



## 一起现场TEV引起的法兰故障

闫琪, 张延泽, 陈小月, 王羽

引用本文:

闫琪, 张延泽, 陈小月, 王羽. 一起现场TEV引起的法兰故障[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 83-91.

YAN Qi,ZHANG Yanze,CHEN Xiaoyue,WANG Yu. A Flange Failure Caused by Field TEV[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(增刊1): 83-91.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 某核电站新增联络变VFTO计算与分析

VFTO Calculation and Analysis of the New Interconnecting Transformer in a Nuclear Power Station

南方能源建设. 2016, 3(z1): 55-60 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.013>

#### 高土壤电阻率地区多回路变电站接地设计研究

Research on the Earth Grid Design of the Substation with Multi Circuit Transmission Line in High Soil Resistivity Area

南方能源建设. 2016, 3(4): 54-59 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.011>

#### 光伏电源接入500 kV变电站站用电对保护的影响分析

Influence Analysis on Power Relay Protection of PV Generation Connected to 500 kV Substation Station Power

南方能源建设. 2018, 5(1): 98-102 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.01.016>

#### 交流串入直流电源系统正极或负极对继电器的动作影响分析

Analysis on Relay Action Caused by AC-DC Interference to Positive or Negative Pole of DC System

南方能源建设. 2017, 4(1): 71-74,70 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.013>

#### 避雷器安装方案对线路防雷性能的影响研究

Influence of Arrester Installation Scheme on Line Lightning Protection Performance

南方能源建设. 2017, 4(1): 75-80,101 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.014>

# 一起现场TEV引起的法兰故障

闫琪<sup>1,✉</sup>, 张延泽<sup>2</sup>, 陈小月<sup>2</sup>, 王羽<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;  
2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** [目的] 外壳暂态地电位升高 (TEV) 会对工作人员的人身安全、二次设备的正常工作产生威胁, 并有可能引起 GIS 外壳法兰间的放电。为了对某 500 kV 变电站在操作隔离开关时 GIS 外壳法兰间出现的火花放电故障进行分析, 提出了一种基于传输线理论的 TEV 仿真计算模型, 并讨论了 TEV 引起法兰间放电的抑制措施。[方法] 为了更精确地对 TEV 进行模拟, 采用 Cassie-Mayr 理论构建了改进动态电弧模型, 并将 VFTO 产生电路与 TEV 计算电路相结合, 将操作隔离开关所产生的 VFTO 直接加至 GIS 外壳电位计算模型中。[结果] 仿真结果表明, 在最严重的情况下, 法兰间的最大电压差超过了法兰间绝缘隔板的沿面闪络电压, 足以引起法兰间放电。减少隔离开关孤岛侧的剩余电荷、降低接地线电感都可以不同程度地降低 TEV 的幅值, 但不能完全抑制法兰间电位差。而使用短接片进行跨接可以有效地抑制法兰间的电压差, 避免由此产生的放电现象, 但需要对短接片的选型进行校验, 并取消原有的三相短接排以免产生环流。[结论] 经现场工程改造验证, 文中所得结论正确有效, 对预防此类放电现象具有较大的参考意义。

**关键词:** 暂态地电位升高; 火花放电; 改进动态电弧模型; 短接片跨接; 放电抑制措施

中图分类号: TM7; TM866

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0083-09

开放科学(资源服务)二维码:



## A Flange Failure Caused by Field TEV

YAN Qi<sup>1,✉</sup>, ZHANG Yanze<sup>2</sup>, CHEN Xiaoyue<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;  
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** [Introduction] The transient enclosure voltage (TEV) will threaten the personal safety of the staff and the normal operation of the secondary equipment, and may cause the discharge between the flanges of the GIS enclosure. In order to analyze the spark discharge fault between the flanges of the GIS enclosure when operating the disconnecting switch in a 500 kV substation, a TEV simulation calculation model based on the transmission line theory was proposed, and the suppression measures of the discharge between the flanges caused by TEV were discussed. [Method] In order to simulate the TEV more accurately, an improved dynamic arc model was constructed using the Cassie-Mayr theory, and the VFTO generation circuit was combined with the TEV calculation circuit, and the VFTO generated by disconnecting switch operation was directly added to the GIS enclosure potential calculation model. [Result] The simulation results show that, in the worst case, the maximum voltage difference between flanges exceeds the surface flashover voltage of insulating barriers between flanges, which is enough to cause discharge between flanges. Reducing the residual charge on the island side of the disconnecting switch and reducing the inductance of the grounding wire can reduce the amplitude of TEV to varying degrees, but cannot completely suppress the potential difference between the flanges. The use of shorting connectors for bridging can effectively suppress the voltage difference between the flanges and avoid the resulting discharge phenomenon, but it is necessary to verify the selection of the shorting pieces and cancel the original three-phase shorting row to avoid circulation. [Conclusion] Verified by on-site engineering transformation, the conclusions obtained in this paper are correct and effective, and have great reference significance for preventing such discharge phenomena.

