

超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升研究综述

陈刚¹, 郭冲², 李平³, 冯英², 葛栋³, 张鹏飞², 黄河², 许渊²

(1. 国家山东省电力公司, 济南 250001; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 国家电网有限公司, 北京 100032)

摘要: 超/特高压 GIS 绝缘故障率升高, 严重威胁电力系统的安全稳定运行, 其绝缘可靠性提升已经成为普遍关注和亟待解决的重大问题。文中从 GIS 放电原因与防控措施、真型试验及设计改进、缺陷识别与监测预警等方面入手, 综述了超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升的关键措施与研究进展: 产品设计方面, 超/特高压 GIS 设计与工艺匹配度不足, 未充分考虑工艺实施、运输及运行等因素, 造成盆式绝缘子表面积聚异物、合闸片破损等问题; 零部件制造工艺与检验方面, GIS 关键组部件质量管控不严与卡脖子问题并存, 常规的工频耐压、局部放电、冲击耐压等静态耐压试验可以在一定程度上检出绝缘缺陷, 但对潜伏性缺陷存在检测盲区, 绝缘考核的针对性和灵敏度有待提升; 带电检测方面, 现行的 GIS 局部放电在线监测策略对绝缘沿面缺陷的检出率较低, 偶发性局部放电的检测往往被忽略, 导致故障预警的及时性与准确性不高, 采用“偶发性局部放电+X 射线+高灵敏组分”相结合的检测技术可以有效提升故障预警的成功率。进一步需要推进全寿命周期异物产生与放电机理研究, 深化 GIS 绝缘设计与微粒抑制技术, 提升绝缘试验对缺陷检出的有效性, 同时加快 GIS 关键组部件质量提升及国产化, 提高 GIS 故障预警能力, 并在此基础上构建 GIS 全寿命周期健康评估能力, 切实提升超/特高压 GIS 绝缘可靠性。

关键词: 超/特高压 GIS; 绝缘可靠性; 异物防控; 试验有效性; 带电检测

Review on Insulation Reliability Improvement of EHV/UHV GIS

CHEN Gang¹, GUO Chong², LI Ping³, FENG Ying², GE Dong³, ZHANG Pengfei², HUANG He², XU Yuan²

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: The insulation failure rate of EHV/UHV GIS increases, seriously threatening the safe and stable operation of the power system. The improvement of its insulation reliability has become a significant problem of widespread concern and urgent solution. In this paper, the causes and prevention measures of GIS discharge, true type test and design improvement, defect identification, monitoring and warning are reviewed, and the relevant measures and research progress of improving the insulation reliability of EHV/UHV GIS are summarized: the design and technique of EHV/UHV GIS do not match well in product design. Factors such as technique implementation, transportation and operation are not fully considered, which can cause problems such as accumulation of foreign bodies on the surface of basin insulators and breakage of closing resistors. The quality control of GIS key components is not strict and the bottleneck problem exists in components manufacturing process and inspection. Conventional static insulation withstand voltage test, such as power-frequency withstand voltage, partial discharge, impulse withstand voltage, can detect insulation defects to a certain extent. However, there are blind spots in detecting latent defects, and the pertinence and sensitivity of insulation assessment need to be improved. The current GIS partial discharge on-line monitoring strategy has a low detection rate of insulation surface defects in live detection. The detection of episodic partial discharge is often neglected, which results in the timeliness and accuracy of fault warning in operation. The success rate of fault warning can be improved effectively by using the detection technology combining episodic partial discharge, X-ray and highly sensitive components. Further, it is necessary to promote the research on the mechanism of foreign body generation and discharge in life cycle, deepen the GIS insulation design and particle suppression technology, improve the effectiveness of insulation test on defect detection, accelerate the quality improvement and localization of key GIS components, improve the GIS fault warning capability, and build the GIS health assessment capability in life cycle on this basis. Improve the reliability of EHV/UHV GIS insulation.

Key words: EHV/UHV GIS; insulation reliability; foreign body prevention; test effectiveness; live detection

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202355793A-3-8-KJ)。

Project Supported by Science & Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202355793A-3-8-KJ).

0 引言

近期多个超/特高压变电站及换流站发生 GIS 设备放电故障，电网安全运行短期承压。GIS 放电随机性强，故障现象复现难度大，试验及仿真研究要求高，成为长期以来难以攻克的难题；超/特高压 GIS 放电中，伴随操作发生的故障占比高，严重威胁 GIS 安全运行及电网运行方式调整；超/特高压 GIS 放电导致母线停运增多，且金属封闭式设备抢修难度大、停电周期长，严重影响电网稳定运行。因此，提出切实有效的治理措施，以降低 GIS 故障概率，从而提高 GIS 绝缘可靠性，对提升电网整体运行安全意义重大。

