



# GIS 双断口隔离开关不停电试验电场分布及击穿特性

董子凡<sup>1</sup>, 任劼帅<sup>1</sup>, 殷建刚<sup>2</sup>, 陈隽<sup>1</sup>, 文雅钦<sup>1</sup>, 李劲彬<sup>1</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 共气室结构的双断口隔离开关 (double-fracture disconnect switch, DDS) 在不停电耐压试验过程中存在因试验侧断口击穿而影响运行侧断口绝缘性能的风险, 在设计阶段需要对其电场分布和击穿特性进行研究。为此, 以新研发的 110 kV 三相共箱式 GIS 双断口隔离开关为例, 采用有限元方法对电场进行仿真分析, 得到其在现场不停电工频耐压试验中的内部电场强度分布。根据电场的计算结果, 采用基于汤逊放电理论的击穿判据, 研究不停电试验中两个断口的击穿特性, 证明了在 DDS 现场不停电交流耐压试验过程中, 试验侧断口击穿不会对运行侧的绝缘性能造成影响。研究结果可以为在运的 DDS 二期扩建时的不停电扩建与现场绝缘试验工作提供安全保证的理论支撑, 也为未来新型 DDS 设备研发过程中的绝缘校核提供了更加翔实的理论依据。

**关键词:** 双断口隔离开关; 不停电扩建; 有限元仿真; 汤逊放电理论; 击穿特性

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202305009

## 0 引言

随着电力行业的飞速发展, 气体绝缘金属封闭开关 (gas insulated switchgear, GIS) 设备凭借其占地面积小、结构紧凑、可靠性高、维护工作量少等优点得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。传统设计的 GIS 隔离开关只有一个隔离断口, 在扩建施工和现场试验时需要运行母线反复停电甚至双母同停, 带来巨大的停电协调困难和经济损失, 电网结构可靠性水平显著降低, 已成为制约 GIS 扩建建设、现场试验、应急抢修的顽疾<sup>[6-8]</sup>。

为解决上述问题, GIS 双断口隔离开关 (double-fracture disconnect switch, DDS) 作为一种重要的 GIS 不停电扩建方案, 得到了广泛关注。双断口隔离开关通过一个可靠的传动机构同时控制 2 个断口的开断, 具有同开同闭的功能, 且任意一个断口均能满足绝缘要求<sup>[9-10]</sup>。2017 年起, 国网与南网陆续投运大量 220 kV 三相分箱型 DDS, 更有应用前景的 110 kV 三相共箱型 DDS

也在广泛研发中。

目前, GIS 隔离开关内部电场分布的研究主要采用仿真分析方法<sup>[11-14]</sup>。然而, 不论是 220 kV 还是 110 kV 的双断口隔离开关, 均采用共气室结构。尚无研究或试验能证明在 DDS 现场不停电耐压试验中, 试验侧断口击穿造成的内部电场变化、电荷运动等不会对运行侧造成影响。尽管 DDS 中间有辅助接地装置可以使动触头导体在试验时接地, 共气室结构的 DDS 试验侧断口击穿仍然存在影响运行侧断口绝缘性能的潜在风险, 一定程度上限制了该技术的应用<sup>[15-18]</sup>。

现有文献对双断口隔离开关的绝缘性能和击穿特性的研究往往仅局限于电场分布计算。文献<sup>[15]</sup>从壳体铸造、机械传动、内部结构及电场分布等方面, 说明了 DDS 能够满足不停电扩建和试验的要求。文献<sup>[16]</sup>通过有限元软件计算了 220 kV 双断口隔离开关整体电位分布、壳体和中间导体的电场分布。文献<sup>[17]</sup>通过电场计算结果优化断口设计, 为 GIS 不停电扩建及检修隔离断口设计提供了支撑。文献<sup>[18]</sup>提出了 DDS 全覆盖式测试评估标准, 并从机械、电气和传热 3 个方面对其进行评估, 证明了新的 DDS 模块可以应用于实际工程。上述研究可以得到 DDS 结构的各部

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-08-03。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (500-202222119A-1-1-ZN)。



件均满足电场许用值的结论，但仅分析了正常情况下的电场分布，并未进行断口击穿时的电场分布研究。同时，该方法无法判断试验侧断口击穿对运行侧的影响，采用静电场场强数值大小来确定断口是否击穿也不够精确和可靠。

在不停电试验时，双断口隔离开关运行侧静触头施加母线的运行电压，三相相位分别相差  $120^\circ$ ，而扩建侧静触头施加同相的试验电压<sup>[8]</sup>。相比于现有 220 kV DDS，新研发的 110 kV 三相共箱型 DDS 具有结构更加紧凑、试验时电场分布更复杂的特点。因此，有必要对其不停电试验时的电场分布及击穿特性进行详细分析，并探究试验侧断口击穿对运行侧的影响。

本文以 110 kV 三相共箱型 GIS 双断口隔离开关为例，首先采用有限元方法对电场进行仿真分析，得到其在不停电试验中的内部电场强度分布。然后根据电场计算结果，提出基于汤逊放电理论的击穿判据，研究不停电试验中 2 个断口的击穿特性，并重点关注扩建侧恰好击穿时运行侧的击穿情况。最后通过计算证明在 DDS 的现场不停电交流耐压试验过程中，试验侧断口击穿不会对运行侧的绝缘性能造成影响，验证了该类型设备的安全性和可靠性，为 DDS 设备的现场应用提供理论支撑。

## 1 基于汤逊放电理论的击穿判据

### 1.1 隔离开关内部电场计算方法

目前，有限元方法在电场计算领域已经得到了广泛应用<sup>[19-21]</sup>。采用有限元方法对新研发的 110 kV 三相共箱式 GIS 双断口隔离开关内部电场强度进行计算，研究和分析 DDS 内部电场分布特点，并为断口击穿判据的计算提供基础。

电场的数学模型可由麦克斯韦方程组来描述，整个求解空间内的电势满足拉普拉斯方程，即

$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中： $\varphi$  为电势； $x$ 、 $y$ 、 $z$  为坐标轴。

