 MPa,进行3次110 kV 负极性雷电冲击试验;通过后每增加5%电压再次试验,直至放电;之后降低5%电压进行3次正、负极性雷电冲击和1 min 相对应百分比的工频电压,若不放电则通过,若放电则需拆解后重新按照此档电压进行3次正、负极性雷电冲击试验,直至通过。随后在表压为0.7、0.6、0.5、0.4、0.35 MPa 下分别再次重复以上试验过程。每个气压下击穿电压的试验次数为正、负各6次。以50%击穿电压表征洁净空气的击穿电压。图2所示为洁净空气在负极性雷电冲击下的击穿电压随工作压力的变化趋势。从图2可以看出,击穿电压随工作气压升高而显著增加,但是当气压超过0.6 MPa时这一规律出现饱和趋势。

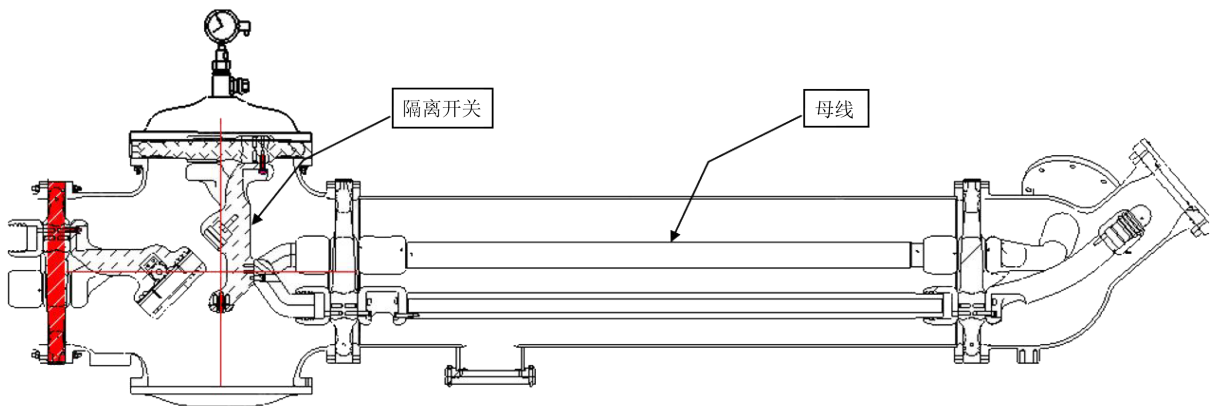


图1 试验样机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental prototype structure

根据国家电网技术符合性评估实施细则,并参考高压 $\text{SF}_6$ 电器中电场设计原则<sup>[12]</sup>,基于试验数据进行拟合得到GIS中高压侧导体在负极性雷电冲击电压下的 $E_{50\%}$ 与压力 $p$ 的关系,如式(1)所示。

$$E_{50\%} = 13 \cdot p + 3.1 \quad (1)$$

式(1)中: $p$ 为绝对压力,MPa; $E_{50\%}$ 为50%击穿场强,kV/mm。

根据 $E_{50\%}$ 可估算以试验为基础归纳得到的考虑裕量的耐受场强 $E_B$ ,计算式如式(2)所示。

$$E_B = E_{50\%} \cdot (1 - 3\sigma) \quad (2)$$

式(2)中, $\sigma$ 为误差系数,取0.05。

考虑产品制造的分散性和运行中的不利因素,许用场强 $E_A$ 的取值在 $E_B$ 基础上需再留有裕度 $k_1$ ,此处根据运行经验取为0.85,如式(3)所示。

$$E_A = 0.85 \times E_B \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得到GIS中洁净空气许用场强与绝缘介质压力的关系,如表1所示。

环保型GIS中的洁净空气绝缘介质通常需要较高的工作压力或较大的间隙距离,增加间隙距离可

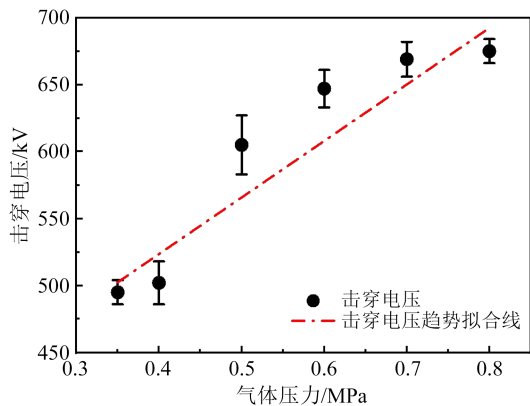


图2 洁净空气击穿电压随工作压力的变化趋势

Fig.2 The variation trend of breakdown voltage of clean air with working pressure

表1 许用场强与工作压力的关系

Table 1 Relationship between allowable field strength and operating pressure

工作压力(表压)/MPa	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
设计许用场强/(kV/mm)	6.4	6.9	7.4	7.8	8.3	8.8
工作压力(表压)/MPa	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
设计许用场强/(kV/mm)	9.2	9.7	10.2	10.6	11.1	11.6

