

在运252 kV真空断路器X射线辐射特性研究

孙 为¹, 石桓通¹, 苏海博^{1,2}, 王 勇², 李兴文¹

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049; 2. 广东电网有限责任公司广州供电局电力科学研究院, 广州 510665)

摘要: 为准确掌握已投运高电压等级真空断路器的X射线辐射特性,文中以广州芳村变电站252 kV单断口真空断路器为研究对象,开展了辐射特性实验研究。采用热释光剂量片对设备在断口阶梯耐压试验及连续15天触头闭合正常运行状态下的辐射剂量进行了测量,并利用基于吸收法的阵列式能谱仪对耐压过程中产生的X射线能谱进行了重建与分析。实验结果表明,在阶梯耐压试验中,A、B、C三相真空断路器在距离1 m处产生的辐射剂量率均超出GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》限值,其中C相真空断路器的辐射剂量率是另外两相的7倍以上。能谱重建结果显示,辐射能谱峰值位于约70 keV处,光子能量主要集中在40~150 keV范围。在连续15天的正常运行监测期间,闭合状态下的真空断路器仍持续产生X射线辐射,归算至1 m距离处的辐射剂量率约0.5 $\mu\text{Sv}/\text{min}$;剂量率随测量方向与触头端面夹角增大而呈高斯递减,反映了辐射场的空间非均匀分布特性。本研究为高电压等级真空断路器的辐射防护设计提供了参考。

关键词: 252 kV真空断路器; X射线; 辐射能谱; 在线辐射监测

Research on X-ray Radiation Characteristics of In-service 252 kV Vacuum Circuit Breaker

SUN Wei¹, SHI Huantong¹, SU Haibo^{1,2}, WANG Yong², LI Xingwen¹

(1. State Key Lab of Electrical Insulation & Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: To accurately determine the X-ray radiation characteristics of in-service high-voltage vacuum circuit breaker (VCB), in this paper the 252 kV single-break VCBs at Fangcun Substation in Guangzhou is taken as the research object and experimental investigations of its radiation characteristics are carried out. The thermoluminescent dosimeters (TLDs) are used to measure the radiation dose of the equipment during stepped withstand voltage tests across the break and under normal operating conditions with contacts closed for consecutive 15 days. Additionally, an array-type spectrometer based on the absorption method is used to reconstruct and analyze the X-ray energy spectrum generated during the withstanding voltage process. The experimental results show that during the step voltage withstand test, the radiation dose rates generated by phases A, B, and C of VCBs at a distance of 1 m all exceed the standard limit specified in the GB 18871—2002《Basic Standards for Protection Against Ionizing Radiation Protection and for Safety of Radiation Source》. Among them, the radiation dose rate of phase C vacuum circuit breaker is more than seven times that of other two phases. The energy spectrum reconstruction results show that the peak of the radiation energy spectrum is located at approximately 70 keV. The photon energy is mainly concentrated in the range of 40~150 keV. During the 15-day continuous monitoring under normal operation, the VCBs in the closed position continuously generate X-ray radiation, with a radiation dose rate of approximately 0.5 $\mu\text{Sv}/\text{min}$ when normalized to a distance of 1 m. The dose rate exhibits a Gaussian decay as the angle between the measurement direction and the contact surface increases, reflecting the spatial non-uniform distribution of the radiation field. This study provides references for the radiation protection design of high-voltage VCBs.

Key words: 252 kV vacuum circuit breaker; X-ray; radiation spectrum; online radiation monitoring

收稿日期:2026-01-15; 修回日期:2026-03-18

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JC-DW5-03);南方电网科技项目(GDKJXM20222362)。

Project Supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(2022JC-DW5-03), Science and Technology Project of China Southern Power Grid(GDKJXM20222362).

0 引言

真空开断技术是开发无氟电力设备的重要方向之一,其原理是利用真空优良的绝缘性能迅速熄灭电弧,在电流过零后迅速恢复介质强度,承受恢复电压并阻止电弧重燃^[1]。截至 2015 年,真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)在中低压领域的市场占有率已经超过 90%,在运量已有数百万台^[2]。但在高压输电系统中,六氟化硫(SF₆)气体断路器仍占据主导地位。SF₆是一种强温室效应气体,其全球变暖潜能值是 CO₂ 的两万余倍,在大气中的寿命长达 1 000 ~ 3 200 年,且其电弧分解产物有剧毒性和强腐蚀性^[3]。1997 年《京都议定书》已将 SF₆ 列为 6 种限制使用的温室气体之一,对其使用和排放量提出了明确约束^[4]。欧盟于 2024 年颁布的含氟气体法规文件(EU)2024/573 规定,自 2026 年 1 月 1 日起,欧盟全面禁用 24 kV 及以下电压等级的含氟开关设备,更高电压等级的设备亦将从 2028 年 1 月 1 日开始逐步退出市场^[5]。在此背景下,发展高压真空断路器以替代 SF₆ 气体断路器,已成为全球电力开关设备的发展趋势,也是实现中国“碳达峰、碳中和”战略目标的关键技术路径之一。