针对 110 kV 双断口隔离开关不停电交流耐压试验，满足以下边界条件。

1) 不停电试验时，隔离开关壳体接地。同时，中间辅助接地装置合闸，使动触头导体接

地。因此整个壳体和动触头导体电势为 0，满足第一类边界条件  $\varphi = 0$ 。

2) 运行侧静触头与 110 kV 母线相连，即运行侧静触头电势等于母线运行电压，峰值为  $121\sqrt{2}/\sqrt{3}$  kV。a、b、c 三相瞬时电压相位分别相差  $120^\circ$ 。

3) 试验侧静触头电势等于试验外加电压的大小，对于工频耐压试验，施加的工频交流电的电势最大值为  $230\sqrt{2}$  kV。

4) 为满足有限元对闭域问题的求解，隔离开关与母线的交界面满足第二类边界条件，即法向电场分量为 0。

### 1.2 汤逊放电理论数学模型

1903 年汤逊首次提出描述气体击穿的汤逊放电模型，将放电空间内带电粒子的增殖分为 3 个阶段，分别引入汤逊第一、第二和第三电离系数定量描述气体电离过程<sup>[22-23]</sup>。

根据汤逊理论，均匀电场中放电的开始条件为

$$\delta = \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为第一汤逊电离系数； $\gamma$  为第三汤逊电离系数，即阴极二次发射系数； $d$  为极距； $\delta$  为空间中所激发的二次电子数<sup>[13]</sup>。

式 (2) 为汤逊自持放电条件，也称击穿判据。将其推广至非均匀电场的情况，得到非均匀电场中的击穿判据为

$$\delta = \gamma(e^{\int_D \alpha ds} - 1) = 1 \quad (3)$$

式中： $N$  为气体分子的数密度，对于 110 kV GIS 双断口隔离开关，在实际工况下，隔离开关内部典型气压 0.42 MPa，气温  $20^\circ\text{C}$ ，根据理想气体方程计算可得  $N = 1.68 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ； $D$  是沿粒子运动轨迹的曲线； $ds$  为弧微分。

$\alpha$  是约化电场的函数， $\alpha = f(E/N)$ ，即在任意给定的非均匀电场中， $\alpha$  是位置的函数。

将式 (3) 等效变换为

$$\int_D \alpha ds = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (4)$$

式 (4) 左边的计算结果称为汤逊积分系数。基于此，可以得到如下 3 种击穿判据。

1) 无放电判据。若式 (4) 等式左边小于右边，则有

$$\oint_D N\alpha ds < \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (5)$$

此时，不会发生放电现象，设备未击穿。

2) 放电判据。若式 (3) 中  $\delta < 10^8$  [24]，则有

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) < \oint_D N\alpha ds < \ln\left(1 + \frac{10^8}{\gamma}\right) \quad (6)$$

此时，会发生放电，但不足以形成流柱。该情况下，放电电流通常较小，对电气设备的影响有限。因此，在这种情况下可以认为设备没有被击穿。

3) 流柱判据。当式 (3) 中  $\delta \geq 10^8$  时，则有

$$\oint_D N\alpha ds \geq \ln\left(1 + \frac{10^8}{\gamma}\right) \quad (7)$$

此时，会发生流柱放电，间隙中形成流柱并流过很大的电流，电气设备被击穿 [13]。取铜导体二次发射系数典型值  $\gamma = 0.07$ ，计算得到不等式右边系数值为 21.08，即导体表面某点的汤逊积分系数大于 21.08 时，可以认为设备从该点处发生击穿。

整个击穿判定过程如图 1 所示，利用有限元方法计算出设备内部空间电场分布  $E$ ，并通过汤逊第一电离系数  $\alpha$  与约化电场强度的关系插值得得  $\alpha$  与位置的关系，即可计算触头表面各点的汤逊积分系数，进而得到击穿判定结果。

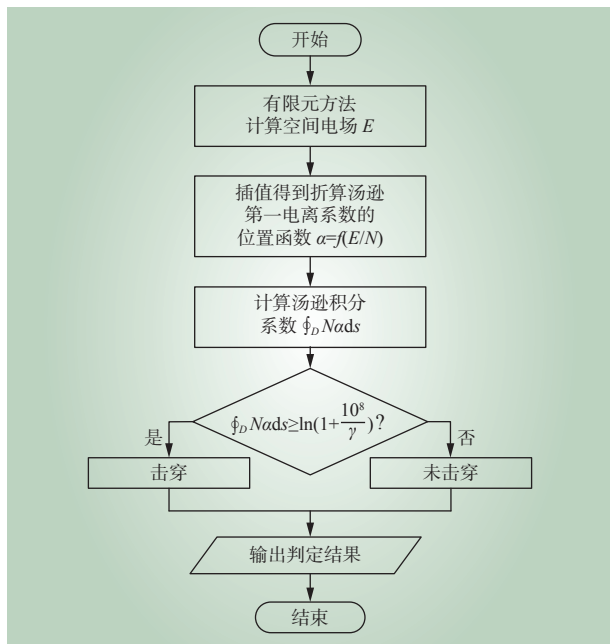


图 1 击穿判定方法流程

Fig. 1 Breakdown judgment method process

## 2 双断口隔离开关建模与仿真

### 2.1 双断口隔离开关建模

模型建立是双断口隔离开关有限元仿真的基础。本文所研究的新型 110 kV 三相共箱式 GIS 双断口隔离开关的组成部分包括静触头（运行侧和扩建侧）、动触头、辅助接地装置、支柱绝缘子、操纵机构和壳体等，如图 2 所示，三维模型如图 3 所示。