能会导致设备整体尺寸增大,这对罐体外壳强度、密封性能提出更为严苛的要求。参考现有 SF<sub>6</sub> GIS 产品的结构尺寸以及国际先进环保型 GIS 结构型式,本文所设计的环保型 GIS 尺寸见表 2<sup>[11,10]</sup>。

表2 126 kV 真空开断型环保 GIS 的总体尺寸

Table 2 Overall dimensions of 126 kV environmentally friendly GIS with vacuum breaking

尺寸/mm	思源 SF <sub>6</sub> GIS	西门子 Blue GIS	本文环保型 GIS
整体-长	6 000	5 500	7 000
整体-高	2 800	3 200	3 200
整体-宽	800	1 000	1 000
GIS 直径	580	710	710
电气间隙	≥40	≥75	≥75

综合考虑洁净空气中的设计许用场强以及 GIS 结构尺寸,依据 GB 7674—2020《额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》的要求,126 kV 洁净空气绝缘环保 GIS 的工作压力选定 0.65 MPa(表压),其压力配合设计如表 3 所示。

## 2 隔离接地开关(DES)的电场仿真

隔离开关是 GIS 设备最重要的部件之一。本文所设计的 126 kV 空气绝缘环保型 GIS 的真空断路器由成都旭光电子股份有限公司提供,并已通过绝缘性能测试,其技术细节本文不再赘述。

表3 126 kV 真空开断型环保 GIS 的压力匹配设计

Table 3 Pressure matching design of 126 kV environmentally friendly GIS with vacuum breaking

压力指标	压力值/MPa	涵义
功能压力	0.65	最低工作压力
额定工作压力	0.70	在功能压力的基础上计及动作引起的压力损失裕度
报警压力	0.75	在额定工作压力的基础上考虑泄漏引起的压力损失裕度
设计压力	0.95	在报警压力的基础上考虑温升引起的压力上升裕度

隔离开关在关合电流时容易出现反复的电弧重燃并产生快速瞬态过电压(VFTO),这对 GIS 设备、外部连接设备以及二次设备造成重大威胁。特别是在高电压等级 GIS 中,隔离开关的绝缘性能是装备的核心性能和关键技术瓶颈。

### 2.1 DES 基本结构

126 kV 空气绝缘环保 GIS 使用三工位隔离接地组合开关,结构如图 3 所示,其将隔离开关和接地开关整合布置在一个金属壳体内,共用一个动触头,在减少设备机械部件的同时可通过机械连锁的方式实现隔离开关和接地开关的联动操作。紧凑简洁的空间布置减少了 DES 的误操作概率,但增加了实际操作中的工况条件,使得 DES 内部电场分布的复杂程度大幅提升,发生闪络与击穿的概率显著增加,极大地威胁电力系统的安全稳定运行。因此,有必要开展 DES 内部电场分布特性的研究、基于电场分布的数值仿真计算,分析开关室内场强集中位置并判断潜在的绝缘薄弱环节,据此来开展 DES 绝缘结构的优化设计。

### 2.2 DES 仿真计算模型与方法

#### 2.2.1 仿真建模

通过仿真计算研究空气绝缘型环保 GIS 中隔离接地组合开关的电场分布特性并分析其绝缘性能。为保证数值分析结果的全面性和可靠性,需要根据开关室的实际工况构建三维仿真计算模型,并综合考虑隔离开关、接地开关、盆式绝缘子以及外壳等部件的相对位置及结构对电场分布的影响。

基于有限元仿真计算软件 ANSYS 开展 DES 内部静电场分布特性分析。根据电磁场基本理论可知,DES 中的电场求解域内应满足式(4)<sup>[11-12,17]</sup>。

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (4)$$

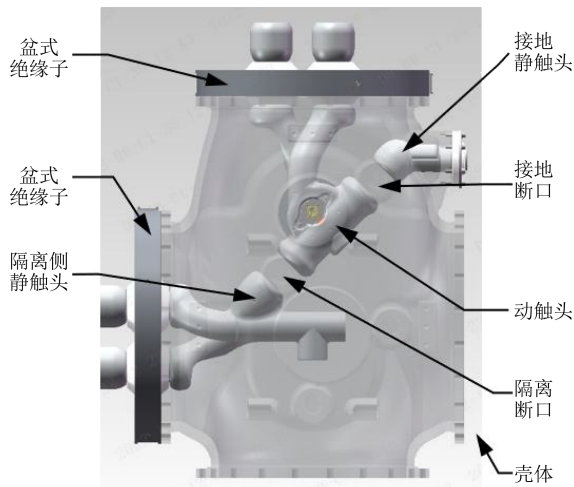


图3 隔离接地组合开关结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of isolated grounding combination switch structure