**Key words:** transient enclosure voltage; spark discharge; improved dynamic arc model; shorting connector bonding; discharge suppression measures

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

根据国际大电网会议 (CIGRE) 的统计, 暂态地电位升高的事故在世界各地的变电站中时有发生<sup>[1]</sup>。南阳特高压变电站 1 MV HGIS 调试中曾出现过 TEV 引起的隔离开关接地刀闸处的放电现象<sup>[2]</sup>。2017年3月, 国内某 500 kV GIS 变电站操作隔离开关时, 在联络变压器出口套管处的法兰间出现了火花放电的现象。根据现场情况初步分析, 放电点上、下两法兰的接地点不同, 放电原因可能是由操作隔离开关时在 GIS 外壳上产生的 TEV 在法兰间形成较大电位差而引起的。

国内外有关隔离开关操作产生 TEV 的研究早已在 20 世纪下半叶展开, 其中, G.L.Ford<sup>[3-5]</sup> 等人在多导体传输线理论的基础上, 提出将 GIS 系统分为母线-外壳、外壳-大地、架空线-大地三条传输线, 并对 GIS 中瞬态地电位升进行仿真计算, 取得了较好的效果, 这种建模方法也被大家公认并采用。王娜和林莘<sup>[6-8]</sup> 等人考虑了 GIS 三相外壳间的耦合, 建立了 VFTO 与 TEV 联合计算模型, 模型中采用纯感导体等效接地网和接地支柱, 研究了 TEV 的影响因素和预防措施, 但是没有考虑高频效应。胡榕<sup>[2]</sup> 结合了黑箱理论和传统等效电路模型, 建立了适用频率范围为 DC~100 MHz 的 1 MV 特高压交流 GIS 各设备的宽频等效电路模型, 并通过将时域有限差分法与传输线理论进行结合, 构建了 VFTO 与 TEV 的联合仿真模型。德国的 K. Feser 等人<sup>[9]</sup> 设计了一种球形电场传感器并对 GIS 外壳上的 TEV 进行了测量, 其高频截止频率约为 11.7 MHz, 这种方法较为简单, 但是需要进行现场标定且受环境影响较大。丹麦学者<sup>[10]</sup> 基于 Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> 晶体的泡克尔斯效应设计了一种光电传感器, 与电容分压器原理不同, 它通过直接测量两个电极之间形成的空间电场反演得到过电压波形, 但其容易受到其它带电导体耦合电场的影响, 容易引起被测电场畸变。胡榕<sup>[11-13]</sup> 等利用电阻性阻抗分压的方法研制了 TEV 测量装置, 并对特高压 GIS 试验平台 TEV 进行多次测量, 研究了不同隔离开关操作速度、残余电荷、分支母线长度等对 TEV 的影响。学者 Nohnhiro Shimoda<sup>[14-15]</sup> 等通过对 1 MV (UHV) 的 GIS 设备的

现场试验, 提出了绝缘法兰的等效计算模型, 在绝缘法兰的几个螺栓周围的绝缘垫圈上安装了一个环形 ZnO 元件, 验证了其抑制 VFTO 的性能。气体绝缘开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 因其安全可靠、占地面积小、检修工作量小等特点而被越来越多地应用于各个电压等级中<sup>[16-17]</sup>。然而 GIS 内隔离开关的操作会内部产生高频率、高幅值、高陡度的特快速瞬态过电压 (Very Fast Transient Overvoltage, VFTO), 对 GIS 内部设备及相邻高压设备 (如变压器等) 的绝缘安全产生威胁。另一方面, VFTO 的传播也会引起外壳暂态电位的升高 (Transient Enclosure Voltage, TEV)。随着电压等级的提高, TEV 所引起的绝缘问题也更加严重, 并且容易对工作人员造成人身伤害, 同时其产生的电磁辐射会对二次设备产生干扰, 引起误动、拒动甚至故障, 对于 TEV 的抑制问题越来越受到人们的关注。

电弧模型的建立对于 TEV 计算的准确程度具有决定性的作用。在以往的 VFTO 相关研究计算中, 对于操作隔离开关的动态过程常采用一些简化的模型如静态电阻模型、时变电阻模型等, 其具有一定的准确性, 但模型较为简单, 无法准确描述电弧发生过程, 导致结果出现偏差。鉴于此, 本文提出了一种考虑电弧发生过程中能量转换过程以及电弧电流影响的改进电弧模型, 并将 VFTO 计算模型与 TEV 计算模型相结合, 获得了复杂波形的多次脉冲所产生的 TEV。

本文以国内某 500 kV 变电站发生的法兰间放电现象为背景, 首先分析了 TEV 的产生和计算原理; 然后在考虑电弧发生过程中能量转换过程以及电弧电流影响后对隔离开关动态模型进行了改进, 并使用 ATP-EMTP 软件搭建了相应的 GIS 内部 VFTO 和外壳 TEV 等值计算模型; 为了得到实际情况下的 TEV 波形, 将 VFTO 计算模型与 TEV 的计算模型相结合, 研究了实际 VFTO 波形传播至变压器套管处发生折反射引起的 TEV 对法兰间放电的影响; 最后分析比较了不同放电抑制措施的抑制效果, 提出了最有效的抑制措施。本文的计算结果对于预防此类现象具有较大的参考意义。