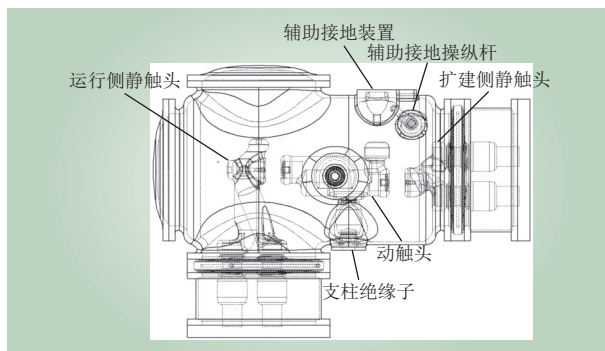


图 2 双断口隔离开关

Fig. 2 Double-fracture disconnect switch

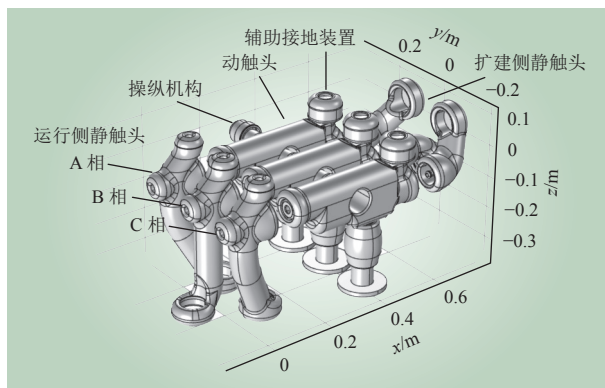
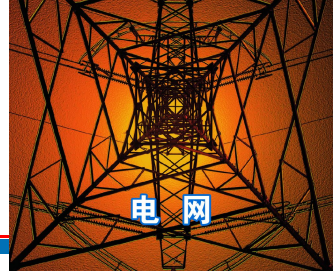


图 3 双断口隔离开关模型

Fig. 3 Model of double-fracture disconnect switch

由于主要关注的是动静触头导体表面和整个壳体内部的电场分布，为简化计算可以忽略触头内部的触指及弹簧、动触头操纵机构及齿轮、辅助接地装置及其操纵杆等对电场影响较小的部分，从而避免细小处剖分过密造成的仿真模型计算量过大和收敛性较差的情况。同时，由于壳体与动静触头导体之间的距离较远，且主要考虑触头表面的击穿情况，因此可以将壳体简化为圆柱体与长方体的组合，能够在确保精度的前提下减小计算量和提高模型收敛性。





对所建立的几何模型进行剖分。隔离开关断口处剖分较密，而远离断口处的部分剖分可以较疏。剖分结果共得到约 110 万个四面体单元。

## 2.2 双断口隔离开关电场分布

以双断口隔离开关不停电交流耐压试验为例，研究隔离开关内部的电场分布情况。交流耐压试验时，2 个断口均处于分闸状态。扩建侧静触头施加幅值为  $230\sqrt{2}$  kV 的工频试验电压，运行侧静触头为 110 kV 母线的运行电压，幅值为  $121\sqrt{2}/\sqrt{3}$  kV。动触头通过辅助接地装置接地，隔离开关外壳直接接地，二者电位均为 0。

为更好探究试验侧断口击穿对运行侧的影响，取试验中可能出现的最差情况，即试验电压最大值与 a 相运行电压的最小值出现在同一时刻，使其差值能够达到最大。设试验侧静触头所加电压的相位为 0，三相同相位，则运行侧 a、b、c 三相静触头所加电压的相位应分别为  $-\pi$ 、 $\pi/3$  和  $-\pi/3$ 。

仿真模型的边界条件为：试验侧静触头三相电势  $\varphi = 230\sqrt{2}\sin(2\pi ft)$  kV；运行侧静触头 a 相电势  $\varphi = 121\sqrt{2}/\sqrt{3}\sin(2\pi ft - \pi)$  kV，b 相电势  $\varphi = 121\sqrt{2}/\sqrt{3}\sin(2\pi ft + \pi/3)$  kV，c 相电势  $\varphi = 121\sqrt{2}/\sqrt{3}\sin(2\pi ft - \pi/3)$  kV；动触头及外壳电势  $\varphi = 0$ ， $f = 50$  Hz。

$t = 0.005$  s 时，双断口隔离开关触头导体表面电场和内部电势分布如图 4 所示。图中展示了三相静触头和动触头表面电场强度分布计算结果。可以看出，110 kV GIS 双断口隔离开关交流耐压试验中，场强的最大值出现在扩建侧静触头表面靠近动触头的边缘处，约为  $1.33 \times 10^7$  V/m。

图 5 展示了隔离开关内部切面上的电势分布情况。扩建侧静触头在该时刻达到最大，约为 325 kV。运行侧静触头电势最低约为  $-98$  kV，出现在 A 相，动触头及外壳电势  $\varphi = 0$ ，均与所设边界条件一致。在轴向竖直切面上，电势在试验侧静触头与动触头之间下降较快，表明隔离开关内

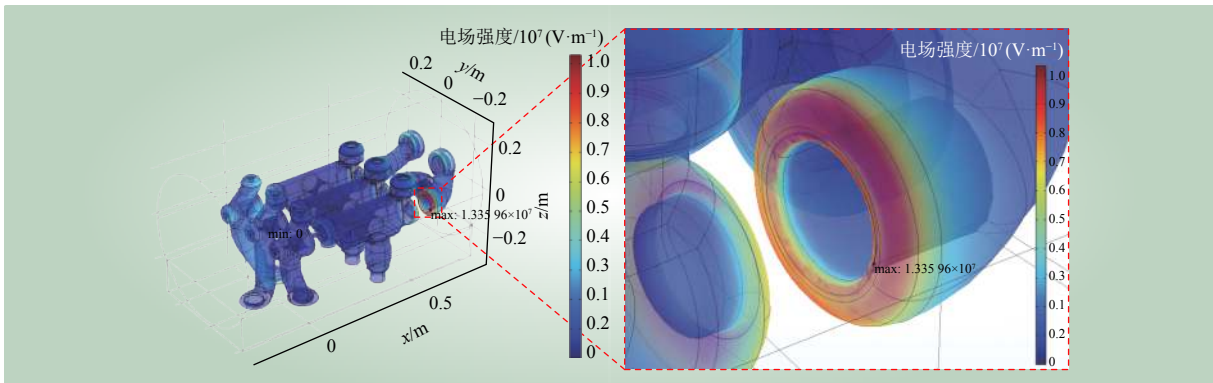


图 4 交流耐压试验  $t = 0.005$  s 时触头导体表面电场分布

Fig. 4 Distribution of electric field on the surface of conductor in voltage-withstand test when  $t=0.005$  s