生产和运行经验表明，GIS 放电是质量管控、结构设计、装配工艺、系统运行条件等多因素综合作用的结果，放电防控和分析治理难度大，小尺寸模拟静态放电试验无法等效超/特高压 GIS 复杂绝缘结构及尺度效应、带电操作和暂态过电压等运行工况，不能指导提出有效的抑制措施、试验检测和监测预警手段。由此，超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升亟需攻克以下技术问题：①缺乏异物产生的抑制手段，放电机理不清：现场放电故障后异物很难留存，GIS 全寿命周期内异物产生难以追溯，异物特征不明确，且现有研究难以复现实际工况复杂运行条件，GIS 引发的放电规律不清晰，难以有效指导 GIS 绝缘设计，而常规绝缘设计无法兼顾微粒存在时绝缘设计容缺度，有效的微粒抑制手段仍然缺乏；②绝缘试验技术有效性不足：超/特高压 GIS 放电呈“隐密潜伏、极速突发”的特征，常规绝缘耐压试验对潜伏性缺陷存在盲区，出厂试验和现场试验检测针对性不强、灵敏度不够、有效性不足，且常规绝缘试验为静态耐压，未能考虑开关带电操作动态复杂工况的影响，绝缘考核不到位；③关键组部件故障高发，性能质量难以保证：特高压绝缘拉杆基本依赖进口，性能考核指标有待完善，现有质检手段对绝缘拉杆内部可能存在的气孔、分层等微缺陷的检出率不高，且合闸电阻严重依赖进口，存在卡脖子风险，电阻片损伤机理不明，电阻串结构设计仍需优化；④运行中故障预警的及时性与准确性不高：GIS 缺陷演变过程与典型传感量的对应关系仍不明确，尚无有效的故障预警方法，且 GIS 在线监测误告警率高，各厂家告警策略和阈值差异大，难以发挥哨兵作用，此外 GIS 缺陷信号偶发性强，带电检测难度大，缺乏量化诊断判据，难以诊断 GIS 缺陷严重程度；⑤GIS 全寿命周期健康评估能力存在短板：超/特高压 GIS 新产品入网检测缺少适配的检测能力，现场运行服役设备绝缘状态评估缺少有效手段，工程

现场故障设备缺乏试验复现平台，放电原因难以追溯认定。因此，围绕异物放电机理与抑制措施、绝缘试验技术优化与创新、高可靠性关键组部件研发、设备故障预警与健康评估 4 个方向，全面提升超/特高压 GIS 设备绝缘可靠性，具有重要意义。

综合现有研究进展，文中对超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升的研究现状进行综述，从 GIS 突发故障分析、异物防控技术、微粒抑制技术、绝缘试验技术、关键组部件可靠性、故障预警、全寿命周期健康评估 7 个维度阐明了超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升的研究关键，并对今后的研究方向进行了展望。

1 超/特高压 GIS 突发故障原因分析

1.1 故障原因统计

为开展超/特高压 GIS 绝缘有效性提升研究，首先对近 10 年多起 550 kV 及以上 GIS 突发故障原因进行统计分析。通过对 GIS 设备故障案例进行统计，发现故障原因主要包括异物放电故障、组部件缺陷、装配缺陷 3 大类，见图 1。内部异物放电为导致 550 kV 及以上 GIS 故障的首要原因，占比高达 77.5%；组部件缺陷包括绝缘拉杆、绝缘子、合闸电阻、金属加工件以及 PT、投切电阻、支撑绝缘筒等，占比 15.3%，其中绝缘子故障占主导，绝缘拉杆与金属加工件故障占比也相对较高；装配缺陷也是诱发 GIS 突发故障的主要原因之一，占比 7.2%。

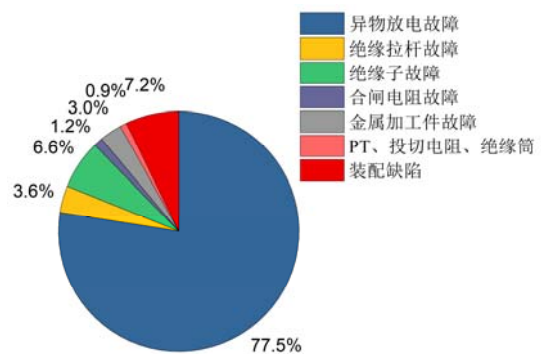


图 1 故障原因统计图

Fig. 1 Fault cause statistics

1.2 故障原因分析

基于上述故障统计结果，对相应的故障原因进行分析。①诱发异物放电故障的主要原因包括：盆式绝缘子水平布置、罐体尺寸较小导致绝缘裕度不足、人孔位置设置不合理、厂内清理执行不到位、现场清理执行不到位、充气时混入异物、现场安装环境不良、运动部件摩擦产生异物、润滑脂涂覆工艺不良等。②诱发绝缘拉杆故障的主要原因包括：绝缘拉杆内部缺陷、绝缘拉杆与金属端部连接不牢固、绝缘拉杆抗压

能力设计不足等。③绝缘子问题在设备运行、基建新投、交接试验及出厂阶段均有发生，诱发绝缘子故障的主要原因包括：环氧树脂与金属嵌件结合不紧密、绝缘子生产工艺不良、储存不当导致绝缘子失效等。④合闸电阻问题均发生在运行阶段，诱发合闸电阻故障的主要原因为设计不良。⑤金属加工件问题仅出现在设备运行及基建新投阶段，诱发金属加工件故障的主要原因包括：尺寸加工偏差、焊接质量不良、镀层质量不良等。⑥装配缺陷问题主要在设备运行、基建新投、交接试验阶段发生，故障形成的主要原因包括：螺栓紧固不良、触头装配不良、法兰螺栓防水胶涂抹不严、动触头导向环开口处破损、结构设计不良、组部件装运不良、安装人员不了解设备特殊结构等。

为尽可能压降上述故障发生的次数，在异物管控方面，要坚持“堵疏并用”的原则，罐体尺寸过度小型化的方式是不可取的；在关键组部件管控方面，有必要在厂内开展绝缘拉杆强光照射与逐支耐压检测、防止合闸电阻片机械损伤，零部件经过水洗后烘干等措施；在装配制造方面，尽管制造厂家均已对装配作业人员进行了严格的培训管理，但装配缺陷问题仍时有发生。当前，GIS 装配环节的人工比例过高，有必要引入分装自动化装配设备，尽可能减少人为介入，进一步压降装配缺陷故障。