### 1 GIS 壳体 TEV 计算原理

GIS 中操作隔离开关会在其两侧产生陡前沿的高频暂态电压波 (VFTO), 上升时间为 4~10 ns, 由于强烈的集肤效应, 其沿着一次母线以及 GIS 外壳内表层传输。当高频暂态波传播至外壳间断处会通过折反射反映到外壳外壁, 引起暂态电位升高 (TEV)。典型的间断部位为 GIS 与主变套管连接处以及架空线与出线套管连接处等。

虽然运行 GIS 外壳已接地, 但是由于 TEV 具有高频的特性, 其接地引下线和地网在高频暂态过程中不能按集中参数考虑, 因此不能有效地使得外壳保持在零电位。这种外壳电位含有多种频率成分, 且数值相当可观, 若不加以限制将会引起外壳和接地线以及绝缘法兰间的放电。由于 GIS 设备生产厂家通常与变压器厂家不同, 因此 GIS 与变压器侧 SF<sub>6</sub> 油套管的连接点可以看作是外壳的分段点, 在该处会发生 VFTO 的折反射。即使将 GIS 的三相外壳用铜排相连, 变压器三相外壳间也相连并接地, 使得外壳分段点处的工频感应电流为零, 但是 VFTO 会在阻抗不匹配处发生泄漏形成 TEV, 这会造成 GIS 和变压器相连的法兰间出现火花放电现象, 该处的波过程简化图如图 1 所示。当 VFTO 产生的电压波 U<sub>0</sub> 沿着 GIS 母线传播至法兰处时将发生暂态电磁过程, 一部分通过反射沿着 GIS 母线返回, 另一部分则是通过折射进入变压器套管以及 GIS 外壳中。假设高压母线与壳体内壁间的波阻抗为 Z<sub>1</sub>, 套管波阻抗为 Z<sub>2</sub>, GIS 外壳与大地间的波阻抗为 Z<sub>3</sub>, 通过彼得逊法则可以粗略计算出 GIS 外壳上的电压 U<sub>2</sub> 为:

$$U_2 = -2U_0 \frac{Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (1)$$

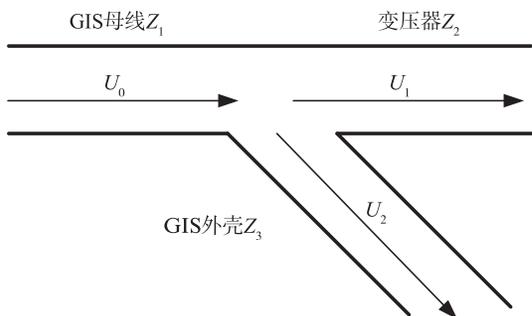


图 1 波过程的简化模型

Fig. 1 Simplified model of wave impedance

根据传输线理论可以搭建出 GIS 外壳电位的仿真计算模型如图 2 所示。传播至外壳不连续处且幅值为 1.0 p.u. 的 VFTO 行波用图中电源 E<sub>0</sub> 和 R<sub>0</sub> 表示; R<sub>1</sub> 为变压器套管与大地间的波阻抗; 法兰两侧的接地线用电感 L 等效。高频下绝缘法兰的暂态模型则用 3、4 两节点间的电容和电阻网络进行等效。

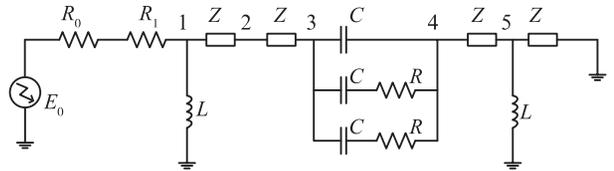


图 2 GIS 外壳电位计算电路模型

Fig. 2 GIS enclosure potential calculation circuit model

但是由于这种模型只能模拟单个脉冲下产生的 TEV, 且幅值和波形均与实际情况有所偏差。为了更准确地计算实际情况下的 TEV, 本文将 VFTO 产生电路与 TEV 计算电路相结合, 直接将操作隔离开关所产生的 VFTO 加至 GIS 外壳电位计算模型中, 即代替图 2 中的 E<sub>0</sub> 和 R<sub>0</sub>。

### 2 TEV 的计算模型搭建

GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 主频可以达到数十万赫兹至数十兆赫兹, 因此在对 GIS 各设备进行建模时, 应使各设备的等效模型可以反映出该设备在 VFTO 主频段下的响应特性, 因此有必要建立高频下的 GIS 设备等效模型。此外, GIS 结构复杂, 各设备种类繁多, 因此各设备的建模误差会存在累积效应, 使得 GIS 整体仿真时的暂态过电压计算结果与实际值比较产生较大偏差。因此对于模型中各设备高频下的准确等效极为重要。

#### 1) GIS 的母线模型

GIS 母线通常用无损均匀传输线模型进行模拟。气体绝缘变电站中同轴母线导体、外壳或电缆内导体与屏蔽体的波阻抗计算式如式 (2) 所示:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

式中:

R<sub>1</sub>——GIS 外壳的内半径 (m);

R<sub>2</sub>——内导体外半径 (m)。

外壳对地波阻抗计算式如式 (3) 所示:

$$Z_2 = 60 \ln \frac{2h}{R_3} \quad (3)$$

式中:

$R_3$ ——GIS外壳的外半径 (m);

$H$ ——GIS外壳的高度 (m)。

## 2) 电弧模型

电弧从物理的角度可认为是一个耗能元件,在数学上常用电阻函数进行描述。目前常用黑盒模型和数学-物理模型进行描述。传统的电弧模型虽然简单易用,但是考虑因素较少,在计算精度上略有欠缺。Cassie和Mayr电弧理论都将间隙弧柱当作一个圆柱形气体介质通道,其中,Cassie理论认为温度在圆柱通道横截面上均匀分布,但电弧通道直径会随电弧电流变化而改变;Mayr理论则认为电弧通道直径恒定,但电弧温度分布不均匀。实际中电弧能量耗散形式是上述两种方式共同作用的,因此本文在已有分段电弧模型的基础上,采用Cassie-Mayr理论对其进行改进,将电弧散热功率以及电弧电流对弧阻的影响纳入考虑。改进后的电弧模型可以更为准确地模拟电弧发生期间的整个动态过程。电弧的发生过程主要包括三个阶段,即电弧的预击穿阶段、燃弧阶段和熄弧阶段。对于改进动态电弧模型的预击穿阶段,在考虑击穿延时 $t_8$ 的情况下,可以用双曲函数表示该阶段的弧阻:

$$R_a = r_0 + 2Z_1 \left( \frac{t_8}{t} - 1 \right), 0 < t < t_8 \quad (4)$$

式中:

$r_0$ ——弧道静态电阻,取0.5~2  $\Omega$ ;

$Z_1$ ——GIS母线波阻抗 ( $\Omega$ );

$t_8$ ——断口击穿时间 (s)。

击穿前弧道电阻为无穷大,击穿后电阻降为静态电阻 $r_0$ 。

在熄弧阶段,结合Cassie和Mayr电弧理论,可得到对于电弧熄弧动态过程的描述函数:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)} \left( \frac{i^2}{P(g)} - g \right) \quad (5)$$

式中:

$G$  ——电弧电导;

$I$  ——电弧电流;

$P(g)$  ——电弧散热功率;

$\tau(g)$  ——电弧时间常数。

可以看出, $P(g)$ 和 $\tau(g)$ 在熄弧过程中起决定性作用,它们被定义为电导的幂函数:

$$\begin{aligned} \tau(g) &= \tau_0 g^\alpha \\ P(g) &= P_0 g^\beta \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$\tau_0$ 、 $P_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 均为常数,其值大小与温度、断路器类型以及设计等因素有关。

在极短的时间内, $P(g)$ 及 $\tau(g)$ 可被视为常数进行计算,通过欧拉法可求得一阶微分方程如下:

$$g(t + \Delta t) = g(t) + \left( \frac{i^2}{P(g)} - g(t) \right) \left[ 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau(g)}} \right] \quad (7)$$

利用ATP-EMTP软件自带的MODELS模块,将上述动态电弧理论代入改进欧拉法公式当中,并利用Fortran语言进行编程,实现电弧动态过程中燃弧与熄弧阶段的控制,由此得到隔离开关电弧重燃模型的特性曲线如图3所示。

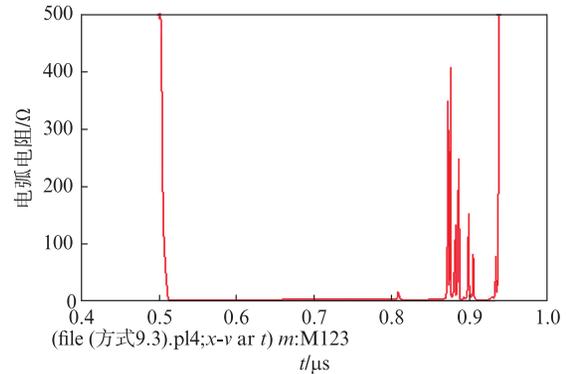


图3 改进动态电弧模型电阻变化曲线

Fig. 3 Improved dynamic arc model resistance change curve

相比于传统的分段电阻模型,该模型特性曲线最主要的区别在于其在熄弧阶段的弧道电阻是振荡上升的,这是由于在Cassie-Mayr电弧定理的基础上,考虑了熄弧过程中能量转换以及电弧电流的影响,而这些因素往往是不稳定的,因此将导致弧道电阻是呈振荡性质上升的。

## 3) 断路器、隔离开关模型

断路器和隔离开关处于闭合状态时可以用传输线进行等效。当开关断开时,则可用断口间电容与断口对地电容进行表示。对于双断口断路器而言,还应考虑两断口间均压电容的影响。

## 4) 变压器的模型

变压器的等效模型中,一般考虑其入口电容和等值电感。其中,变压器绕组电感应并联在等效电路中,连接线电感应串联在电路中。

变压器的入口等值电容 $C_i$ 与它的电压等级、容

量和结构有关。一般情况下, 电压等级越高、变压器的额定功率越大, 其入口的等值电容也会相对较大。变压器入口等值电容的经验公式如式 (8):

$$C_i = K \sqrt[n]{S} \quad (8)$$

式中:

$C_i$ ——变压器入口等值电容 (pF);

$S$ ——变压器的三相容量 (MVA);

$K$ 和 $n$ 为常数, 对于500 kV电压等级系统,  $n$ 取4,  $K$ 取940。

### 5) 其它元件的模型

电压互感器、接地开关、避雷器和套管等元件都可用对地电容进行表示, 其中, 考虑到套管的几何尺寸通常较长, 因此可以用传输线和对地电容的组合电路来表示。由于整个系统近似为三相对称, 可用单相电路进行模拟。根据合作单位提供的资料, 本文所研究的GIS电站设备参数以及等效模型分别如表1、表2所示。

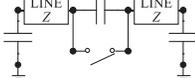
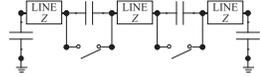
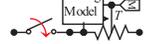
表1 变电站内设备等值参数

Tab. 1 Equivalent parameters of equipment in substation

设备名称	设备代号	等值计算参数/ $\mu$
变压器	TR3	对地电容1 500 pF
断路器	CB	断口电容520 pF/对地电容28.5 pF
隔离开关	DS	断口电容20 pF, 断口对地电容70 pF
套管	BS	150 pF
电压互感器	VT	50 pF
避雷器	MOA	43 pF(PSA444F)
接地开关	ES	45 pF

表2 变电站内设备等效模型

Tab. 2 Equivalent parameters of equipment in substation

设备	等效ATP模型
GIS 母线	
隔离开关	
断路器	
变压器	
电压互感器	
电弧模型	

## 3 TEV的计算结果及分析

根据现场实际布置, 结合上述元件模型建立了TEV整体计算模型, 对国内某500 kV变电站操作隔离开关时在GIS外壳上产生的TEV幅值进行了复现。在模型的基础上, 通过改变参数的取值计算并分析了TEV的不同影响因素。

### 3.1 TEV的计算结果

为了提高准确性, 计算中考虑了母线剩余电荷的影响, 根据合作单位提供的资料, 操作隔离开关前孤岛侧母线上的电压约为10 kV, 同时为了偏严格考虑, 合闸瞬间电源侧的电压幅值取为相电压峰值。图4为该情况下GIS与变压器交界面处的TEV。

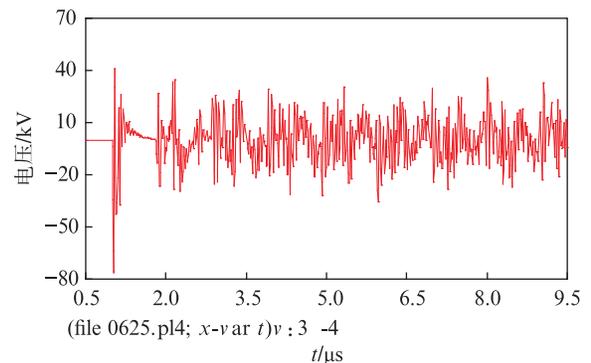


图4 GIS与变压器交界面处的TEV

Fig. 4 TEV at the interface of GIS and transformer

由计算结果可知, 在最严重的情况下操作隔离开关, 法兰间的最大电压差可以达到75 kV, 超过了该电站法兰间绝缘隔板的沿面闪络电压 (约20 kV), 足以引起法兰间放电。

### 3.2 TEV的影响因素分析

#### 1) 剩余电荷对TEV的影响

在实际运行中, 隔离开关孤岛侧剩余电荷容易通过电磁式电压互感器等设备泄放掉, 因此在合闸瞬间孤岛部分的电压往往达不到1.0 p.u. (约为408 kV)。为了研究孤岛侧剩余电压对TEV的影响, 表3给出了不同剩余电荷情况下TEV的幅值, 其变化如图5所示。

表3 剩余电荷对TEV的影响

Tab. 3 Effect of residual charge on TEV

剩余电荷/(p. u.)	$U_3$ /(p. u.)	$U_4$ /(p. u.)	$U_{3-4}$ /(p. u.)
0	0.14	0.11	0.09
0.3	0.19	0.15	0.12
0.6	0.23	0.18	0.14
1	0.28	0.23	0.18

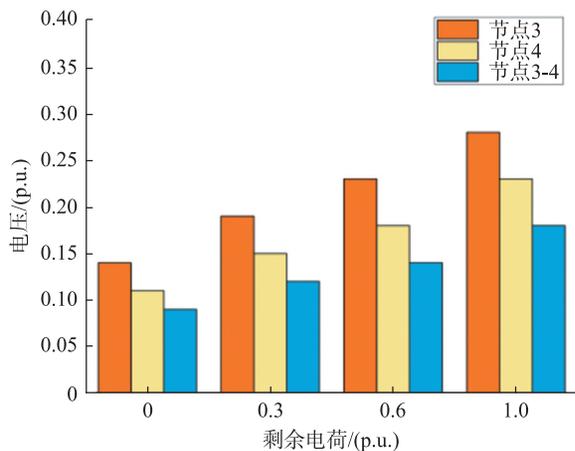


图5 TEV与剩余电荷的关系

Fig. 5 Relationship between TEV and residual charge

从结果可见, 隔离开关孤岛侧剩余电荷对于TEV具有较大的影响。当孤岛侧的剩余电荷增加时, 法兰两侧外壳的对地电压以及法兰间的电压差都呈现上升的趋势。当孤岛侧剩余电荷为0时, 法兰之间的电压差仍有约40 kV, 进而导致法兰间的放电。