式(4)中: $\varphi$ 为电位函数; $x,y,z$ 表示空间直角坐标。

对于内部导体表面应满足边界条件,见式(5)。

$$\varphi_{\text{导体}} = U \quad (5)$$

式(5)中, $U$ 为电压载荷,在洁净空气与环氧树脂等绝缘介质的分界面电位应满足式(6)~(7)。

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $\varphi_1$ 为空气中电位函数; $\varphi_2$ 为绝缘介质中电位函数; $\varepsilon_1$ 为空气的介电常数,取值1.0; $\varepsilon_2$ 为绝缘介质的介电常数,取值5.3; $n$ 为交界面法向量。此外,在隔离开关与母线及断路器侧连接的界面位置电位应满足式(8)。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

本文分别在DES分/合闸的情况下施加电压来计算开关室内部电场分布情况。合闸时计算对地和相间的电场分布,分闸时则主要关注触头断口。仿真采用最为严苛的激励条件,依据GB 7674—2008《72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》对145 kV GIS的试验要求,分别在DES断口动、静侧施加+650 kV和-110 kV电压,接地部分(接地座和壳体)电位设置为0,将其设定为仿真计算的边界条件。设置DES工作在最低功能压力0.65 MPa下。由于A、C相结构对称,在设计考察工况时仅着重考察A、B两相,设计了4种工况,见表4。

## 2.2.2 网格划分

采用三维四面体网格单元对隔离接地开关模

表4 DES电场分布特性仿真分析的工况设置

Table 4 Operating condition settings for simulation analysis of DES electric field distribution characteristics

	kV					
	A相		B相		C相	
	动触头	静触头	动触头	静触头	动触头	静触头
工况1	+650	-110	0	0	0	0
工况2	-110	+650	0	0	0	0
工况3	0	0	+650	-110	0	0
工况4	0	0	-110	+650	0	0

型进行网格剖分。考虑到断口位置可能存在较大的击穿风险,因此对动、静触头特别是边缘倒角位置采用精细化的剖分,其余部位则可略微降低剖分精度以提高计算速度。

## 2.2.3 DES部件的最大场强计算方法

通过计算DES不同部件的最大场强值,可以获得DES在运行过程中的场强集中点,即其工作过程中的绝缘薄弱位置。其中,断口动触头、静触头、接地静触头以及壳体表面最大场强可直接通过仿真计算获取,而绝缘件、盆式绝缘子以及嵌件表面最大场强值则需要综合考虑部件环氧侧和空气侧的最大场强值。绝缘件、盆式绝缘子表面最大场强值( $E$ )可以通过式(9)进行计算<sup>[12]</sup>。

$$E = \frac{1}{2} \times \left( \frac{E_{\text{空气侧}}}{\varepsilon_1} + \frac{E_{\text{环氧侧}}}{\varepsilon_2} \right) \quad (9)$$

中心嵌件的场强值可以通过式(10)进行计算<sup>[12]</sup>。

$$E = \frac{E_{\text{环氧侧}}}{\varepsilon_2} \times \left( 1.1 \times \frac{145}{650\sqrt{3}} \right) \quad (10)$$

## 2.2.4 击穿判据

本文设计的126 kV空气绝缘环保GIS采用0.65 MPa洁净空气作为绝缘介质,设计中要求使用空气绝缘的GIS应具有与使用0.35 MPa SF<sub>6</sub>为绝缘气体的GIS相当的耐压水平。因此,其设计许用场强值使用0.35 MPa SF<sub>6</sub>气体作为绝缘介质时高压电器的许用场强进行核定。

SF<sub>6</sub>高压电器气室功能压力为0.35 MPa时,导体表面、壳体表面以及绝缘件表面的电场强度许用值根据峰值雷电冲击试验电压下的最大电场强度确定,具体计算方法见参考文献[12],而内部环氧浇注件的电场强度许用值根据1.1倍相电压(有效值)确定<sup>[12]</sup>。因此,本文核定洁净空气绝缘GIS工作性能时,不同位置的场强许用值如表5所示。

表5 气体绝缘介质为0.35 MPa SF<sub>6</sub>时不同位置的许用场强  
Table 5 Allowable field strength at different positions when SF<sub>6</sub> used as the gas insulation medium

位置	许用场强/(kV/mm)
导体表面	21.5
壳体表面	13
绝缘件表面	12
内部环氧浇注件	3

2.3 DES 内部的电场分布特性结果

126 kV 真空开断型环保 GIS 采用的是三相共筒式结构,因其内部母线及三工位隔离接地开关紧凑化布置,DES 断口或相间可能会存在较大的击穿风险,因此重点关注这些部位的电场分布特征。首先,按照工况 1 对 DES 内部电压分布特性进行考察,

在 A 相动触头上施加+650 kV 电压,在静触头施加-110 kV 电压,B、C 相触头、接地座和壳体施加 0 V 电压。各部件最大场强仿真计算结果如图 4 所示。DES 在其他工况下的场强分布与图 4 所示的分布特征基本相同,由于篇幅所限,本文不再一一展示。工况 1 条件下 DES 各部件及盆式绝缘子表面电场强度最大值如表 6 所示,其中,绝缘件、盆式绝缘子内侧和盆式绝缘子外侧表面最大场强由式(9)计算得到,嵌件电场由式(10)计算得到。相应地,改变激励条件,分别获得 DES 各部件及盆式绝缘子在工况 2~4 条件下的表面电场分布特性,并按照上述计算方法获得各部件表面最大场强值,结果如表 7~9 所示。将各工况下的计算结果进行汇总,如表 10 所示。