近年来,国内外多家真空灭弧室生产商都已相继研发出 126 kV 和 145 kV 单断口真空灭弧室并挂网运行,中国首台 252 kV 单断口真空断路器也于 2024 年 11 月在广州芳村变电站成功投运^[6]。

当真空灭弧室承受较高电压时,阴极表面因场致发射会产生高能电子,这些电子在电场加速下轰击阳极,通过韧致辐射产生 X 射线^[7]。这一问题在中低压真空灭弧室中并不严重,文[8]对 7.2 ~ 36 kV 真空灭弧室在额定电压下的 X 射线剂量进行了测量,测得在距离 0.1 m 处的剂量率低于 1 μSv/h,符合欧盟相关标准。随着真空灭弧室电压等级提高,电子获得更大动能,韧致辐射 X 射线光子能量提高,穿透能力显著增强,导致外部测量的辐射剂量呈非线性快速增长。文[9]在 126 kV 和 252 kV 高压真空灭弧室的生产和试验过程中测得的 X 射线辐射剂量已经远超 ANSI C37.85—2020^[10]、IEC 62271-1:2017^[11]、GB 18871—2002^[12]等国内外标准所规定的在 1 m 距离处不超过 2.5 μSv/min 的剂量率限值,严重威胁附近人员的身体健康,也对辐射范围内的材料电气性能构成潜在风险。X 射线对人体的影响主要表现为累积效应,即辐射所致健康损害的严重程度取决于人体所受的累积辐射剂量^[13]。低剂量暴露可能引发疲劳困倦、四肢乏力、食欲不振等非特异性症状^[14];

随着累积剂量升高,可能出现皮肤损伤、急性辐射综合征等确定性效应^[15];更为严重的情况下,辐射可能导致 DNA 损伤,增加罹患癌症的风险^[16],同时可能引发生殖细胞损伤,导致不孕或胎儿发育异常等遗传效应。文[17-19]对高压试验作业人员身体状况的调查显示,高压作业人员中白细胞减少人数明显高于对照组,在部分人员中观察到双着丝粒体等染色体畸变以及晶状体斑片状混浊等与职业暴露密切相关的异常改变,说明高压试验过程中产生的 X 射线对健康构成严重威胁,必须进行辐射防护。准确掌握在运高压真空断路器的 X 射线辐射特性,对于完善人员防护标准以及评估设备安全性具有重要意义。

国内外标准对高压真空设备辐射剂量限值的规定均遵循国际放射防护委员会(ICRP)的基本原则,美国标准 ANSI C37.85—2020 规定普通公众年辐射剂量上限为 5 mSv,而中国标准 GB 18871—2002 更为严格,设为 1 mSv。上述标准基于操作人员年均试验 2 000 次的假设,但国内主要真空灭弧室厂商年产量达数百万台,每台产品出厂前均需经历多次老炼与耐压试验,单人年均试验次数远超 2 000 次。随着真空断路器向更高电压等级发展,亟需完善现行辐射防护标准,并依据实测数据重新评估现有屏蔽与监测设施。为此,文中以广州供电局芳村变电站的 252 kV 单断口真空断路器为研究对象,使用基于吸收法设计的阵列式能谱仪测量了设备在例行耐压检测试验中产生的 X 射线能谱和连续 15 天无开断动作正常运行期间所产生的辐射剂量,以期为高电压等级真空断路器的辐射防护及安全运行提供参考。

1 辐射特性测量实验

1.1 252 kV 单断口真空断路器

文中研究的 252 kV 瓷柱式单断口真空断路器,共 3 台等距共线排列,相邻两台间距约 3.5 m,额定电流 4 000 A,额定开断电流 50 kA,以 N₂ 为外绝缘介质。真空灭弧室维持约 10⁻⁵ Pa 的高真空度,采用 6 节瓷壳、不锈钢主屏蔽罩外置式对称结构,触头材料为 CuCr50 合金。断路器实际布置及真空灭弧室结构见图 1。

1.2 辐射剂量与能谱重建

使用经中国辐射防护研究院放射性剂量站校准并出具校准证书的 CTLD-1000 型氟化锂热释光剂量片(thermoluminescence dosimeter, TLD)测量 X 射

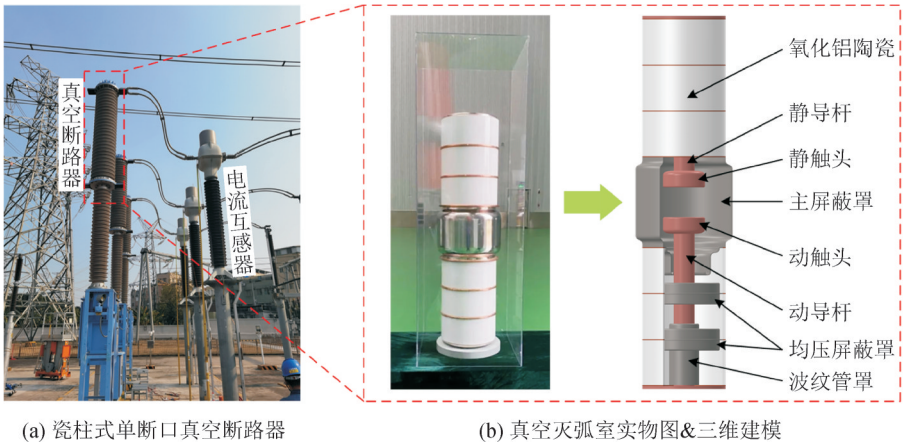


图1 广州芳村变电站252 kV单断口真空断路器

Fig. 1 252 kV single-break vacuum circuit breaker at Guangzhou Fangcun substation