#### 2) 接地线长度对TEV的影响

由于TEV频率较高, 接地线的电感效应不可忽略。TEV在沿着GIS外壳表面传播时将在外壳的接地点发生折反射, 对波形产生影响。而接地线的长度直接影响了其电感, 并对TEV将产生较大的影响, 为此计算了节点1处接地线不同长度下法兰处的TEV幅值, 结果如表4和图6所示。

表4 接地线长度对TEV的影响

Tab. 4 The effect of grounding wire length on TEV

长度/m	$U_3/(p. u.)$	$U_4/(p. u.)$	$U_{3-4}/(p. u.)$
5	0.25	0.12	0.18
2	0.20	0.12	0.13
1	0.14	0.11	0.09

由计算结果可知, 降低接地线电感可以有效地抑制TEV, 且离接地线越近的位置抑制效果越明显。分析原因在于TEV传播至接地点处将出现折反射, 由于接地线的波阻抗与GIS外壳对地波阻抗并联, 即减小了该点的对地波阻抗, 因此可以降低折反射波电压。

因此在实际应用中可以通过在TEV严重的位置加装GIS外壳接地线进行针对性的抑制, 增加接地点的个数可以抑制GIS整体的TEV。但是根据计算结果, 对于本次研究的电站, 即使降低了接地线的

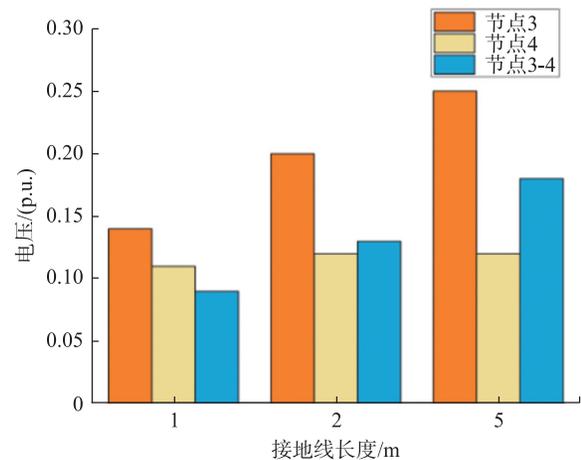


图6 TEV与接地线长度的关系

Fig. 6 Relationship between TEV and the length of grounding wire

电感, 此时法兰间的最大电压差约为38 kV, 大于绝缘隔板的沿面闪络电压, 仍有可能引起放电。

## 4 放电现象的抑制措施

由前文计算可知, 单纯采用减小剩余电荷或者减小接地线长度的方法并不能完全防止放电现象的发生。考虑到本次研究的电站共配制了两个绝缘间隔, 分别位于GIS侧法兰和变压器侧升高座法兰(放电点), GIS侧法兰两侧已并联了压敏电阻, 而变压器侧升高座法兰未经处理, 因此考虑在此处加装MOA和用短接片短接对放电现象进行抑制。

### 4.1 法兰间加装MOA

MOA具有良好的陡波响应特性, 可以用来抑制VFOTO引起的外壳暂态地电位升高。为了解决放电问题, 此处考虑在法兰间加装MOA来抑制绝缘法兰间的TEV, 其暂态计算模型如图7所示。

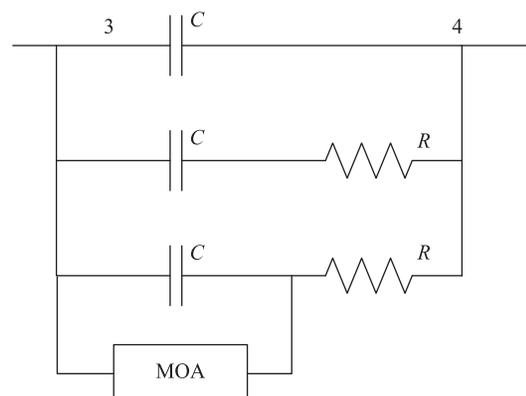


图7 法兰间加装MOA的暂态模型

Fig. 7 Transient model of installing MOA between flanges

考虑在剩余电荷为 10 kV 的情况下在法兰间跨接 MOA, 不同动作电压的 MOA 对 TEV 的抑制效果如表 5 所示。

表 5 跨接 MOA 对 TEV 的影响  
Tab. 5 Effect of bonding MOA on TEV

动作电压/kV	$U_3$ /kV	$U_4$ /kV	$U_{3-4}$ /kV
10	54.2	37.7	16.5
5	50.5	41.3	9.3
1.5	48.1	44.1	4.0