2 GIS 异物防控技术

2.1 GIS 异物的产生

现阶段 GIS 内部异物放电是导致 GIS 故障的主要原因之一^[1-3]。目前，国内外对超/特高压 GIS 异物防控技术已有一定的研究基础，但仍存在诸多问题：①在 GIS 零部件生产制造过程中，现有的异物清理工艺对不同设备厂家同类典型零部件的有效性和适应性不明确，缺少 GIS 典型零部件表面异物清理工艺规范性文件，零部件制造环节存在表面残留异物。②在 GIS 运行过程中，金属与非金属、金属与金属零部件之间会产生滑动摩擦运动进而导致机械磨损，凸起的部分被割裂形成硬质颗粒状异物；③GIS 现场安装防尘除尘工作不彻底，厂内装配和现场对接环节易出现装配工艺质量不良、装配环境的无尘化监测不到位、装配流程标准化程度低、现场对接清理不彻底等问题，从而造成 GIS 内部的异物残留。

2.2 GIS 异物的防控

GIS 典型零部件的异物防控方法主要包括焊接导体高压水清洗、超声波清洗、不锈钢屏蔽电化学抛光、铸造导体涂漆处理、无尘布擦拭等，这些方法的异物去除率高，为异物防控提供了一定的技术手段。其中，

对于无尘布擦拭材料时伴随的静电吸附异物难题，以往多采用蘸取酒精擦拭的方式，这虽然能在一定程度上消除材料表面的静电残留，但会同时带来颜料脱落问题。针对静电残留现象，相关厂家提出了无风式离子中和器方案，研制了现场除静电装置，并完成了除静电效果厂内验证见图 2、3，具备工程应用条件。

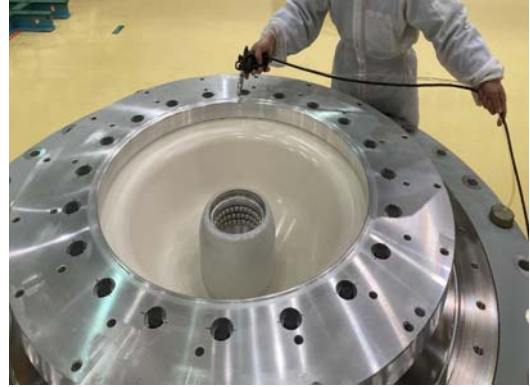


图 2 厂内装配除静电装置

Fig. 2 Electrostatic removal devices installed in the factory



图 3 现场安装无风式除静电装置的实物验证

Fig. 3 Physical verification of the wind-free electrostatic removal device installed in the field

对于 GIS 运行中的机械磨损产生异物这一问题，国内相关制造厂对各自生产的超/特高压 GIS 样机开展了机械操作磨合试验，结果表明，异物增量趋势随 GIS 操作次数较快收敛，不同型号产品的收敛特征、异物的分布位置等均存在差异，预期成果可为超/特高压 GIS 的出厂试验异物点检提供指导。

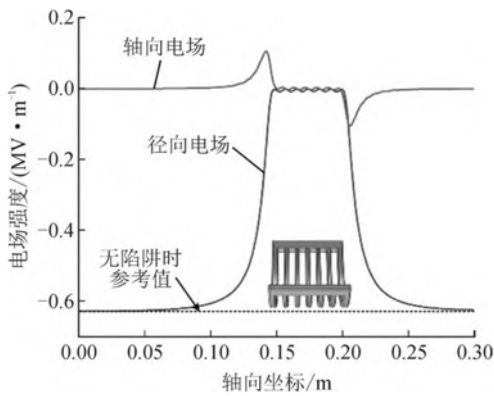
3 GIS 微粒抑制技术

3.1 微粒陷阱抑制技术

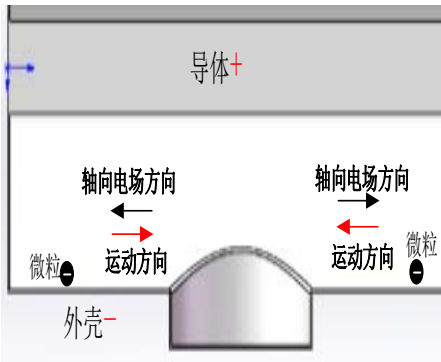
微粒陷阱是抑制 GIS 内部金属微粒的重要技术手段^[4-6]。微粒陷阱的研究大致可以追溯至 1999 年，意大利学者 Sergio La Chimia 和 Vittorio Zaninelli 提出了利用电场陷阱抑制金属微粒运动的方法。德国学者 Yasser Abdalla 和 Dieter Nehls 在 2004 年，提出了基

于极化层和聚合物填充物的金属微粒陷阱设计。2016年英国学者 Omar Al-Badri 和 Yunus Shaik 探索了利用纳米表面结构和电场来捕获和固定金属微粒的方法。2019年西班牙的 Alberto Serrano 和波兰的 Mateusz Radecki 提出了一种利用纳米材料和孔隙结构的金属微粒陷阱设计方案。2020年华北电力大学的王健等人提出了基于楔形槽孔结构的栅格微粒陷阱,该陷阱通过提高金属微粒在陷阱中的碰撞次数来减小微粒的运动速度,该方法有效降低了入陷微粒的逃逸风险^[7]。2023年华北电力大学的耿秋钰等人提出了针对盆式绝缘子凸面侧的栅格型与拔孔型陷阱的协同布置方法,为特高压 GIS 中盆式绝缘子附近金属微粒的有效抑制提供了新思路^[8]。

对于微粒陷阱的抑制效果,有学者建立了微粒捕获仿真模型,通过模拟微粒捕获过程,对微粒陷阱的结构和关键参数进行优化,进而提出了 GIS 不同型式微粒陷阱的差异化设计方案,结果见图 4。针对凸起式微粒陷阱,优化提上高度、槽孔尺寸、覆盖圆周角范围;针对凹陷式微粒陷阱,加强表面轴向电场,优化陷阱直径、深度。