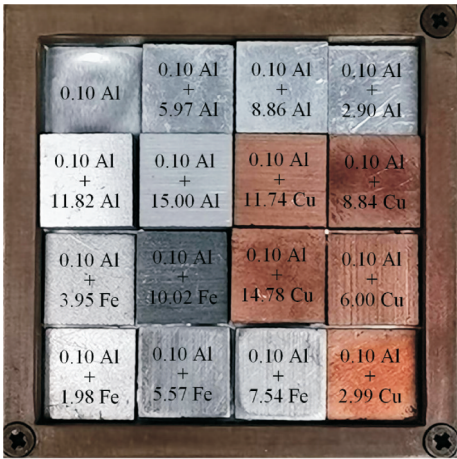
线辐射剂量,校准过程在19.1~19.5℃环境下采用平均能量1.25 MeV的⁶⁰Co核素γ射线源在0.1 Sv的约定值下进行,校准技术依据国家计量检定规程JJG 593—2016《个人和环境监测用X、γ辐射热释光剂量测量系统》^[20],校准结果以刻度系数的形式给出。该剂量片具有灵敏度高、信噪比高、线性剂量响应范围较宽($1\times10^{-4}\sim1.2\times10^2$ Sv)等特点,能够满足变电站室外环境下的长时间测量需求,测量精度0.01 μSv。实验中,每个点位布置2~3个剂量片,取平均剂量以减少误差。

X射线能谱是表征辐射特性的核心参数之一,直接反映了辐射至外界的光子能量分布。使用一套基于吸收法设计的由滤片和热释光剂量片阵列组成的能谱仪,来进行真空断路器X射线能谱测量与重建^[21]。通过测量X射线穿透不同厚度和材料制成的滤片后的剂量衰减,结合各滤片的X射线响应特性,建立线性方程组并求解,从而获得X射线的能量分布。能谱仪采用纯度99.9%的Al、Fe、Cu滤片以4×4阵列形式排列于剂量片上,滤片材料、厚度及排列方式见图2(a),剂量片呈棋盘状分布见图2(b),剂量值由单通道热释光剂量读出器读取。

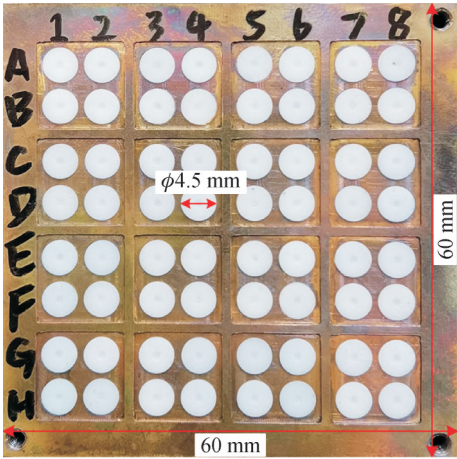
1.3 阶梯耐压试验辐射剂量与能谱测量

加压前布置剂量片和能谱仪。剂量片布置在离地面高度约6 m处,与触头间隙中心处大致等高,水平距离约2.5 m;能谱仪正面朝向触头间隙放置在断路器旁的电流互感器上,高度约3.5 m,与触头直线距离约3.54 m,测量真空断路器在耐压试验全过程的辐射水平。实验布置见图3。

耐压试验采用变频串联谐振交流耐压方法,该方法具有试验设备体积小、重量轻、品质因数高、使用方便等优点,是进行高压开关现场交流耐压试验的主流方法,符合 IEC 62271 - 1: 2017、GB/T



(a) 滤片材料、厚度(mm)及其排布方式



(b) 剂量片阵列

图2 基于吸收法设计的能谱仪

Fig. 2 Spectrometer designed based on the absorption method

16927.1—2011、DL/T 849.6—2016 等标准,芳村站252 kV单断口真空断路器按规定需定期使用该方法进行耐压试验。该方法通过调节频率使回路产生谐振,在待测断路器上施加正弦交流电压,与真空断路器实际运行工况及型式试验条件一致,试验