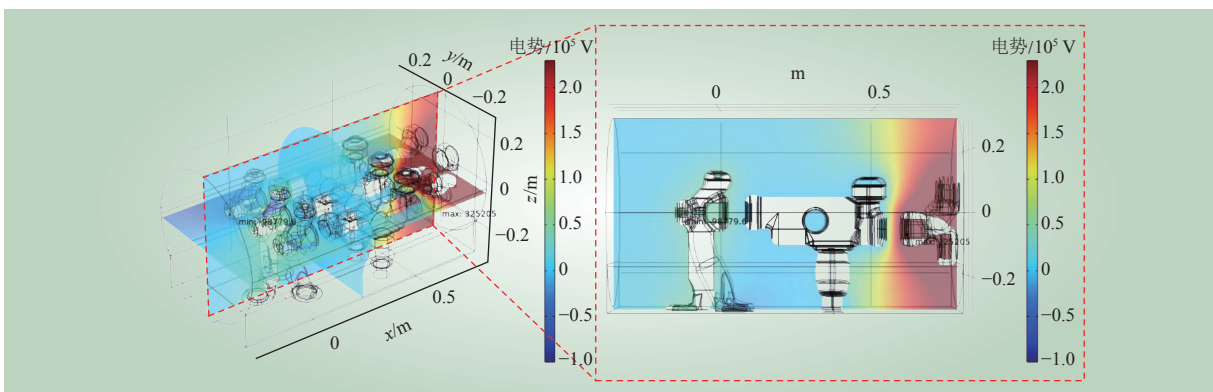


图 5 交流耐压试验  $t = 0.005$  s 时隔离开关内部电势分布

Fig. 5 Internal potential distribution of the switch in voltage-withstand test when  $t=0.005$  s



部在此处的电场强度较大。

### 3 双断口隔离开关击穿特性研究

#### 3.1 交流耐压试验下的击穿情况

通过有限元计算方法,可以求解出任一时刻隔离开关内部的电场分布情况,结合折算汤逊第一电离系数  $\alpha$  与电场强度的关系,可以得到式(4)中的汤逊积分系数与位置之间的关系,进而可以计算击穿判据值,并判断断口击穿情况。文献[25]中 SF<sub>6</sub> 气体折算汤逊第一电离系数如表 1 所示,空间中各点的实际汤逊第一电离系数通过该表插值得到。整个空间中的气压取该设备典型运行时气压 0.42 MPa,温度取 20 ℃。

表 1 SF<sub>6</sub> 气体折算汤逊第一电离系数  
Table 1 The reduced Townsend first ionization coefficient of SF<sub>6</sub>

约化电场强度/ $10^{-21}(\text{V}\cdot\text{m}^{-2})$	折算汤逊第一电离系数/ $(10^{-21}\text{m}^2)$
170	-5.5
200	-4.4
250	-2.5
300	-1.0
350	0.5
400	2.3

针对双断口隔离开关交流耐压试验的情况,以 2.2 节隔离开关内部场强计算结果为基础,计算出动触头和运行侧静触头表面汤逊积分系数。由于试验侧交流电压在半个周期后由正转负,场强也随之反向,电子崩会朝着相反的方向移动。因此,这里仅需考虑正半周期 0~0.01 s 内的情况。若到 0.01 s 时电子仍无法到达阳极表面,则其运动轨迹曲线  $D$  不连续,汤逊积分系数计算结果为 0,断口不击穿。若正半周期内能够出现触头导体表面某点的汤逊积分系数计算结果大于击穿判据的情况,则可认为断口在该条件下会发生击穿。

为便于展示,减小计算量,且击穿更可能发生在导体靠近试验侧的表面,选取最靠近试验侧的部分导体表面作为阴极,仅展示这 2 部分的汤逊积分系数计算结果。交流耐压试验中  $t = 0.01$  s 时触头表面汤逊积分系数计算结果如图 6 所示。

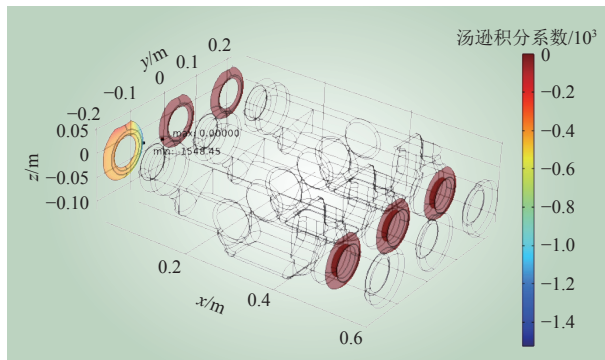


图 6 交流耐压试验触头表面汤逊积分系数  
Fig. 6 Thomson integral coefficient in voltage-withstand test

可以看出,运行侧静触头表面和靠近试验侧的动触头表面汤逊积分系数在正半周期内均不大于 0,这是由导体表面电场强度不大、断口间距离较远和 SF<sub>6</sub> 气体较低的第一电离系数共同所导致。在不停电工频耐压试验的条件下,该新型双断口隔离开关的断口间不会击穿,可以顺利通过耐压试验。

图 7 展示了交流耐压试验下阴极发射的电子崩在空间中的移动过程。在图中 4 个时刻,试验侧和运行侧产生的电子崩位移均近似为 0,即一个周期内电子崩无法到达阳极,表明扩建侧断口不会被击穿。

#### 3.2 增大导体电势的击穿情况

逐步增大试验侧静触头表面电势,直至正半周期内的某一时刻计算所得的触头导体表面汤逊积分系数能够超过击穿判据,则可认为扩建侧断口在该电压下会发生击穿。逐次升高试验侧电压进行仿真计算,经过一系列迭代,在扩建侧静触头试验电压峰值为  $4\,400\sqrt{2}$  kV,  $t = 0.01$  s 时汤逊积分系数的计算结果如图 8 所示。

图 8 展示了扩建侧断口恰好击穿时动触头导体表面和运行侧静触头导体表面的汤逊积分系数在  $t=0.01$  s 时的计算结果。在该电压下,动触头表面汤逊积分系数在正半周期内超过击穿判据,可以认为扩建侧断口在该电压下会被击穿。同时,运行侧静触头导体表面的汤逊积分系数计算结果均不大于击穿判据,表明运行侧断口在扩建侧断口击穿的条件下不发生击穿。