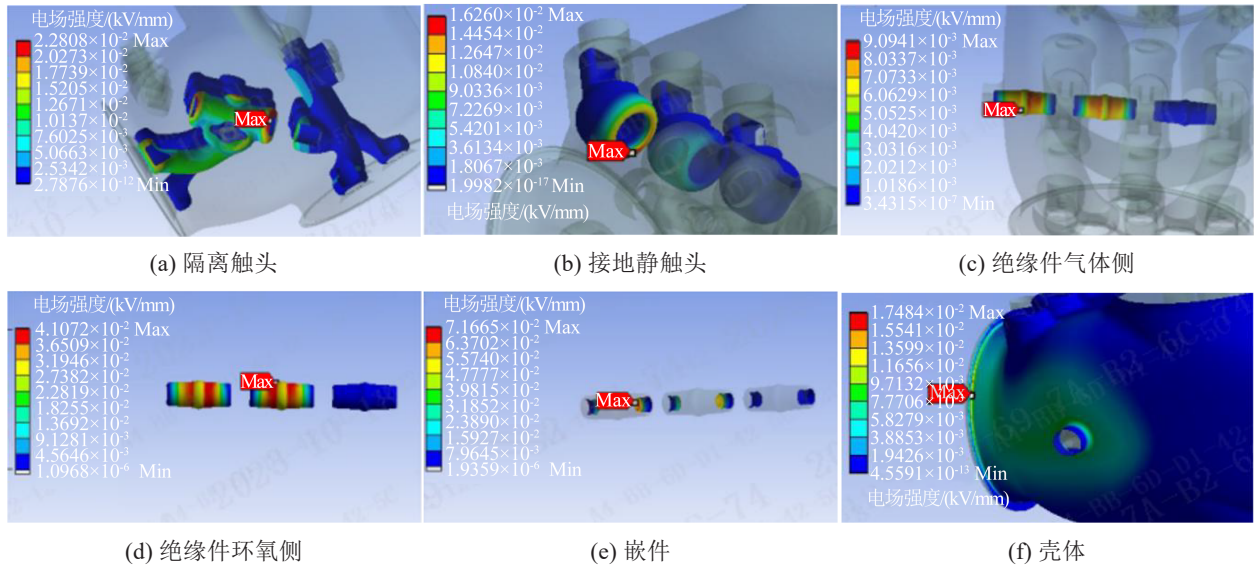


图4 工况 1 条件下 DES 各部件的电场强度分布情况

Fig.4 Distribution of electric field strength of DES components under operating condition 1

由图4(a)~(b)、表6~10可知,动触头为高压侧时(工况 1、3),DES 开关室内部电场强度最大值出现在隔离动触头表面,集中分布在触头边缘倒角位置处。为了对比分析,图5展示了静触头为高压侧时(工况 4)隔离开关触头上的电场分布,可以看出此时场强最大值出现在隔离静触头表面,同样集中在触头边缘倒角位置。

综合图4(a)~(b)和图5可知,无论高压侧为动触头或静触头,DES 开关室内部电场强度最大值均集中在高压侧触头表面的边缘倒角位置。隔离触头的场强最大值在不同工况下的差异较小,且均略高于设计许用场强值 21.5 kV/mm。但是,隔离触头

表面边缘倒角位置场强超过许用场强值的区域面积很小。考虑到本文是按照额定电压 145 kV GIS 的绝缘设计水平来考察 DES 内部电场特性的,在确定击穿判据时已留有足够裕度。因而,可以认为隔离触头的绝缘性能满足设计要求。此外,由隔离触头上电场分布的位置特征可知,触头的形状对其表面电场分布、最大场强值具有显著的影响。优化触头边缘的结构,尽量避免棱角、曲边等容易畸变空间电场的结构特征,是改善动隔离触头绝缘性能的重要技术手段。

由图4(c)~(d)和表6~10可知,在工况 1 和 3 条件下,分别在 A 相和 B 相动触头施加+650 kV,静触

表6 工况1条件下DES各部件的表面电场强度计算结果  
Table 6 Calculation results of surface electric field strength of DES components under operating condition 1

部件或位置	求解域	单侧最大场强 /(kV/mm)	最大场强 /(kV/mm)
隔离触头表面	—	22.81	22.81
接地静触头表面	—	16.26	16.26
外壳	—	17.48	17.48
嵌件	环氧侧	71.67	1.92
绝缘件	空气侧	9.09	8.43
	环氧侧	41.07	
盆式绝缘子-内侧	空气侧	16.7	12.55
	环氧侧	44.58	
盆式绝缘子-外侧	空气侧	10.69	9.48
	环氧侧	43.78	