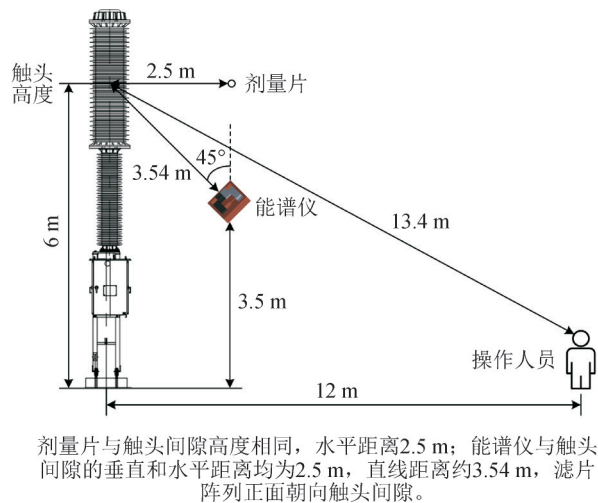


图3 耐压试验辐射剂量与能谱测量实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of radiation dose and spectrum measurement experiment for withstand voltage test

电路见图4。试验采用阶梯升压法,首先将输出电压逐渐升至146 kV并保持5 min,然后升压至252 kV并保持3 min,最后升压至368 kV,即出厂耐压值460 kV的80%,保持1 min,结束后断电,该流程能够全面测试断路器的耐压水平,是商用真空断路器耐压试验的常用手段。单次试验持续时间约12 min,操作人员与待测真空断路器水平距离约12 m,直线距离约13.4 m。共进行3次试验,分别对A、B、C相真空断路器进行断口加压,触头开距为额定值100 mm。

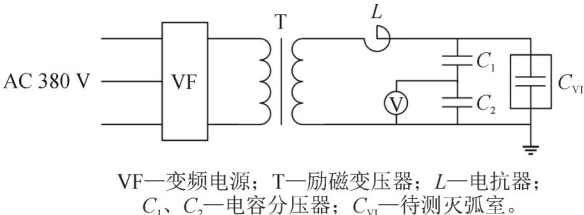


图4 阶梯耐压试验电路图

Fig. 4 Circuit of step voltage withstand test

1.4 252 kV 真空断路器长期运行状态下的辐射剂量测量

对通过耐压试验后重新并网的252 kV真空断路器辐射剂量进行为期15天的连续监测。共设置5个监测点,A、C相侧边的栏杆上各有一个监测点,与对应真空断路器触头的直线距离约11.18 m,A相侧为点位1,C相侧为点位2。由于真空断路器本身具有铜导杆、不锈钢罩等对辐射具有较强屏蔽作用的结构,因此点位1和2几乎不受距离点位较远的2台真空断路器的辐射影响,例如图5(a)中B、C相真空断路器辐射到点位1处的X射线剂量不到A相辐射剂量的1%,可忽略不计。在垂直于3台真空断路器连线的方向上水平距离约2.5 m、高度约1 m处布置

了3个点位,分别对应A、B、C相,见图5(b),点位6在紧贴A相东南侧的电缆槽盒箱体上,与A相触头直线距离约3.54 m,见图5(a)。剂量片均放置在单向开口的金属盒中,开口朝向对应断路器,以免受到其他真空断路器的X射线辐射影响。

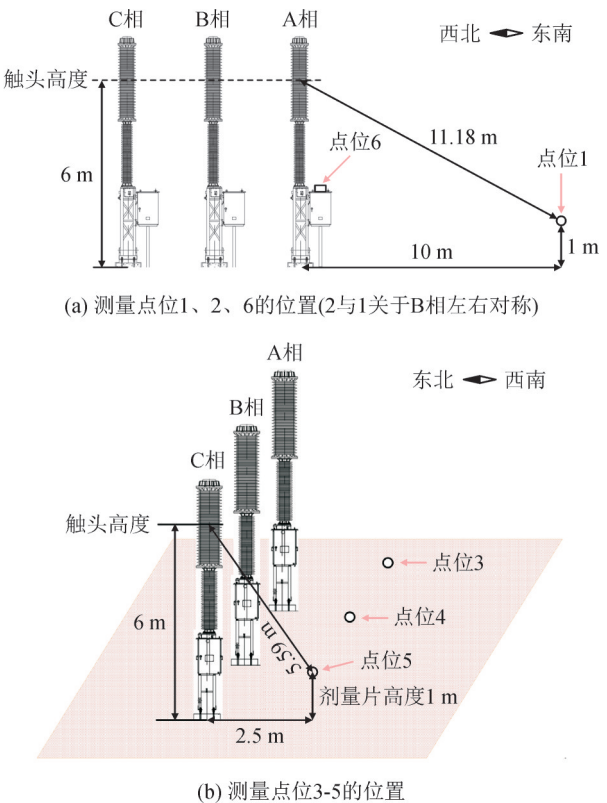


图5 辐射剂量测量点位的位置

Fig. 5 Schematic diagram of position of radiation dose measurement points

2 结果与分析

2.1 阶梯耐压试验产生的X射线辐射特性

2.1.1 辐射剂量

A、B、C相真空断路器各自在阶梯耐压试验中产生的X射线辐射特性参数见表1。各相真空断路器在耐压试验中产生的辐射剂量率均显著高于标准限值2.5 $\mu\text{Sv}/\text{min}$,其中C相真空断路器的辐射剂量率显著高于A、B两相,达到7倍以上,这可能与C相触头表面的微观形貌有关,触头表面粗糙度较大或氧化程度较高会导致加压后触头表面的微观场强更高,从而产生更强的场致发射电流和韧致辐射X射线。