图 9 展示了该条件下电子崩在空间中的移动过程。可以看出,  $t = 0$  时动触头导体表面发射电



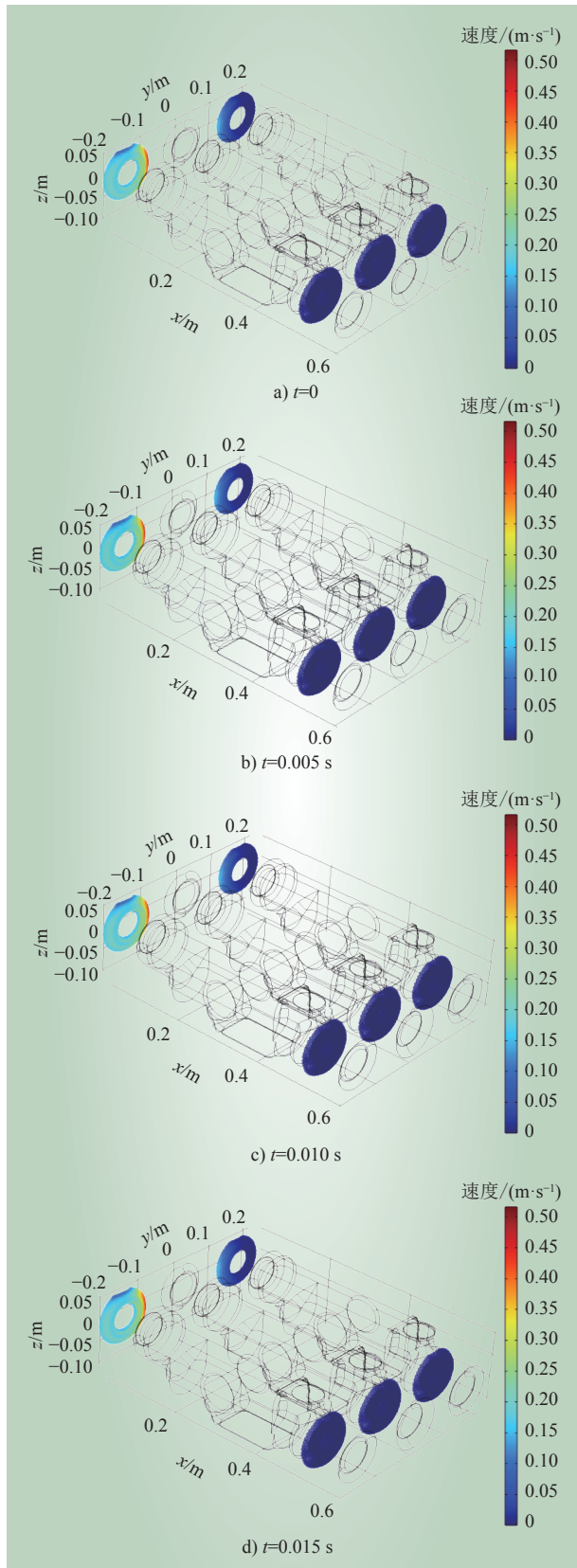
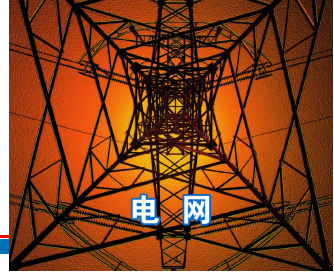


图 7 交流耐压试验中一个周期内粒子轨迹  
Fig. 7 Particle trajectories within a cycle in voltage-withstand test

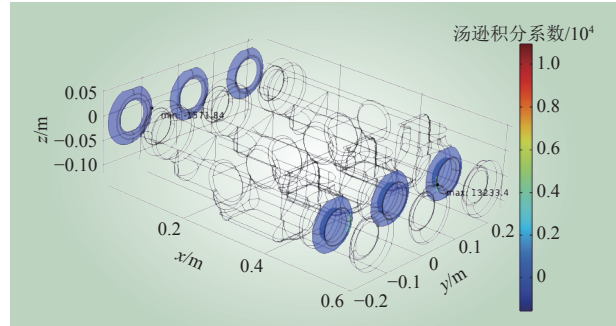


图 8 扩建侧断口恰好击穿时触头表面汤逊积分系数  
Fig. 8 Thomson integral coefficient of the contact surface when expansion-side fracture happens to break through

子，并在 0~0.01 s 内电子逐渐向阳极移动， $t = 0.01$  s 时电子位移达到最大，部分电子到达阳极表面。随后，空间中的其他电子反向移动，如图 9 d) 所示。在正半周期内，动触头导体产生的电子崩在隔离开关内部电场的作用下能够到达阳极表面，使汤逊积分系数计算结果大于击穿判据，断口击穿。而运行侧静触头导体表面产生的电子崩几乎不移动，动触头产生的电子崩也不会漂移到运行侧断口处，说明扩建侧断口击穿不会影响运行侧断口的绝缘性能。

### 3.3 试验中导体存在尖刺的击穿情况

在现场耐压试验中，实际不会产生如此高的电压，扩建设备击穿主要是由于施工过程导致设备产生毛刺、凸起等缺陷，或将导体遗漏在设备中，改变了设备原有的电场分布，从而导致设备击穿。为模拟设备实际击穿情况，在扩建侧中间相静触头导体表面增加一根高为 6.25 cm，底面宽度为 1 mm 的长方体导体，与静触头相连，该导体与中间相动触头之间的间隙约 2 mm。该做法的目的是使设备能够在交流耐压试验所施加的电压  $230\sqrt{2}$  kV 下击穿，从而研究该交流耐压试验中扩建侧断口击穿对运行侧断口的影响。

图 10 展示了此条件下各导体表面的汤逊积分系数在  $t = 0.01$  s 时的计算结果。动触头导体表面汤逊积分系数最大可达 24，超过了击穿判据，表明扩建侧断口在该情况下会被击穿。而运行侧静触头导体表面汤逊积分系数仍不大于击穿判据，表明运行侧断口不会发生击穿。