表7 工况2条件下DES各部件表面电场强度计算结果  
Table 7 Calculation results of surface electric field strength of DES components under operating condition 2

部件或位置	求解域	单侧最大场强 /(kV/mm)	最大场强 /(kV/mm)
隔离触头表面	—	23.33	23.33
接地静触头表面	—	—	—
外壳	—	13.73	13.73
嵌件	环氧侧	10.78	0.29
绝缘件	空气侧	1.33	1.24
	环氧侧	6.13	
盆式绝缘子-内侧	空气侧	22.62	15.5
	环氧侧	44.41	
盆式绝缘子-外侧	空气侧	10.21	9.26
	环氧侧	43.99	

表8 工况3条件下DES各部件表面电场强度计算结果  
Table 8 Calculation results of surface electric field strength of DES components under operating condition 3

部件或位置	求解域	单侧最大场强 /(kV/mm)	最大场强 /(kV/mm)
隔离触头表面	—	22.7	22.7
接地静触头表面	—	14.7	14.7
外壳	—	18.26	18.26
嵌件	环氧侧	67.14	1.79
绝缘件	空气侧	8.35	8.04
	环氧侧	41.01	
盆式绝缘子-内侧	空气侧	16.12	12.28
	环氧侧	44.69	
盆式绝缘子-外侧	空气侧	10.21	9.25
	环氧侧	43.98	

头施加-110 kV 电压时,绝缘件环氧侧表面最大场强值可达 41.07 kV/mm 和 41.01 kV/mm,场强最大

表9 工况4条件下DES各部件表面电场强度计算结果  
Table 9 Calculation results of surface electric field strength of DES components under operating condition 4

部件或位置	求解域	单侧最大场强 /(kV/mm)	最大场强 /(kV/mm)
隔离触头表面	—	23.82	23.82
接地静触头表面	—	—	—
外壳	—	13.96	13.96
嵌件	环氧侧	10.78	0.29
绝缘件	空气侧	1.33	1.24
	环氧侧	6.13	
盆式绝缘子-内侧	空气侧	22.62	15.49
	环氧侧	44.41	
盆式绝缘子-外侧	空气侧	10.21	9.26
	环氧侧	43.99	

表10 各工况下DES各部件及盆式绝缘子的表面最大场强值结果汇总

Table 10 Summary of maximum field strength values on the surface of DES components and basin insulators under various operating conditions

	kV/mm					
	隔离触头	接地静触头	壳体	盆式绝缘子内	绝缘件	嵌件
工况1	22.81	16.26	17.48	12.55	8.43	1.92
工况2	23.33	—	13.73	15.5	1.24	0.29
工况3	22.70	14.70	18.26	12.28	8.04	1.79
工况4	23.82	—	13.96	15.49	1.24	0.29
许用值	21.50	21.50	13.00	12.00	12.00	3.00

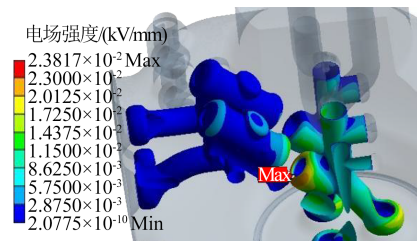


图5 工况4条件下隔离开关触头上的电场分布

Fig.5 Electric field distribution on the contact of isolation switch under operating condition 4

值出现在A、B相之间的绝缘件表面。在工况2和4条件下,最大电场强度仍旧出现在A、B相之间的绝缘件,但是其幅值相较于工况1大幅下降。此外,无论在何种工况条件下,绝缘件表面气体侧的最大场强值普遍较小,未超过许用场强,且留有一定裕度。

由图4(e)及表6~10可知,当隔离触头为高压侧时(工况1、3),中心嵌件上电场强度总是低于许用场强值,绝缘设计具有较大的安全裕度。当隔离

静触头为高压侧时(工况 2、4), 嵌件表面场强很小 ( $<1 \text{ kV/mm}$ ), 不存在绝缘隐患。

由图 4(f)和表 6~10 可知, 各工况下壳体表面最大场强值均超过许用场强值, 这可能是由于壳体本身结构以及 DES 内部导体形状、尺寸以及排布方式存在问题, 隔离开关壳体结构设计仍有一定的改善空间。

盆式绝缘子中心导体嵌件与法兰之间的电位差会在其表面形成较大的电位梯度, 而 DES 内部紧凑的结构容易导致局部电场畸变, 由于介质分界面上的场强分布不均匀, 容易导致盆式绝缘子表面产生沿面放电, 直至最终发展成贯穿性的介质沿面击穿, 导致绝缘子失效。测试工况 1 条件下盆式绝缘子表面电场分布如图 6 所示。盆式绝缘子内外侧均需满足规定的绝缘能力, 因此对内外两个侧面都进行了电场分布特性分析。