距离断路器13.4 m处,操作人员对A、B相进行试验时所受剂量率均低于0.5 $\mu\text{Sv}/\text{min}$,满足标准要求,对C相试验时则略高于限值。经估算,需要将操作距离扩大至15 m以上,才能使人员所受辐射剂量率降低至标准规定的安全范围内。测量结果表明,

表1 A、B、C相真空断路器在阶梯耐压试验中的辐射剂量

Table 1 Radiation dose of phase A, B, and C VIs during step voltage withstand test

相位	TLD 剂量/ μSv	平均剂量/ μSv	剂量率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{min}^{-1})$	距离 1 m 处 剂量/ μSv	距离 1 m 处剂量率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{min}^{-1})$	操作人员位置辐射剂量 率/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{min}^{-1})$
A 相	157.28	149.95	12.50	937.16	78.10	0.43
	142.61					
B 相	140.83	143.60	11.97	897.48	74.79	0.42
	146.36					
C 相	1 111.50	1 064.31	88.69	6 651.95	554.33	3.08
	1 017.13					

即使在满足绝缘设计要求的满开距状态下,252 kV 真空断路器在耐压试验过程中仍会产生较高水平的X射线辐射,对周边操作人员构成潜在健康风险。

2.1.2 辐射能谱

对C相真空断路器在阶梯耐压试验过程中产生的X射线辐射能谱进行测量与重建。阵列式能谱仪测得的辐射剂量见图6,穿透滤片并沉积在TLD中的辐射剂量随着滤片厚度的增加而呈指数形式下降。能谱仪与真空断路器直线距离约3.54 m,按照辐射随距离变化的平方反比定律,能谱仪所受辐射剂量应为图2中剂量片的 $(2.5/3.54)^2=0.5$ 倍,即剂量应为 $1\,064.31 \times 0.5=532.16\,\mu\text{Sv}$,但是能谱仪处的实际测得剂量仅约351 μSv 。这是因为两触头端面是韧致辐射X射线的主要来源,与真空间隙同高度处的辐射强度最大,若在轴向上下移动,则测量位置与触头间隙中心平面夹角变大,X射线光子需要穿过的触头等结构的厚度越大,受到的衰减也越严重,从图2可以看出,能谱仪在与触头间隙中心平面夹角约45°位置,因此所受到的辐射有所衰减,与文[9]的结论一致。

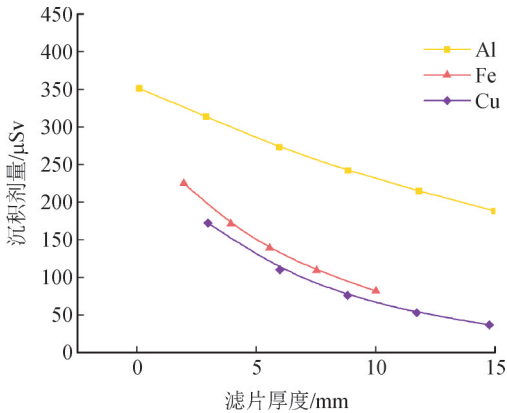


图6 穿透铝、铁、铜滤片后在TLD上沉积的辐射剂量

Fig. 6 Radiation dose deposited on TLDs after penetrating aluminum, iron, and copper filters

X射线能谱重建结果见图7,重建过程中已考虑了TLD所对应的空间立体角修正,由于能谱仪与X射线源之间具有一定距离和相对角度,不同位置

的TLD所接收到的辐射通量存在差异,因此根据能谱仪与触头间隙中心的相对几何关系,计算了每个TLD所对应的空间立体角,并以此对实测测量值进行了校正,从而减少了因探测位置不同而引入的测量偏差。能谱峰值位于约70 keV处,光子能量主要分布在40~150 keV范围内,能量低于40 keV和高于150 keV的光子数占比较低。这是因为在阶梯升压过程中,高电压施加持续时间相对较短,高能电子数量有限,导致产生的高能韧致辐射光子较少,而低能光子大多被真空断路器自身结构屏蔽,无法辐射到外界。结合不同能量光子对真空断路器典型结构材料的穿透能力,能量为70 keV和150 keV的光子对厚度为2 mm的不锈钢材料的穿透率分别约为27%和73%,对厚度为10 mm的氧化铝陶瓷材料的穿透率分别约为51%和64%,随着光子能量的升高,其穿透能力也会显著增强。因此,实际穿透断路器瓷壳、屏蔽罩、外绝缘气体及套管等多层结构并被探测到的X射线能谱与真空灭弧室内部产生的原始能谱存在差异,原始能谱能段范围更广、光子数量更多。以文中研究的真空断路器为例,其不锈钢屏蔽罩及氧化铝陶瓷结构件所受到的辐射可达百mSv以上,可能引发辐射诱导表面电荷等现象。因此,在评估真空断路器辐射时,需综合考虑其内部产生的原始辐射对自身材料的影响,以及经过结构件衰减后的辐射对外界的影响。