图 11 展示了此种情况下电子崩在空间中的移动过程。在该条件下，尽管动触头导体发射的电

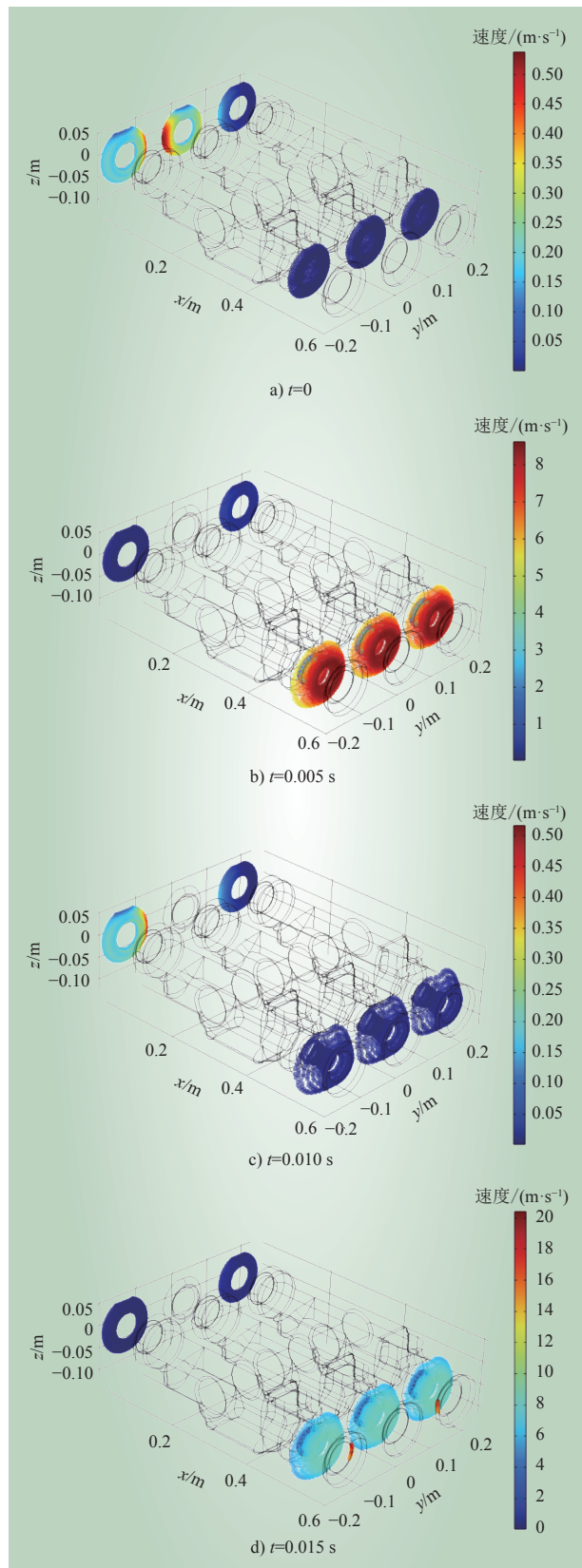


图 9 击穿电压条件下一个周期内粒子轨迹  
Fig. 9 Particle trajectories within a cycle under breakdown voltage

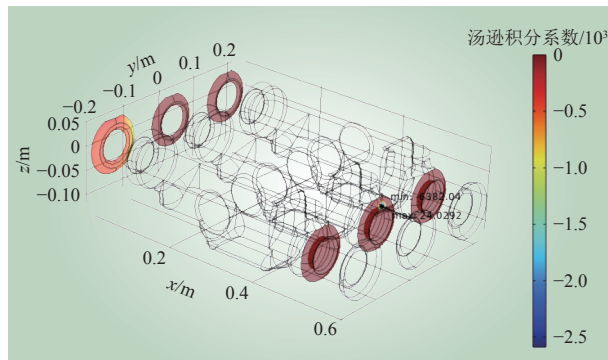


图 10 导体含尖刺击穿时触头表面汤逊积分系数  
Fig. 10 Thomson integral coefficient of contact surface when breakdown with spikes

子崩在正半周期内的正向位移不大，但足够到达扩建侧静触头表面尖刺处，从而形成击穿路径。运行侧静触头处的电子崩仍几乎无位移，动触头产生的电子崩也不会对运行侧断口造成影响。

### 3.4 扩建侧击穿对运行侧的影响

在 3.2 节和 3.3 节中的 2 种情况下，扩建侧断口发生击穿时，运行侧导体表面的汤逊积分系数计算结果均不大于击穿判据，表明运行侧断口在试验侧断口被击穿的情况下不会同时被击穿，且动触头导体发射的电子崩在隔离开关内部空间电场的作用下也不会向运行侧断口扩散，因而不影响运行侧断口的绝缘性能。该结果验证了共气室结构的双断口隔离开关在不停电试验和不停电扩建时的安全性和可靠性，能够为 DDS 不停电试验和扩建提供理论支撑。

动触头导体表面汤逊积分系数计算结果可以反映击穿发生的情况。由图 8 和图 10 可知，动触头导体表面汤逊积分系数大于击穿判据的区域主要集中在最靠近扩建侧静触头的边缘凸起部分，反映了此处发生击穿的可能性最大，应引起关注。

## 4 结论

110 kV GIS 双断口隔离开关在不停电耐压试验过程中存在因试验侧断口击穿而影响运行侧断口绝缘性能的风险。为研究扩建侧断口击穿时对运行侧断口的影响，本文采用有限元方法对双断口隔离开关在工频耐压试验条件下的电场分布进行研究，计算得到该工况下双断口隔离开关的内部电场分布，结果表明三相共箱型双断口隔离开