由图 6 可知, 对盆式绝缘子结构而言, 其最大电场强度分布在环氧侧表面。盆式绝缘子无论内、外侧, 在各种工况下的电场分布特征基本一致: 绝缘子表面电场分布极不均匀, 由于中心嵌件屏蔽罩的均压作用, 中心嵌件嵌槽内电场强度较小; 远离屏蔽罩后电场强度快速增加至最大值, 之后沿绝缘子表面随其与中心嵌体距离的增加而快速减小, 盆式绝缘子的气体侧和环氧侧均遵从这一规律。盆式绝缘子表面最大场强值出现在洁净空气、环氧树脂绝缘材料与金属嵌件 3 种物质的交界处, 这是由于洁净空气的介电常数远小于环氧树脂绝缘材料。由分界面上的衔接条件可知, 导体、洁净空气和环氧材料 3 种物质交界处的气体侧场强升高时, 容易出现碰撞电离并发展成沿面闪络<sup>[24]</sup>。由表 10 可知, 不同工况下盆式绝缘子内侧表面的最大场强值均略微超过许用场强。因此, 盆式绝缘子环氧树脂、导体、气隙三相交界处是盆式绝缘子最危险的绝缘薄弱环节, 结构设计时应予以重点关注。

此外, 环绕嵌体周围的电场分布也并非绝对均匀, 而是在激励相靠近其他两相以及靠近法兰的位置上略大一些。因此, 若盆式绝缘子嵌件周围存在裂纹等绝缘缺陷或金属导电微粒, 则电场集中位置处电场畸变将更加严重, 加之沿面闪络场强远远小于击穿场强, 因此非常容易引发局部沿面放电, 成为绝缘隐患。综上, 盆式绝缘子表面场强分布不均匀, 易在中心嵌体附近形成局部场强集中, 应在设计中加强对该区域的屏蔽措施以改善其绝缘性能。

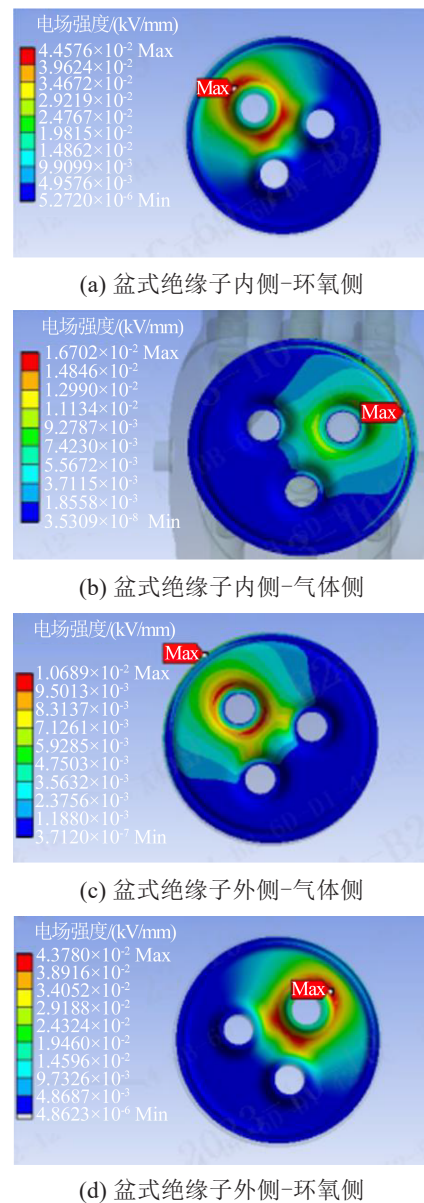


图 6 工况 1 条件下盆式绝缘子的表面电场强度分布  
Fig.6 Distribution of electric field strength on the surface of basin insulators under operating condition 1

### 3 环保型 GIS 的绝缘试验

本节依据仿真设计结构制作 126 kV 真空开断+洁净空气绝缘环保型 GIS 样机, 并对其绝缘性能进行试验验证, 以此来确定洁净空气许用场强的合理性和裕度, 以及环保 GIS 的可靠性。试验项目包括单相断口 A、单相断口 B、全相端口 A、全相端口 B 耐压测试。表 11 所示为环保 GIS 样机在正、负极性雷电冲击下的测试波形幅值、波前/波尾时间以及测试结果。结果显示仅在一次试验过程中发生了放电, 后经检查发现该次放电是由连接处结合圆角毛刺导致, 后续已对结合面处的圆角尺寸进行了优化。

由此说明,本文所设计的126 kV环保GIS的绝缘性能可靠,因此清洁空气绝缘介质的许用设计场强值的确定方法具有合理性及裕度。

表11 环保GIS样机的雷电冲击耐压试验结果

Table 11 Lightning impulse withstand voltage test results of the environmental GIS prototype