2.2 252 kV 真空断路器长期运行状态下的辐射剂量测量

对252 kV真空断路器连续15天的辐射剂量监测结果见表2。监测期间无任何开断操作。测量结果表明,触头闭合状态下的真空断路器依然会持续产生X射线辐射,这是因为灭弧室结构(闭合触头—屏蔽罩—地)构成的电容分压导致屏蔽罩仍具有一定的悬浮电位,在灭弧室真空度良好的状态下,闭合触头与屏蔽罩之间的电位差约为触头电位的15%~25%^[22-23],形成的电场可在触头表面引发微弱的场致发射,产生的韧致辐射X射线光子最大能量约为系

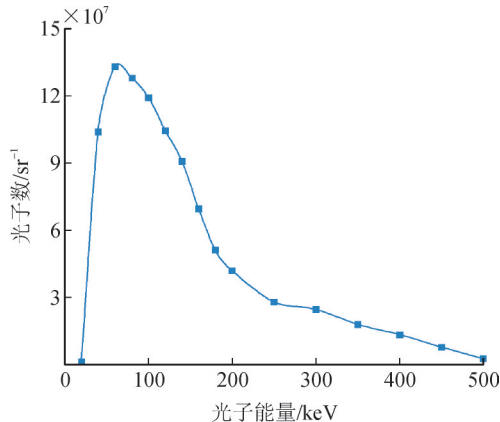


图7 C相真空断路器在单位空间角内产生的X射线能谱
Fig. 7 X-ray spectrum generated by phase C VCB per steradian

统电压峰值的15%~25%,即大约30~50 keV。按照平方反比定律将6个点位测得的辐射剂量率归算到

距离断路器1 m处,对应的辐射剂量率最大约为0.52 μSv/min;若归算至距触头约20 cm处,即真空灭弧室屏蔽罩与瓷壳位置,则对应剂量率约13 μSv/min,即6.83 Sv/a;进一步考虑真空灭弧室外壳、套管及外绝缘介质层等结构对X射线的衰减,正常工作电压下灭弧室内部的辐射剂量率可能升高2~3个数量级,达到百Sv/a以上。

因此尽管触头闭合状态下的辐射剂量率远低于工频耐压状态,但其辐射时间长达设备的整个运行周期,经结构件衰减前的灭弧室内部长期辐射累积剂量可能较高。在评估高压真空断路器的整体辐射水平、制定长期运行的辐射防护策略以及计算相关运维人员的累积受照剂量时,需要将这种触头闭合状态下的持续性X射线辐射纳入考量。

表2 252 kV真空断路器连续15天辐射剂量监测结果

点位	TLD 剂量/ μSv	平均剂量/ μSv	剂量率/ $(\mu\text{Sv}\cdot\text{min}^{-1})$	与断路器直线距离/m	与触头端面夹角 θ/rad	距离1 m处剂量/ μSv	距离1 m处剂量率/ $(\mu\text{Sv}\cdot\text{min}^{-1})$
1	88.59	89.62	0.004 1	11.18	0.464	11 202.32	0.520
	90.64						
2	80.42	84.28	0.003 9	11.18	0.464	10 535.23	0.490
	88.14						
3	92.92	97.61	0.004 5	5.59	1.107	3 050.32	0.140
	102.30						
4	109.15	107.19	0.005 0	5.59	1.107	3 349.73	0.160
	105.23						
5	116.57	116.78	0.005 4	5.59	1.107	3 649.31	0.170
	116.98						
6	148.75	143.79	0.006 7	3.54	1.429	1 797.32	0.083
	138.83						

在触头闭合状态下,对应A、B、C三相的点位3、4、5(距断路器约5.59 m)归算至1 m处的辐射剂量率分别为0.14、0.16、0.17 μSv/min,三者数值相近,说明三相真空断路器在闭合状态下的X射线辐射水平基本一致,由此可推测各相触头侧壁的表面粗糙度、氧化程度及微观尖突分布等微观形貌较为相近。与耐压试验中C相辐射剂量率显著偏高的现象相比,闭合状态下的辐射主要来源于触头侧壁与屏蔽罩之间的场致发射,而非触头端面,因此三相辐射水平的均一性从侧面反映了触头侧壁加工工艺的一致性较好。

将各个监测点位的辐射剂量率归算至1 m距离后发现,点位1、2约0.5 μSv/min,点位3、4、5约0.15 μSv/min,点位6辐射剂量率最小,仅约

0.083 μSv/min。将各点位与对应真空灭弧室的闭合触头端面中心连线,计算各连线与触头端面的夹角,结合对应的辐射剂量率绘图并进行拟合,得到图8,拟合结果符合高斯分布,拟合优度0.98。

$$\frac{dH}{dt}=0.592\ 1\times\exp\left(-\frac{\theta^2}{0.971\ 8}\right)\tag{1}$$

式(1)中: H 为距离1 m处的辐射剂量,μSv; dH/dt 为距离1 m处的辐射剂量率,μSv·min⁻¹; θ 为与触头端面的夹角,rad。

辐射剂量率随着夹角增大而呈现单调递减趋势,说明与触头等高度处的辐射强度最大,沿轴向上下偏移越远则辐射强度越低,反映了触头闭合状态下的真空断路器辐射场轴向空间分布同样有非均匀性特征。