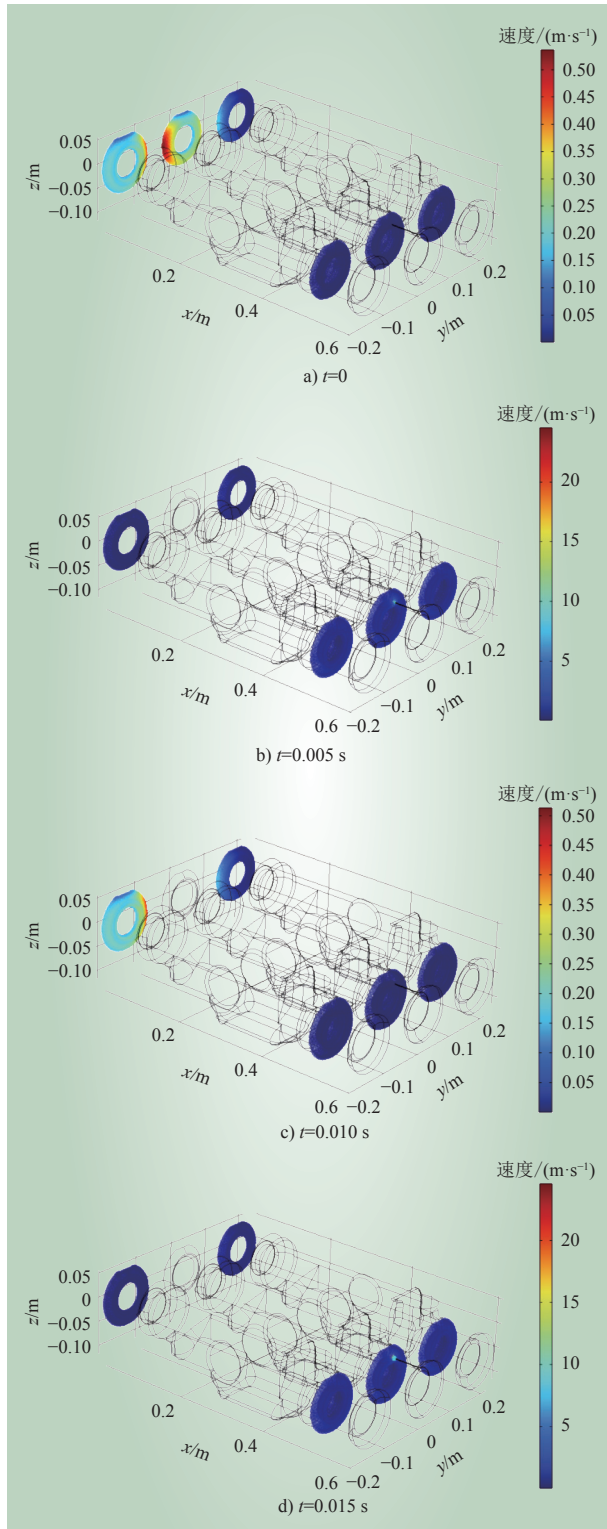
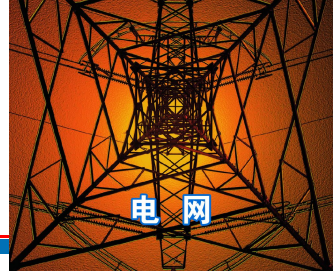


图 11 导体含尖刺击穿时一个周期内粒子轨迹  
Fig. 11 Particle trajectories within a cycle when conductor breakdown with spikes

关导体表面的最大场强出现在扩建侧静触头靠近动触头的表面处。

根据电场分布结果，计算触头表面的汤逊积分系数，判断各个断口的击穿情况。结果显示，在工频耐压试验的情况下，扩建侧和运行侧断口均不会发生击穿。在电压增加到一定值和触头导体存在长尖刺，使扩建侧断口恰好击穿时，运行侧断口也不会发生击穿，扩建侧断口击穿不影响运行侧断口的绝缘性能。

本文验证了共气室结构双断口隔离开关类设备不停电试验和扩建的安全性和可靠性，相关结果可以为该类设备的设计、制造和试验等提供一定的理论指导，并为该类型设备的现场应用提供一定的理论参考。

#### 参考文献：

- [1] KHAN Q, REFAAT S S, ABU-RUB H, *et al.* Partial discharge detection and diagnosis in gas insulated switchgear: state of the art[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2019, 35(4): 16–33.
- [2] 杨拯, 温才权, 刘炜, 等. 500 kV GIS 变电站隔离开关操作对二次电缆的影响 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(6): 147–155.  
YANG Zheng, WEN Caiquan, LIU Wei, *et al.* Influence of 500 kV GIS substation disconnect switch operation on secondary cables[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(6): 147–155.
- [3] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于振动原理的 GIS 母线导体杆松动故障分析与诊断 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 12–20.  
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, *et al.* Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 12–20.
- [4] 成林, 高坤, 闫山, 等. VFTO 对 GIS 中电子式互感器的电磁干扰研究 [J]. *智慧电力*, 2021, 49(12): 37–44.  
CHENG Lin, GAO Kun, YIN Shan, *et al.* Study on electromagnetic interference of VFTO to electronic transformer in GIS[J]. *Smart Power*, 2021, 49(12): 37–44.
- [5] 袁文海, 刘彪, 徐浩, 等. 基于复合神经网络的 GIS 局放故障类型识别 [J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(4): 157–164.  
YUAN Wenhai, LIU Biao, XU Hao, *et al.* Partial discharge fault type identification of GIS based on composite neural network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(4): 157–164.
- [6] 郑一博, 徐党国, 秦逸帆, 等. 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*, 2020, 53(2): 43–48.  
ZHENG Yibo, XU Dangguo, QIN Yifan, *et al.* Distribution of