测试项目	负极性峰值电压/kV	波前/波尾时间/ $\mu$ s	正极性峰值电压/kV	波前/波尾时间/ $\mu$ s	试验结果
单断口 A相	-661.39	1.07/48.52	654.45	1.09/49.32	通过
	-662.72	1.05/48.31	662.54	1.19/48.99	通过
	-664.2	1.11/48.12	660.69	1.09/49.23	通过
	-666.71	1.10/48.17	656.56	1.11/49.59	通过
	-658.59	1.07/48.19	657.94	1.11/49.28	通过
单断口 B相	-647.87	1.09/48.47	651.19	1.07/49.19	通过
	-648.15	1.05/48.42	655.13	1.10/49.09	通过
	-656.78	1.07/48.59	657.05	1.10/49.19	通过
	-659.51	1.08/48.13	957.39	1.07/48.91	通过
	-659.89	1.05/48.23	656.81	1.10/49.09	通过
全相 A相	-658.37	1.14/48.73	655.69	1.14/49.64	通过
	-664.42	1.16/48.48	656.39	1.16/放电	未通过
	-662.75	1.09/48.74	662.19	1.17/49.49	通过
	-659.38	1.11/48.79	660.95	1.08/49.52	通过
	-664.65	1.12/48.53	659.22	1.13/49.56	通过
全相 B相	-651.23	1.12/48.991	657.77	1.14/49.54	通过
	-658.02	1.16/48.07	656.08	1.15/49.61	通过
	-654.10	1.11/48.74	653.73	1.14/49.31	通过
	-655.25	1.09/48.27	656.96	1.14/48.89	通过
	-658.06	1.13/48.37	655.02	1.17/49.29	通过

## 4 结论

(1)由仿真计算结果可知,本文所设计的126 kV空气绝缘型环保GIS的隔离接地组合开关的隔离触头、盆式绝缘子、壳体等关键部件均存在一定的绝缘隐患。由关键部件的电场分布云图可知,超过场强许用值的电场分布区域很小,可以认为本文所设计的环保GIS结构是合理的。但隔离触头边缘倒角位置和盆式绝缘子空气、导体、环氧材料三相交界处均为典型的电场集中位置,是GIS设备的绝缘薄弱环节,需要在GIS设计中重点关注。

(2)经过仿真计算和试验验证,使用现有的SF<sub>6</sub>气体绝缘GIS的母线模块获取洁净空气绝缘介质的许用设计场强,在此基础上综合考虑设备的结构尺寸约束以开展环保型GIS的工作压力设计,是确定洁净空气许用设计场强值的有效研究路径,为采用“真空开断+洁净空气绝缘”方案的环保型GIS的设

计提供了可供参考的技术路线。

(3)在GIS中使用洁净空气作为绝缘介质,将导致更高的工作压力和更大的间隙距离,大间隙距离导致的更大设备尺寸可能会引发更多的绝缘问题。因此,在进行GIS的结构设计时,不能仅通过增加间隙的距离来提高绝缘强度,还必须充分考虑电场的分布特性,使极间及整个场域的电场分布尽可能均匀。