(a) 凸起式陷阱



(b) 凹陷式陷阱

图 4 不同形式微粒陷阱的仿真分析

Fig. 4 Simulation analysis of different types of particle traps

3.2 表面覆膜抑制技术

对于表面覆膜的研究可以追溯至 1944 年,日本的 Ooishi、Hasegawa 等人分别研究了平板电极和同轴圆柱电极覆膜对金属微粒启举特性的影响规律。1986年,瑞典的 Jan Olov Aidanpää 在文中提出了通过静电作用抑制金属微粒运动的概念。2002年日本的 Sakai 等人对覆膜电极表面微粒的带电量进行了测量,发现交/直流电压下,微粒的带电量分别为未覆膜时的 20%~85%和 45%~80%。2008年西安交通大学的贾江波等人仿真分析了有无预埋电极时,绝缘子附近金属微粒在水平方向的受力情况,发现预埋电极可增强绝缘子附近远离绝缘子方向的轴向场强,使微粒受力指向背离绝缘子的方向,以实现绝缘子附近自由金属微粒的有效驱除^[9]。目前的覆膜设计多从改善内表面粗糙度等角度出发进行配置,对于微粒抑制方面缺少有效性验证及适用于实际工程的优化设计方案,其有效性与长期服役可靠性有待进一步验证^[10-12]。

为进一步推演 GIS 覆膜的微粒抑制机制,相关学者建立了覆膜抑制金属微粒的理论分析模型,结果见图 5。根据电荷测量结果可知, GIS 覆膜会延缓表面微粒的荷电进程,进而达到抑制微粒的目的。同时开展验证试验,实测覆膜表面微粒荷电量,验证了微粒充电和覆膜抑制理论模型的准确性。

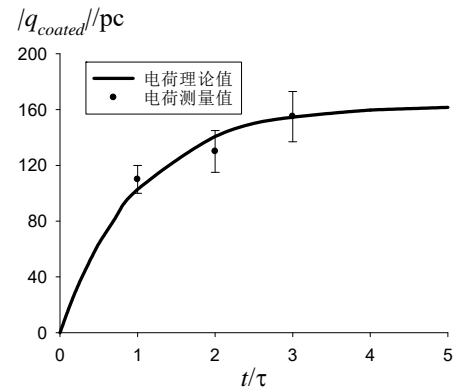


图 5 覆膜抑制试验结果验证

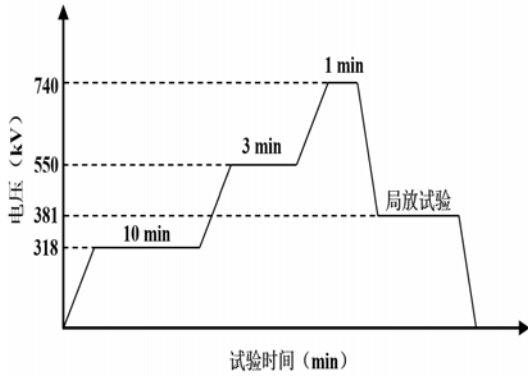
Fig. 5 Verification of coating inhibition test results

4 GIS 绝缘试验技术

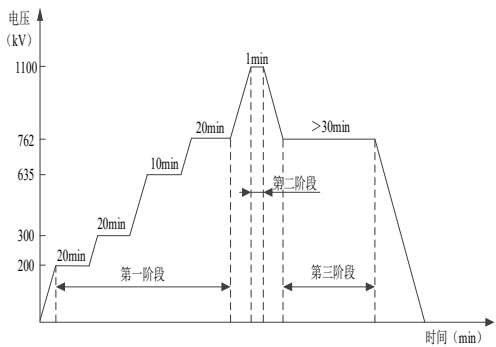
4.1 GIS 常规绝缘试验优化

常规 550 kV 和 1 100 kV GIS 的现场耐压试验加压流程见图 6,超/特高压 GIS 放电呈“隐密潜伏、极速突发”的特征,常规绝缘耐压试验为静态耐压,对潜伏性缺陷存在盲区。目前,常规的 GIS 绝缘试验主要有工频耐压、局部放电、冲击耐压等,但其对缺陷放电的激发效果有限,仍可能存在漏检潜伏性缺陷的风险,即使 GIS 通过了工频和雷电冲击耐压试验,但考虑到实际开关操作时的运行工况极为复杂,缺陷仍有

可能被激发引起放电故障^[13-14]。究其原因，主要是开关操作时会伴随形成复杂的电磁暂态过程，包括机械振动、快速暂态过电压、直流残压等物理效应，这些因素和运行电压叠加时，易激发缺陷发生放电，但常规的工频耐压、冲击耐压试验无法模拟和有效考核开关操作工况下的绝缘性能^[15-16]。故在常规加压阶梯的基础上，可以明确老练试验阶梯加压设置原则，在额定相电压下设置 2-3 档次级阶梯以实现微粒无害化抑制，额定电压下适当延长加压时间以提高老练效果。



(a) 550 kV GIS



(b) 1100 kV GIS

图 6 550 kV 和 1100 kV GIS 现场耐压试验的加压流程

Fig. 6 Voltage application process of on site withstand voltage test of 550 kV and 1100 kV GIS

4.2 带电操作、外施冲击等绝缘试验

GIS 开关带电操作下会不可避免地造成外壳及其内部零部件的剧烈振动，可能对 GIS 中金属微粒产生很强的运动激发作用，从而形成微粒诱发放电现象。对某特高压站 1100 kV GIS 断路器合闸、分闸操作时，灭弧室处的最大振动加速度进行测量，见表 1，发现分闸最大振动加速度可达 81.4g(单位: m/s^2)。同时，采用快响应的加速度传感器在制造厂内对特高压 GIS 断路器操作产生的冲击振动幅值进行了测量，发现冲击振动幅值均可达数十倍的重力加速度，见图 7，其对金属微粒的运动激励作用显著，甚至超过微粒所