- electric field in three-station disconnecting switch in same frequency and phase AC withstand voltage test of 110 kV GIS[J]. *Electric Power*, 2020, 53(2): 43–48.
- [7] 秦逸帆, 牛铮, 孙云生, 等. 110 kV 三相共筒式 GIS 同频同相交流耐压试验中隔离开关断口击穿特性仿真分析[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 117–124.
- QIN Yifan, NIU Zheng, SUN Yunsheng, *et al.* Simulation analysis of breakdown characteristics in isolation switch fracture in same frequency and phase AC withstand voltage test of 110 kV three-phase cylindrical GIS[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 117–124.
- [8] 薛红涛, 王伟伟, 康雪晶. 浅谈 GIS 设备后期扩建[J]. *高压电器*, 2012, 48(5): 115–120.
- XUE Hongtao, WANG Weiwei, KANG Xuejing. Discussion on later expansion of GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2012, 48(5): 115–120.
- [9] 程子豪, 吴丹, 曾凡兴, 等. 基于 220 kV GIS 间隔双断口母线隔离开关技术的试验方法研究[J]. *湖南电力*, 2020, 40(5): 15–18, 24.
- CHENG Zihao, WU Dan, ZENG Fanxing, *et al.* Research on test method based on 220 kV GIS interval double-fracture disconnector isolating switch technology[J]. *Hunan Electric Power*, 2020, 40(5): 15–18, 24.
- [10] 宋昭. 基于双断口母线隔离开关的 GIS 设备不停电扩建技术分析[J]. *中国设备工程*, 2018(19): 146–147.
- SONG Zhao. Technical analysis of GIS equipment expansion without power failure based on double-break bus disconnector[J]. *China Plant Engineering*, 2018(19): 146–147.
- [11] 杨为, 朱太云, 赵恒阳, 等. GIS 隔离开关气室电场模拟与绝缘故障分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(8): 205–210.
- YANG Wei, ZHU Taiyun, ZHAO Hengyang, *et al.* Electric field simulation and insulation failure analysis of GIS disconnector gas chamber[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(8): 205–210.
- [12] 李文慧, 杨鼎革, 韩彦华, 等. GIS 同频同相耐压试验中母线隔离开关断口击穿过程仿真计算[J]. *高压电器*, 2021, 57(5): 101–107.
- LI Wenhui, YANG Dingge, HAN Yanhua, *et al.* Simulation calculation on breakdown process of open contacts of bus disconnector during withstand voltage test of GIS with same frequency and phase-angle[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(5): 101–107.
- [13] 杨明昆. 基于 ANSYS 模型分析 GIS 隔离开关内部电场变化[J]. *云南电力技术*, 2016, 44(3): 114–116.
- YANG Mingkun. Analysis of internal electric field variation of GIS isolation switch based on ANSYS model[J]. *Yunnan Electric Power*, 2016, 44(3): 114–116.
- [14] 邱云鹏, 万帅, 曹伟, 等. 110 kV 三相共罐 GIS 避雷器相间电磁耦合对电位及电场分布的影响[J]. *电瓷避雷器*, 2022(5): 48–52.
- QIU Yunpeng, WAN Shuai, CAO Wei, *et al.* Potential distribution and electric field distribution of the phase-to-phase electromagnetic coupling of 110 kV three-phase common tank GIS lightning arrester[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(5): 48–52.
- [15] 张长虹, 庞准, 黎卫国, 等. 基于双隔离断口的 GIS 不停电扩建功能模块的研发及应用[J]. *高压电器*, 2019, 55(8): 72–80.
- ZHANG Changhong, PANG Zhun, LI Weigu, *et al.* Development and application of GIS with extension function module of uninterrupted power based on double isolating distance[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(8): 72–80.
- [16] 黎卫国, 张长虹, 杨旭, 等. 双隔离断口 GIS 功能模块仿真计算及试验验证[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 30–38.
- LI Weigu, ZHANG Changhong, YANG Xu, *et al.* Simulation calculation and test verification of GIS functional module with double-break disconnector[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 30–38.
- [17] 李忠富, 王大伟, 孙鹏, 等. 基于 ANSYS 的 GIS 不停电扩建及检修隔离断口设计[J]. *电工技术*, 2021(3): 94–97.
- LI Zhongfu, WANG Dawei, SUN Peng, *et al.* Design of GIS expansion without power cut and maintenance isolation break based on ANSYS[J]. *Electric Engineering*, 2021(3): 94–97.
- [18] LI W G, YANG X, ZHANG C H, *et al.* Simulation and test of double-fracture disconnect switch in GIS[C]// 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing, China. IEEE, 2020: 2017–2023.
- [19] 房子祎, 郝金鹏, 伍弘, 等. 220 kV 复合绝缘子均压环类型及结构对其电场分布的影响[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(1): 51–61.
- FANG Ziyi, HAO Jinpeng, WU Hong, *et al.* Influence of grading ring type and structure on electric field distribution of 220 kV composite insulator[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(1): 51–61.
- [20] 王思华, 王军军, 赵磊, 等. 污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 149–157.
- WANG Sihua, WANG Junjun, ZHAO Lei, *et al.* Influence of pollution components on surface electric field of composite insulators[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 149–157.
- [21] 张天翔, 梁志坚, 朱瑞. 光伏电站用氧化锌避雷器多物理场耦合分析[J]. *中国电力*, 2022, 55(9): 79–87.
- ZHANG Tianyi, LIANG Zhijian, ZHU Rui. Multi-physical field coupling analysis of zinc oxide arrester for photovoltaic substation[J]. *Electric Power*, 2022, 55(9): 79–87.



[22] 许启友, 刘风勇, 谭东现. 应用低温非平衡等离子体进行绝缘分析方法 [J]. *高压电器*, 2020, 56(11): 8–15.

XU Qiyou, LIU Fengyong, TAN Dongxian. Insulation analysis method by using non-equilibrium plasma at low temperature[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(11): 8–15.

[23] 武占成, 张希军, 胡有志. 气体放电 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

[24] 关根志. 高电压工程基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[25] 张连星, 赵坤, 江翼, 等. 低温条件下 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub> 气体放电特性研究 [C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会论

文集, 2015: 1–7.

#### 作者简介:

董子凡 (1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事高压电气设备与数字孪生研究, E-mail: zifan\_dong@qq.com;

任劭帅 (1989—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事高压电气设备与数字孪生研究, E-mail: 591667076@qq.com。

(责任编辑 于静茹)

## Research on Electric Field Distribution and Breakdown Characteristics of GIS Double-fracture Disconnect Switch under Non-outage Experiment

DONG Zifan<sup>1</sup>, REN Jieshuai<sup>1</sup>, YIN Jiangan<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, WEN Yaqin<sup>1</sup>, LI Jinbin<sup>1</sup>

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Due to the breakdown of the test-side fracture during the non-outage voltage-withstand test, the double-fracture disconnect switch (DDS) with a common chamber structure has been exposed to the risk of affecting the insulation performance of the operating-side fracture. Therefore, it is necessary to study the electric field distribution and breakdown characteristics of the DDS during the design phase. In this paper, the newly developed 110 kV three-phase common box type GIS DDS was taken as an example. The finite element method was employed to simulate the electric field, as well as to obtain the internal electric field strength distribution during non-outage voltage-withstand test at the actual site. Based on the electric field calculation results and the breakdown criteria deduced by Thomson discharge theory, the breakdown characteristics of the two fractures were studied during non-outage voltage-withstand test. It was proven that the breakdown of the test-side fracture would not affect the insulation performance of the operating-side in the non-outage voltage-withstand testing process of the DDS. The results provide theoretical support for non-outage expansion and on-site insulation test during the second-phase expansion, and also provide a more detailed theoretical basis for insulation verification in the future development of the next-generation DDS equipment.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.500-202222119A-1-1-ZN).

**Keywords:** double-fracture disconnect switch; non-outage expansion; finite element simulation; thomson discharge theory; breakdown characteristic