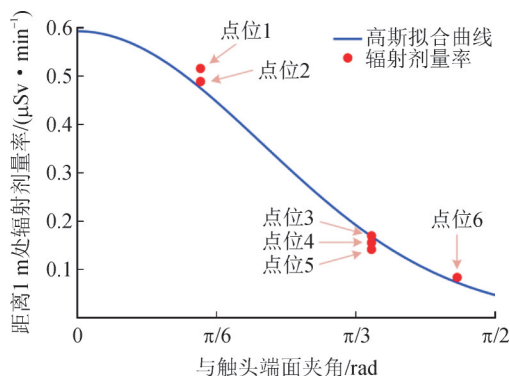


图8 距离1 m处的辐射剂量率与闭合触头端面夹角的关系

Fig. 8 Relationship between radiation dose rate at 1 m and the angle relative to the closed contact surface

3 结论

文中对已投运的252 kV单断口真空断路器在阶梯耐压试验及连续15天正常运行状态下的X射线辐射特性进行了研究,围绕以下3点展开:首先,阶梯耐压试验中产生的X射线辐射水平与空间分布,包括三相真空灭弧室的辐射水平差异、C相辐射剂量率以及安全距离估算;其次,辐射能谱特征,包括峰值能量、主要光子能量范围以及对设备材料的潜在影响;最后,正常运行状态下的持续辐射,包括闭合状态仍存在辐射现象、辐射场空间分布规律以及长期累积剂量问题。结论如下:

1)在阶梯耐压试验中,三相真空断路器产生的辐射剂量率均超过相关标准规定的 $2.5 \mu\text{Sv}/\text{min}$,C相真空断路器的辐射剂量率是另外两相的7倍以上。距离设备约13.4 m的操作人员在C相试验时受到的辐射剂量率略高于标准限值,需将操作距离扩大至15 m以上或采用额外辐射屏蔽措施方可满足安全要求。

2)在阶梯耐压试验中的X射线能谱重建结果表明,能量约70 keV的光子占比最高,光子能量主要分布在40~150 keV范围内,其他能段光子占比较低。进一步考虑真空断路器结构件对不同能量X射线光子的衰减,灭弧室内部辐射剂量可达百mSv以上,可能引发辐射诱导表面电荷等现象,威胁设备绝缘性能。

3)真空断路器正常运行连续15天的辐射监测结果表明,闭合状态下的真空断路器仍持续产生X射线辐射,辐射剂量率随测量方向与触头端面夹角增大而单调递减,近似呈高斯分布,辐射场沿轴向呈现显著的非均匀分布特征。归算至1 m距离处的辐射剂量率约 $0.5 \mu\text{Sv}/\text{min}$,较耐压状态低2~3个数量级,但其辐射时间贯穿设备全运行周期,且实测

值已经过断路器自身结构衰减,灭弧室内部长期辐射累积剂量可能较高,因此有必要进一步研究灭弧室内部真实辐射剂量水平及其对材料与绝缘性能的长期影响。

参考文献:

- [1] 王季梅. 真空开关技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:42-43.
Wang Jimei. Vacuum switch technology and applications[M]. Beijing:China Machine Press, 2008:42-43.
- [2] 邹积岩. 真空开关技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2021:2-5.
Zou Jiyan. Vacuum switch technology[M]. Beijing:China Machine Press, 2021:2-5.
- [3] An Minde, Prinn R G, Western L M, et al. Sustained growth of sulfur hexafluoride emissions in China inferred from atmospheric observations[J]. Nature Communications, 2024, 15(1):1997.
- [4] 马京香, 夏忠林, 王放放, 等. 废弃电气绝缘气六氟化硫的降解技术研究综述[J]. 环境化学, 2026, 45(3):1075-1093.
Ma Jingxiang, Xia Zhonglin, Wang Fangfang, et al. Review of degradation technologies of abandoned electrical insulation gas sulfur hexafluoride[J]. Environmental Chemistry, 2026, 45(3):1075-1093.
- [5] (EU) 2024/573 Regulation (EU) 2024/573 of the European parliament and of the council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending directive (EU) 2019/1937 and repealing regulation (EU) No 517/2014[S].
- [6] 张宇晖. 全球首台252千伏真空环网断路器投运[EB/OL]. [2026-01-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c32267357/content.html>.
Zhang Yuhui. World's first 252 kV eco-friendly vacuum circuit breaker put into operation[EB/OL]. [2026-01-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c32267357/content.html>.
- [7] 李 炜, 郭媛媛, 王承玉, 等. 真空灭弧室中X射线对人体健康的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(12):101-104.
Li Wei, Guo Yuanyuan, Wang Chengyu, et al. Influence of X-rays in vacuum interrupter on human health[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12):101-104.
- [8] Renz R, Gentsch D. Permissible X-ray radiation emitted by vacuum-interrupters/-devices at rated operating conditions[C]//24th IS-DEIV 2010, 2010:133-137.
- [9] Shi Huantong, Sun Wei, Su Haibo, et al. Modeling of X-ray radiation of high-voltage vacuum interrupters and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(6):3419-3429.
- [10] ANSI C37. 85—2020 American national standard for AC high voltage power vacuum interrupter-safety requirements for X-radiation limits[S].
- [11] IEC 62271-1:2017 High-voltage switchgear and controlgear-part 1: common specifications for alternating current switchgear and controlgear[S].
- [12] GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].
GB 18871—2002 Basic standards for protection against ionizing