受到电场力的启举作用。

表 1 1100 kV GIS 断路器操作振动加速度测试结果

Table 1 Vibration acceleration test results of 1100 kV GIS circuit breakers under operation

设备编号	灭弧室最大振动加速度/g			
	A 站		B 站	
	分闸	合闸	分闸	合闸
1	72.8	30.2	78.1	30.1
2	67.9	29.3	75.0	29.5
3	76.0	30.4	76.8	30.3
4	81.4	29.4	78.1	29.2

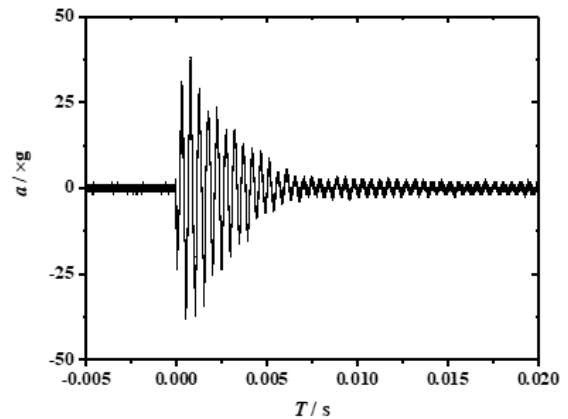


图 7 带电操作时特高压 GIS 断路器壳体表面冲击振动波形

Fig. 7 The impact vibration waveform appearing on the surface of UHV GIS circuit breaker shell during live operation

当 GIS 带电操作后，壳体的冲击振动加速度幅值超过一定值时，微粒可以凭借壳体的冲击力克服自身的重力，直接脱离 GIS 壳体表面进行飞行运动，并释放出显著的局部放电信号，从而可通过超声监测等技术手段发现金属微粒，微粒甚至也可以直接诱发 GIS 绝缘的贯穿性放电^[17-19]。

考虑到 GIS 中大尺寸、高密度材质(铜或银等)的异形金属微粒具有潜伏性和随机性，GIS 开关操作产生的冲击振动可以有效地激励潜伏性金属微粒起跳运动，并释放出局部放电信号，这为 GIS 缺陷的局放检测试验有效性提升提供了新思路。

尽管现有研究在缺陷的模拟和检出技术方面获得了很多有意义的结果，但在研究模型、缺陷模拟的等效性、潜伏性金属微粒的复现方式以及缺陷诱发局部放电信号特征分析等方面有待进一步研究。具体来说，仍需开展微粒形成原因研究，同时提出证明微粒潜伏性存在的方法，进而明确超/特高压 GIS 设备运行过程对潜伏性金属微粒的影响及其诱发的放电特征，以便更好地将研究结果指导实际工程应用，实现

生产、检验以及带电检测全过程可控。

5 GIS 关键组部件可靠性

5.1 绝缘拉杆

GIS 设备关键组部件众多，包括绝缘拉杆、合闸电阻、盆式绝缘子、瓷套等，任一组部件质量管控不良都有可能导致 GIS 发生放电故障。其中，绝缘拉杆是 GIS 绝缘系统中的薄弱环节之一，其击穿和炸裂事故时有发生，见图 8，严重影响了 GIS 设备的安全运行^[20-21]。特高压绝缘拉杆基本依赖进口，性能考核指标有待完善，现有质检手段对绝缘拉杆内部可能存在的气孔、分层等微缺陷的检出率不高^[22]。即使是目前主流的绝缘拉杆制造厂商，其绝缘拉杆依然存在较高的故障概率。因此，有必要研究特高压绝缘拉杆生产制造关键技术，探索绝缘拉杆内部绝缘劣化机理，测量其在操作过程中的受力特性，完善相关质量检测控制指标，实现特高压绝缘拉杆的国产化。



图 8 GIS 绝缘拉杆炸裂故障

Fig. 8 Explosion fault of GIS insulating rod

目前，主要从材料配方体系及制备工艺、故障反演、动力学分析等方面对 GIS 断路器的绝缘拉杆开展了研究。玻璃纤维环氧树脂复合材料和芳纶/聚酯纤维环氧树脂复合材料是两种主要的绝缘拉杆生产用料。侯亚峰等人对环氧树脂—芳纶体系的凝胶时间与粘度等参数开展了研究，确定了满足工艺要求的环氧树脂配方体系^[23]。王睿等人则从环氧树脂配方体系的拉伸、压缩、弯曲强度及理化性能等方面开展了研究^[24]。杨威等人采用真空浸渍工艺制备了芳纶绝缘拉杆，并进行了综合性能测试^[25]。在玻璃纤维环氧树脂复合材料方面，范孝红等人采用无丝粘接工艺，研制了玻璃布-聚酯纤维卷绕的绝缘拉杆成品^[26]，但上述研究并未充分考虑绝缘拉杆长期运行下电、力的联合作用^[27]。为此，相关学者进一步从绝缘拉杆的动力学特性入手，采用仿真分析的方法研究了断路器分、合闸过程中的瞬态行程曲线及受力情况，相关研究成果可为断路器的设计、强度校核与产品研发提供指导^[28]。此外，研究学者提出了环氧—纤维复合材料界面相容性表征方法