## 参考文献 References

- [1] 贾申利,贾荣照,朱璐.真空开断型环保GIS发展现状及趋势[J].高压电器,2022,58(9):1-12.  
JIA Shenli, JIA Rongzhao, ZHU Lu. Advances in the development of vacuum-based eco-friendly GIS[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(9):1-12.
- [2] 黄小龙,赵双伟,王勇,等.真环保型高压电力开关设备研究进展综述[J].工程科学与技术,2023,55(3):14-29.  
HUANG Xiaolong, ZHAO Shuangwei, WANG Yong, et al. A review of research progress on environment-friendly high-voltage power switchgear[J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(3):14-29.
- [3] 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J].工程科学与技术,2022,54(1):47-59.  
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(1):47-59.
- [4] 李德军,沈威,KUSCHEL M,等.一种采用洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型GIS的研究和应用[J].高压电器,2019,55(2):21-30.  
LI Dejun, SHEN Wei, KUSCHEL M, et al. Development and application of environment-friendly GIS combined clean air and vacuum interruption technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(2):21-30.
- [5] 李兴文,邓云坤,姜旭,等.环保气体C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N和C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O与CO<sub>2</sub>混合气体的绝缘性能及其应用[J].高电压技术,2017,43(3):708-714.  
LI Xingwen, DENG Yunkun, JIANG Xu, et al. Insulation performance and application of environment-friendly gases mixtures of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N and C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O with CO<sub>2</sub>[J]. High Voltage Engineering,2017, 43(3):708-714.
- [6] 马朝阳,孙广雷,刘劭玮,等.采用4种不同纵磁触头结构的126 kV单断口真空断路器温升性能对比研究[J].高压电器,2021,57(6):64-71.  
MA Chaoyang, SUN Guanglei, LIU Shaowei, et al. Comparison study on temperature-rise performance of 126 kV single-break vacuum circuit breakers with 4 types of AMF contacts[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(6):64-71.
- [7] 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):2806-2819.  
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.
- [8] SIDDIQUI N, WEEKS C, ROGERS J. Advancements in clean air insulation technologies for switchgear and circuit breakers[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2022, 20(2): 132-138.
- [9] SEEGER M, SMEETS R, YAN J, et al. Recent trends in development of high voltage circuit breakers with SF<sub>6</sub> alternative gases [J]. Plasma Physics and Technology, 2017, 4(1): 8-12.
- [10] 张博雅, 李兴文, 唐念, 等. 新型环保绝缘气体研发回顾与展望 [J]. 高压电器, 2022, 58(4): 1-7.  
ZHANG Boya, LI Xingwen, TANG Nian, et al. Review and outlooks on development of new environmentally- friendly insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 1-7.
- [11] 崔景春, 王承玉, 刘兆林, 等. 气体绝缘金属封闭开关设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.  
CUI Jingchun, WANG Chengyu, LIU Zhaolin, et al. Gas insulated metal enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [12] 黎斌. SF<sub>6</sub> 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.  
LI Bin. SF<sub>6</sub> High voltage electrical design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [13] 汤伟, 张建宏, 王振良, 等. 环氧树脂绝缘浇注件局部放电滞后特性的探讨[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 133-138.  
TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the hysteresis characteristic of partial discharge for epoxy resin insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 133-138.
- [14] 武胜斌, 姜旭, 辛昭昭, 等. 基于 252 kV 三相盆式绝缘子水压试验的仿真分析及结构优化[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 133-137, 143.  
WU Shengbin, JIANG Xu, XIN Zhaozhao, et al. Simulation analysis and structure optimization based on the hydrostatic test of 252 kV three-phase basin type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 133-137.
- [15] 孙龙勇, 李付永, 姚灿江, 等. 复合式组合电器三工位组合开关的设计与开发[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 296-304.  
SUN Longyong, LI Fuyong, YAO Canjiang, et al. Design and development of three-position combination switch of compound combined electrical apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 296-304.
- [16] 白玮, 贺永明, 王刚, 等. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体 GIS 隔离接地开关绝缘及压力承受水平的设计分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(5): 97-100.  
BAI Wei, HE Yongming, WANG Gang, et al. Design and analysis on insulation and pressure bearing level of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas GIS[J]. Insulating Material, 2020, 53(5): 97-100.
- [17] 郑一博, 徐党国, 秦逸帆, 等. 真 110 kV GIS 同频同相交流耐压试验中三工位隔离开关内部电场分布特性[J]. 中国电力, 2022, 53(2): 43-47.  
ZHENG Yibo, XU Dangguo, QIN Yifan, et al. The distribution of electric field in the three-station disconnecting switch in same frequency and phase AC withstand voltage test of 110 kV GIS [J]. Electric Power, 2020, 53(2): 43-47.
- [18] 张施令, 姚强, 苗玉龙, 等. GIS 用盆式绝缘子电场分布与绝缘性间关系研究[J]. 电磁避雷器, 2017(6): 209-215.  
ZHANG Shiling, YAO Qiang, MIAO Yulong, et al. Study on the relationship between electric field distribution and insulation of basin insulators for GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6): 209-215.
- [19] 王永强, 胡芳芳, 谢军, 等. GIS 盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(1): 40-45.  
WANG Yongqiang, HU Fangfang, XIE Jun, et al. Simulation study on electric field change rule of GIS disc insulator with air gap defects[J]. Insulating Materials, 2016, 49(1): 40-45.
- [20] 杜迎乾, 钟建英, 段晓辉, 等. 特高压 GIS 用通气型盆式绝缘子气流通道设计与性能验证[J]. 绝缘材料, 2019, 52(5): 45-49.  
DU Yingqian, ZHONG Jianying, DUAN Xiaohui, et al. Gas flow channel design and performance verification of gas permitted basin-type insulator for ultra-high voltage GIS[J]. Insulating Materials, 2019, 52(5): 45-49.
- [21] 何宁辉, 李秀广, 周秀, 等. GIS 固体绝缘不同类型气隙缺陷的放电特征[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2073-2083.  
HE Ninghui, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Discharge characteristics of different types of void defects of solid insulation of GIS[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2073-2083.
- [22] 刘琳, 李晓昂, 张乔根, 等. 沿面电场对 GIS 绝缘子闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2906-2913.  
LIU Lin, LI Xiaoang, ZHANG Qiaogen, et al. Effect of electric field along the surface on the flashover voltage of GIS insulators [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2906-2913.
- [23] 杨为, 朱太云, 田宇, 等. 雷电冲击电压下 GIS 盆式绝缘子暂态电场分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 807-814.  
YANG Wei, ZHU Taiyun, TIAN Yu, et al. Analysis for transient electric field computation of GIS basin insulator under lightning impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 807-814.
- [24] 朱传运, 刘超峰, 王小东, 等. 交流 GIS 用盆式绝缘子三交区绝缘结构设计研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 46-51.  
ZHU Chuanyun, LIU Chaofeng, WANG Xiaodong, et al. Insulation structure design of basin insulator in three media interaction areas for AC GIS[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 46-51.

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-08-16.

作者简介:

顾乐(1986-), 女(汉族), 上海人, 高级工程师, 主要研究方向为真空灭弧型开关、高压试验技术。