- radiation and safety of radiation sources[S].
- [13] 王忠立, 胡新梅. 真空断路器生产伴生 X 射线危害干预前后比较[J]. 职业与健康, 2016, 32(18): 2456-2459.
Wang Zhongli, Hu Xinmei. Occupational hazard of X - ray associated with vacuum circuit breaker manufacturing before and after intervention[J]. Occupation and Health, 2016, 32(18): 2456-2459.
- [14] 杨保初, 赵文正, 吴美羔, 等. 高压放电对其试验人员的外周血象及遗传学效应的研究[J]. 高电压技术, 1988, 14(2): 44-48.
Yang Baochu, Zhao Wenzheng, Wu Meigao, et al. Study on peripheral blood picture and genetic effects of high voltage discharge on test personnel[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(2): 44-48.
- [15] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation; UNSCEAR 2008 report to the general assembly with scientific annexes[R]. 2010-08-18.
- [16] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: volume 100 D: radiation[R]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012-11-14.
- [17] 路建超, 王忠立, 杨海峰, 等. 真空灭弧室伴生 X 射线健康危害研究[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24(5): 453-456.
Lu Jianchao, Wang Zhongli, Yang Haifeng, et al. Research on health hazards associated with vacuum arcing chamber X - ray[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2015, 24(5): 453-456.
- [18] 杨保初. 空气间隙放电产生的 X 射线对人体的影响[J]. 高电压技术, 1985, 11(4): 59-62.
Yang Baochu. Effects of X-rays generated by air gap discharge on human body[J]. High Voltage Engineering, 1985, 11(4): 59-62.
- [19] 张良安, 苑淑渝, 张文艺, 等. 高压放电环境中 X 线照射量的水平[J]. 高电压技术, 1988, 14(2): 31-38.
Zhang Liang'an, Yuan Shuyu, Zhang Wenyi, et al. Level of X-ray exposure in high voltage discharge environment[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(2): 31-38.
- [20] JJG 593—2016 个人和环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量系统检定规程[S].
JJG 593—2016 Thermoluminescence dosimetry systems used in personal and environmental monitoring for X and γ radiation[S].
- [21] Zhang P Z, Shi H T, Wang Y Z, et al. X-ray spectrum estimation of a low - impedance rod pinch diode via transmission - absorption measurement and Monte - Carlo simulation[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(24): 243301.
- [22] 李卫国, 田 涛, 吴 军. 灭弧室内屏蔽罩上电位变化的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 122-126.
Li Weiguo, Tian Tao, Wu Jun. Mechanism research of the potential changing of shielding in arc extinguish chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 122-126.
- [23] 肖慧荣, 欧阳建光, 王 晟, 等. 真空断路器真空度与电场电位关系研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10): 1191-1195.
Xiao Huirong, Ouyang Jianguang, Wang Sheng, et al. Influence of shield electric potential on pressure in vacuum interrupter[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1191-1195.
- 孙 为(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事高压真空灭弧室 X 射线辐射方向的研究(E-mail: 1479246260@qq.com)。
- 李兴文(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与大电流、脉冲功率与等离子体等方向的研究(通信作者)(E-mail: xwli@mail.xjtu.edu.cn)。

(上接第 69 页)

- Zhang Hang, Fan Fulin, Song Kai, et al. Day-ahead scheduling of microgrid considering safety constraints of hybrid electrolyzers[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 62-71.
- [38] 梁富光, 马忠强. 独立海岛零碳微网多时间尺度优化运行方法[J]. 分布式能源, 2026, 11(1): 94-102.
Liang Fuguang, Ma Zhongqiang. Multi - time scale optimal operation method of independent island zero - carbon microgrid[J]. Distributed Energy, 2026, 11(1): 94-102.
- [39] 杨 胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 68-80.
Yang Sheng, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Multi - time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
- [40] 段麟奇, 贾燕冰, 黄 亮, 等. 含多类型电解槽模块的电—氢—热综合能源系统优化策略[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-17 [2026-01-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.050>.
Duan Linqi, Jia Yanbing, Huang Liang, et al. Optimisation strategy for an integrated electric - hydrogen - thermal energy system with multiple types of electrolyser modules[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-17[2026-01-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.050>.
- 杨梦缘(1999—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电氢互动调控、场站能量管控(E-mail: 18010283090@163.com)。
- 梁丹曦(1992—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电氢系统优化与控制技术、电氢协同优化调度技术(E-mail: liangdanxi@sina.com)。
- 徐桂芝(1976—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为新型储能、大规模储能技术、智慧能源(通信作者)(E-mail: xuguizhi@epri.sgcc.com.cn)。