根据计算结果, 在法兰间加装 MOA 可以有效抑制外壳上的 TEV, 并能有效降低在法兰间的电位差, 使其幅值在绝缘隔板沿面放电电压之下, 且

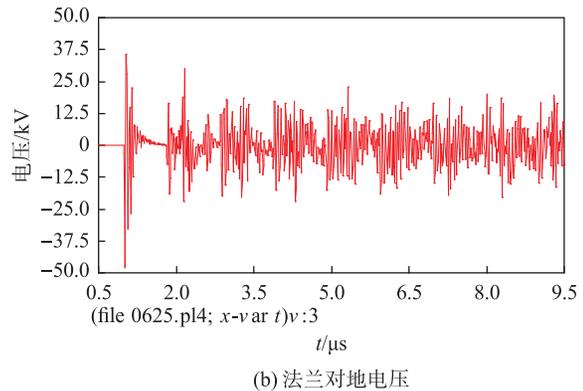
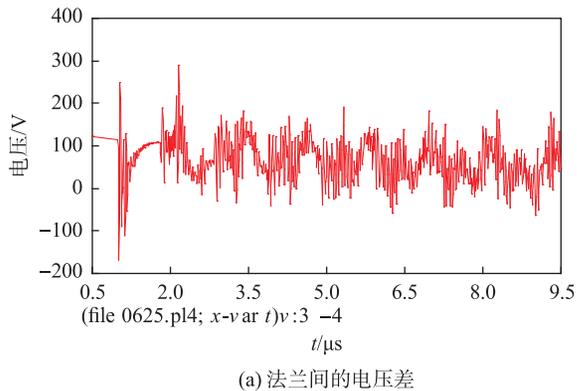


图 8 加装短接片的抑制效果

Fig. 8 Inhibition effect of adding shorting connector

由计算结果可知, 跨接铜排可以显著减小法兰间的电压差, 但是并不能减小法兰与地面之间的 TEV。由于本文中 GIS 电站放电现象主要由法兰间电位差引起, 法兰对地 TEV 并未引起放电, 因此这种方法对于本电站是最为经济有效的。同时, 应注意需对短接片的选型进行校验。本次研究选用 4 块尺寸为 60×6 (宽×厚, mm) 的铜排作为短接片, 分别对额定电流、载流量及热稳定截面进行校验, 具体过程如下:

#### 1) 额定电流校验

GIS 设备额定电流为 4 000 A, 根据经验设计公式计算, 壳体最大反向感应电流为 4 000 A×0.8=3 200 A, 而 GIS 外壳实际电流最大值不足 1 300 A, 因此按照 3 200 A 考虑, 完全满足通流能力要求。

#### 2) 载流量校验

单块 60×6 的铜排在 35 ℃ 时载流量约为 990 A,

动作电压越低, 抑制效果越好。但值得注意的是, 应谨慎选取 MOA 的参考电压, 避免其在工频故障电流下过热损坏; 另一方面由于放电电压较小, 难以与 MOA 的参数配合, 若参数不匹配则可能导致 MOA 频繁动作或者拒不动作。

#### 4.2 法兰间用短接片短接

根据前文分析可知, 本次研究的 GIS 电站放电现象是由 TEV 在法兰间产生的电位差引起的, 为了消除此电位差, 考虑采用在法兰两侧跨接短接片的方法。但是增加的短接片与原有的三相短接排可能引起外壳间的环流, 因此取消了三相短接排。短接后的计算结果如图 8 所示。

因此 4 块铜排载流量为 3 960 A, 大于单相电流 3 200 A, 载流量满足要求。

#### 3) 热稳定截面校验

由于短接片同时将作为接地导体, 所以需要校验其最小热稳定电流。对于铜材, 按最严苛条件, 即材料导电率 20% 以及最大允许温度 700 ℃ 考虑, 其热稳定系数  $c$  取 249。同时取流过短接排的最大短路电流  $I_{gm}$  为 50 kA, 短路故障持续时间  $t_e$  为 0.6 s, 因此当选用铜作为接地体时其截面积  $S_g$  应满足:

$$S_g \geq \frac{I_{gm}}{c} \sqrt{t_e} = 155.5 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

目前选用的短接片总面积为 4×360 mm<sup>2</sup>, 远大于 155.5 mm<sup>2</sup>, 满足热稳定要求。

跨接后的变压器升高座法兰处如图 9 所示, 跨接后在相同的操作方式下并未引起放电, 证明了这一解决办法是有效的。



图9 跨接后变压器升高座法兰处

Fig. 9 Inhibition effect of adding shorting connector

## 5 结论

本文以国内某500 kV变电站操作隔离开关引起的法兰间火花放电现象为背景,研究操作隔离开关引起的TEV及其抑制措施,并得到以下结论:

1) 基于Cassie-Mayr电弧定理,对传统的分段电弧模型进行了改进,计算得到在同一情况下操作隔离开关会在变压器升高座两侧法兰间产生75 kV的电位差,超过了绝缘隔板的沿面闪络电压,会引起火花放电。

2) 减少隔离开关孤岛侧的剩余电荷、降低接地线电感都可以不同程度地降低TEV的幅值,但是有各自的局限性,不能完全抑制法兰间电位差,仍有可能引起法兰间的放电。

3) 对于TEV引起法兰间的放电,使用短接片进行跨接是最为简单有效的方法。该方法可以有效地抑制法兰间的电压差,避免由此产生的放电现象,但需要对短接片的选型进行校验,并取消原有的三相短接排以免产生环流。

### 参考文献:

[1] 张重远,梁贵书,崔翔,等. GIS隔离开关操作对二次设备的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2002.02.003.  
ZHANG Z Y, LIANG G S, CUI X, et al. The effects of operations of the disconnector switch on the secondary circuits in gas insulated substations [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2002.02.003.