和协同提升方法；掌握了电-机械应力作用下环氧—纤维复合材料内部电树枝生长规律，提出绝缘拉杆“机电联合+分段加压”的局放测量方法见图 9；试制了国产玻纤拉杆并通过试验验证，后续将在黄石特高压交流工程试用。提高 GIS 绝缘拉杆的工作性能，是本领域国内外面临的重要问题，该问题的解决对于压降 GIS 绝缘故障，提升 GIS 设备的运行可靠性，具有重要意义。为加快推进绝缘拉杆国产化进程，需进一步开展特高压 GIS 国产玻璃纤维绝缘拉杆生产工艺稳定性提升研究，跟踪国产绝缘拉杆在试用工程中的运行表现，完善绝缘拉杆性能检测要求和手段。同时，开展特高压 GIS 芳纶纤维绝缘拉杆的结构设计与生产工艺关键技术研究。

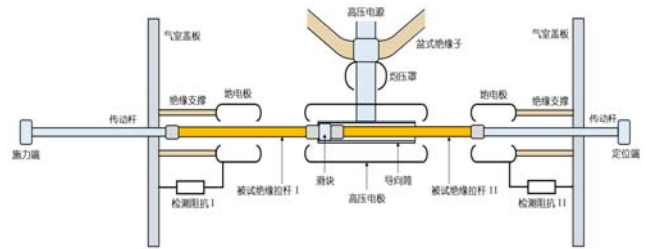


图 9 绝缘拉杆机电联合试验工装

Fig. 9 Electro-mechanical test equipment of insulation rods

5.2 合闸电阻

目前，GIS 合闸电阻严重依赖进口，存在卡脖子风险；电阻片损伤机理不明，电阻串结构设计仍需优化。因此，亟需开展断路器合闸电阻设计参数、损伤发展机理及影响因素研究，提出合闸电阻性能检测及裕度考核技术，开展合闸电阻国产化试制。目前，国内外学者研究探明了合闸电阻片表面镀层、石墨烧结材料、及外周绝缘层材料形貌和成份，掌握了电阻片的硬度、载荷承受力等机械性能；提出了合闸电阻串优化结构，提升了缓冲性能和预紧力见图 10。新结构电阻串已经通过了机械寿命、热容量等试验，并已在甘孜特高压交流工程应用。为加快推进合闸电阻国产化，在现有研究成果的基础上，仍需进一步掌握特高压断路器合闸电阻的机械设计、电气设计关键参数，获得各项性能满足技术指标要求的国产合闸电阻片核心配方和关键制造工艺参数，进而提出合闸电阻性能测试方法和长期考核试验方法，并开展长期考核试验。

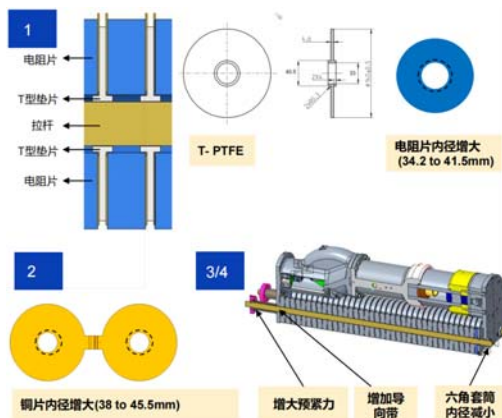


图 10 合闸电阻串结构优化方案

Fig. 10 Structure optimization scheme of closing resistor strings

5.3 盆式绝缘子

盆式绝缘子是 GIS 的关键组部件之一，运行时在电、热、力等物理场的共同作用下易出现应力集中，进而形成绝缘缺陷，严重时可导致漏气、局部放电、绝缘闪络和烧蚀等故障。盆式绝缘子的绝缘缺陷主要分为自身缺陷和运行缺陷两类，其中，自身缺陷为环氧材料在固化和脱模过程中形成的残余应力，运行缺陷为长期运行过程中因绝缘材料老化、运行应力振动、气体分解物及外部金属微粒等形成的气泡、异物、脏污以及裂纹等绝缘缺陷^[29-30]。国内外学者对盆式绝缘子绝缘缺陷的产生和发展机理进行了研究，发现生产工艺流程不完善以及环氧树脂与金属电极热膨胀系数的差异是气泡缺陷形成的主要原因；管控不彻底、机械操作磨合等产生的异物易在电场力作用下吸附至盆式绝缘子表面；GIS 运输、存储和安装过程中，由于工艺流程不严格或处理措施不完善，会导致绝缘子表面脏污；温度、绝缘材料固化工艺、运行振动等则会在盆式绝缘子表面形成裂纹。上述绝缘缺陷会引起盆式绝缘子表面电场分布集中和电荷积聚，进而形成局部放电与沿面闪络^[31]。综上，盆式绝缘子绝缘缺陷所造成的电场畸变及其动态变化异常复杂，放电发展过程中绝缘子表面电荷的演化过程仍不明确。

为尽可能掌握上述缺陷的发展过程，相关学者开展了盆式绝缘子的缺陷检测方法研究，并取得了行之有效的成果。制造厂商一般通过水压试验考核 GIS 盆式绝缘子机械强度，西安交通大学、西安高压电器研究院、中国电科院、华南理工大学等先后采用不同形式的应变片、布拉格光纤光栅、超声等方法对盆式绝缘子的应力进行检测^[32-34]。此外，采用 X 射线探伤和工业 CT 扫描可实现气泡缺陷的有效检出；通过检测缺陷诱发的局部放电，是反映缺陷信息的重要手段。

考虑到激励局部放电的电压模式也会影响缺陷检测，为提升缺陷检出的灵敏度，相关研究人员分别在标准雷电冲击、振荡雷电冲击、高频电压下开展了局部放电特性及相应的缺陷诊断研究^[35]。然而，冲击电压形成过程所伴随的电磁信号会干扰局部放电检测，这会导致该方法的现场应用存在一定的局限性，有必要进一步探索更为合适的激励局部放电的电压模式。

5.4 瓷套

瓷套具有优良的绝缘和机械性能，且化学稳定性好，被广泛应用于 SF₆ 气体绝缘套管、高压断路器等设备。以 SF₆ 气体绝缘套管为例，瓷套性能的优劣直接影响了 GIS 的正常运行。然而，套管瓷套开裂事故时有发生，给电力系统的正常运行及人身安全带来了严重危害^[36]。考虑到瓷套多直接暴露于外界，更易受到外部环境的影响，雨水浸湿与环境温度变化可能会导致体积变化，进而改变原有的应力分布，引起防水胶脱开、下法兰胶装偏心引起的孔中心偏移等，造成瓷套开裂^[37]。此外，套管装配不当，也会引入异物，导致 SF₆ 气体绝缘套管放电。目前，主要采用宏观检查、超声波检测、尺寸检查、孔隙性试验、X 射线光电子能谱分析、有限元仿真计算等方法，从材料、结构和环境等角度对瓷套的开裂进行检测^[38]。

6 GIS 故障预警

6.1 GIS 长时局部放电监测技术

GIS 长时局部放电监测技术主要包括特高频法、超声波法、常规电测法等，声学检测适宜于现场检测，而特高频法可用于长时在线监测^[39]。因此，目前特高压 GIS 局放在线监测系统大多采用特高频法^[40]。特高频局放监测是通过采集局放脉冲在金属封闭空间内激起的多重宽带共振特高频信号，经过传输、放大送入到频谱仪及计算机，采用软件进行分析，得到局放图谱后进行对比分析，从而判断故障原因和严重程度。特高频局放传感器分为内置式和外置式 2 种，与内置式传感器相比，虽然外置式传感器灵敏度相对较低，但便于移动和故障定位，也不会影响内部的电场分布^[41]。针对 GIS 特高频方法在线监测设备，目前侧重于设备传感器及系统参数的校验和评估，并未涉及现场放电检测策略。另一方面，现有在线监测装置采集能力有限，受限于设备性能，信号采样率不超过 200 MS/s，无法采集原始特高频信号分析，只能采集检波波形。较低的采样率使得长时在线监测难以精确定位并确诊局放缺陷。

超声波局放检测也是 GIS 带电检测常用的手段。该方法主要通过识别 GIS 设备内部放电伴随的冲击

振动和声音,来实现局部放电的测量与定位。考虑到测量传感器与GIS设备无电气连接,因此该方法具有较好的抗电磁干扰能力,但易受到现场环境噪声和设备机械振动的影响。由于超声信号在绝缘材料中存在较大衰减,导致其检测灵敏度和范围有限。目前,实际工程中常常采用特高频与超声波检测技术相结合的方法来进行GIS长时局放的监测,以期从多角度尽可能准确地发现局放信号,并对放电部位进行定位。

与长时局放不同,在对GIS表面缺陷放电过程检测中,局部放电多表现为偶发特性,3~5 min的采样时间间隔可能漏掉偶发脉冲,脉冲数低于每秒10次不能构成有效事件信号被丢弃。这些都说明现行的GIS设备局部放电在线监测策略对GIS绝缘沿面缺陷的检出率非常低,对偶发局部放电特性缺少足够的考虑,导致漏检和漏告警。

6.2 GIS 偶发局部放电带电检测技术

6.2.1 GIS 局部放电特高频检测方法

以往研究中对GIS特高频检测的研究主要集中在特高频传播特性、传感器优化、信号识别、以及多源信号分离等方面,针对的都是典型显著缺陷的频发局放信号。现场运行经验表明,现有技术检出的多为螺栓悬浮和大金属颗粒等局放信号强、重复性好的缺陷,而对频繁发生的GIS绝缘沿面缺陷几乎没有检出。现有的GIS局放缺陷特高频检测和诊断需要有大量频发的局放信号支撑,仅当检测到的局部放电信号幅值超过背景干扰阈值、脉冲数量达到一定次数、放电累计图具有较明确的相位特征时,才能识别和诊断。而对于偶发性较强、放电幅值小的GIS绝缘子沿面局部放电而言,由于其特征不明显,则很难识别,往往被误判为干扰见图11。

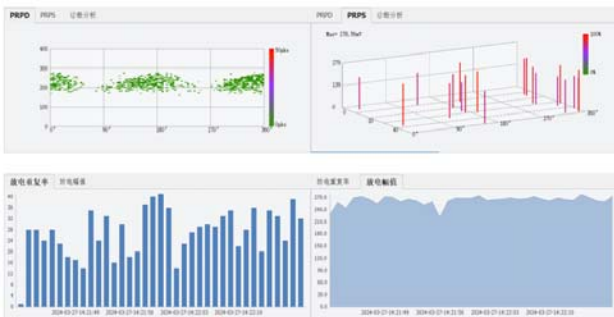


图 11 偶发局部放电信号

Fig. 11 Accidental partial discharge signal

现有特高频带电检测时间短,缺乏有效的局放识别和干扰抑制手段,微弱偶发信号检测能力亟待进一步提高。

6.2.2 GIS 局部放电超声检测分析方法

现有研究中对超声检测方法的研究主要集中在

传感器设计、局放特性、降噪算法等方面,通过引入光纤超声传感器来提高超声检测的灵敏度,引入各种滤波降噪算法实现超声信号提取。但目前的超声信号降噪算法只能在超声检测到信号的前提下提高信噪比,而无法提取淹没在噪声背景中的微弱超声信号,对实际微弱超声信号检测帮助有限。在声电联合检测方面,主要通过特高频和超声信号同步检测,分析声电信号特征,进行干扰抑制、模式识别以及局部放定位等,特高频和超声信号之间的联合分析较少,仅限于定位时差计算,没有从本质上提高超声法对局放微弱信号的检测能力,当超声信号淹没于噪声中时难以通过声电联合精确定位^[42-45]。为此,亟需针对GIS偶发微弱局放信号,研究基于多通道逻辑触发的特高频全脉冲偶发局放检测分析方法,研究基于声电联合的高灵敏微弱超声局放检测分析方法,提高偶发微弱局放检测能力;提高局放源定位分析水平;研究GIS偶发局放特高频局放源高精度快速定位电磁场仿真技术。提高GIS少脉冲、小脉冲局放信号的检测诊断能力,初步实现GIS局放缺陷的高精度定位和危险程度评估。