[2] 胡榕. 特高压交流气体绝缘开关设备的电磁瞬态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. DOI: 10.7666/d.Y3114503.

HU R. Research on the characteristics of electromagnetic transient generated during switching of disconnector in ac ultra high voltage gas insulated switchgear [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. DOI: 10.7666/d.Y3114503.

- [3] FORD G L, GEDDES L A. Transient ground potential rise in gas insulated substations-assessment of shock hazard [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, PAS-101(10): 3620-3629. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317047.
- [4] FUJIMOTO N, DICK E P, BOGGS S A, et al. Transient ground potential rise in gas insulated substations-experimental studies [J]. Power Engineering Review, IEEE, 1982, PER-2(10): 21-22. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317033.
- [5] DICK E P, FUJIMOTO N, FORD G L, et al. Transient ground potential rise in gas-insulated substations-problem identification and mitigation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, PAS-101(10): 3610-3619. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317046.
- [6] 王娜,林莘,徐建源,等. 特高压GIS变电站中快速暂态过电压仿真及其特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3310-3315. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.12.032.  
WANG N, LIN S, XU J Y, et al. Simulation and characteristics analysis of very fast transient overvoltage in GIS insulated substation with ultra high voltage [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3310-3315. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.12.032.
- [7] 王娜. 特高压GIS中隔离开关操作引起的电磁暂态问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.  
WANG N. Study on electromagnetic transient problems caused by isolating switch operation in UHV GIS [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [8] 林莘,李爽,徐建源,等. 超高压GIS暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 12-17+25. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2011.03.003.  
LIN S, LI S, XU J Y, et al. Simulation of transient enclosure voltage in EHV GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 12-17+25. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2011.03.003.
- [9] FESER W, PFAFF W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10): 2904-2911. DOI: 10.1109/TPAS.1984.318292.
- [10] CHRISTENSEN L H. Design, construction, and test of a passive optical prototype high voltage instrument transformer [J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 1995, 10(3): 1332-1337. DOI: 10.1109/61.400913.
- [11] 胡榕,崔翔,陈维江,等. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5244-5258. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.025.  
HU R, CUI X, CHEN W J, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high volt-

- age gas insulated switchgear [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5244-5258. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.025.
- [12] 胡榕, 崔翔, 陈维江, 等. 特高压气体绝缘开关设备中瞬态外壳电压测量装置的研制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6235-6245. DOI: JournalArticle/5b3c202ec095d70f00a8e4fa.
- HU R, CUI X, CHEN W J, et al. Development of the measuring device of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6235-6245. DOI: JournalArticle/5b3c202ec095d70f00a8e4fa.
- [13] HU R, CUI X, ZHANG W D, et al. Transient enclosure voltage (TEV) measurement system of UHV GIS and TEV statistical characterization [C]//IEEE. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396743.
- [14] SHIMODA N, TAGUCHI K, NEMOTO T, et al. Suppression of very fast transient overvoltages across insulating flange of 1 000 kV GIS [C]//IEEE. Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH99), London, UK, 1999. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 2. 415. P1-2. 418. P1. DOI: 10.1049/cp:19990680.
- [15] ZHAO J, ZHANG J G, LIU Z H, et al. Measurement of TEV of 1 000 kV UHV gas insulated switchgear [C]//IEEE, The Seventh Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM' 2015), Hangzhou, China, 2015. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 390-392. DOI: 10.1109/CEEM.2015.7368693.
- [16] 胡蓉, 陈飞. 架空进出线的 220 kV GIS 紧凑型户内布置方案研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(增刊 1): 73-77+83. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.014.
- HU R, CHEN F. 220 kV GIS compact indoor layout research with overhead line [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4 (Supp. 1): 73-77+83. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.014.
- [17] MOREIRA D C, NUNES M, MOREIRA D, et al. Analysis of VFTO during the failure of a 550 kV gas-insulated substation [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189(October (4): 106825. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106825.

---

 作者简介:


闫琪

## 张延泽

1997-, 男, 甘肃兰州人, 武汉大学高压与绝缘技术专业, 博士研究生在读, 主要研究方向为过电压和电力系统保护 (e-mail) 3108496520@qq.com。

## 陈小月

1987-, 女, 湖北荆门人, 武汉大学电气与自动化学院副研究员, 武汉大学高压与绝缘技术专业博士, 主要研究方向为电力系统过电压和电力系统电磁环境 (e-mail) chenxiaoyue@whu.edu.cn。

## 王羽

1983-, 男, 湖北谷城人, 武汉大学电气与自动化学院副教授, 博士生导师, 武汉大学高压与绝缘技术专业博士, 主要从事电力系统防雷与接地技术、过电压、外绝缘等方面的研究工作 (e-mail) yuwang@whu.edu.cn。

(责任编辑 李辉)