6.3 GIS 非电量检测技术

6.3.1 SF₆分解产物富集和检测技术

现有研究大多采用了吸附剂低温吸附、高温解吸的方法,富集的分解产物主要为SO₂F₂和SOF₂,其富集倍数较低。也有部分研究采用冷阱富集方法对SO₂F₂、SOF₂、SOF₄、S₂F₁₀O和SO₂进行富集,但无法对含碳类分解产物进行有效富集。此外,现有富集方法或富集装置大多局限于实验室,无法开展现场应用。基于光声光谱原理的SF₆分解产物在线监测技术在检测灵敏度和现场复杂环境适应性等方面仍有待提升^[46-49]。

6.3.2 X射线高分辨成像检测技术

X射线具有极高的穿透能力,当其辐照被测物时,由于被测物不同位置对X射线的吸收能力不同,导致X射线透过物体后到达探测器表面的强度不同。基于该原理,通过调控X射线探测器输出信号的强弱,形成明暗交错的图像。利用该方法可有效发现GIS内部螺栓脱落,触头不对中等“安装缺陷”,还可实现绝缘拉杆、盆式绝缘子等绝缘件内部气泡/微裂纹等“绝缘缺陷”的有效检出。根据测量方式的不同,X射线探测器可分为直接型和间接型两种。间接型X射线探测器主要利用闪烁体在吸收X射线后,激发到高能态的电子在退激发过程中会产生紫外或可见光,通过后端的阵列光电探测器可实现光信号到电信号的转变;直接型X射线探测器吸收X射线后,

内部电离产生电子-空穴对，载流子在外电场作用下定向漂移，进而被接受电极捕获并形成电信号。相比于间接型，直接型探测器的像素串扰问题较少，理论空间分辨率更高，有利于获得更清晰的成像效果。考虑到电力设备体积一般较大，受成像板的尺寸限制，难以将设备的整体情况显示在同一张图片上，目前主要通过通过对设备局部进行分段拍摄，再将局部图像进行拼接的方式，获得被测设备整体的 X 射线图像。因此，图像处理技术也是当前的主要研究方向之一。

6.3.3 触头温升感知技术

GIS 内部的母线导体连接触头、隔离开关触头等在接触不良的情况下会表现出接触电阻增大，进而产生很高的热量。当温度接近金属熔点的时候，导体开始变软、熔化，滴落的金属液滴易引发严重的短路故障。实测表明，通过 SF₆ 分解物和局部放电的测量来提前发现触头过热导致的绝缘故障是十分困难的。为此，国内外学者对如何提前发现 GIS 内部触头过热问题开展了大量的研究工作。目前，GIS 触头温升的检测方法主要包括红外辐射测温、红外热诊断技术、光纤光栅测温技术、光纤半导体测温技术、分布式光纤测温技术及多场耦合仿真技术等^[50-52]，可较为有效的实现 GIS 触头温度的测量，但在经济成本、长期运行可靠性、基于多参量的触头温度计算方法及故障识别、触头温度与电力系统信息交互等方面仍有较大的提升空间。同时，考虑到 GIS 金属外壳的屏蔽作用，导致内触头温度的无线测量较为困难，温度无线感知技术为 GIS 触头温度的测量提供了新思路。国网辽宁电科院研制了一套 GIS 内触头温度无线感知系统，并开展了一系列局部过热无线感知试验，验证了该系统的可信性^[53]。

6.3.4 气室压力检测技术

GIS 气室内部压力不仅能够衡量设备密封性能的好坏，还与绝缘的放电过程紧密相关。压力密度表的采样精度较高，可以较为准确地捕捉气室内部的压力变化。通过对近期荆门站某 110 kV GIS 隔离开关故障时的压力分析可知，隔离开关静侧盆式绝缘子凹面侧因绝缘缺陷形成电流通路，随着感应电流对盆式绝缘子的反复烧蚀，产生的热量通过静侧盆式绝缘子的中心嵌件逐渐传递至隔离开关导体，这会使隔离开关的气室压力逐渐升高；此外，多次的感应电流烧蚀还可能导致盆式绝缘子的密封失效，进而造成气室压力的降低。进一步，将故障隔离开关放电过程的解体分析与经气室压力变化得到的分析结果相对比，发现二者具有较好的一致性，表明通过 GIS 气室压力的监测有助于提升 GIS 放电故障判断的时效性和准确

性，这对 GIS 的故障预警帮助很大。

6.4 GIS 综合预警策略及故障诊断技术

6.4.1 基于 SF₆ 分解产物的设备评价技术

当 GIS 设备内部存在局部放电或局部过热等缺陷时，长期作用下会导致 GIS 设备绝缘的失效老化，甚至发生严重故障。因此，有必要研究 SF₆ 气体绝缘 GIS 设备局部放电和局部过热等缺陷的监测方法，提取能够表征设备缺陷的特征量，通过对这些特征量的监测可以及时发现并排除设备内部早期局部过热，阻止早期缺陷进一步发展恶化，确保 GIS 设备长期安全稳定运行。

研究表明，局部放电或局部过热等缺陷可致使 SF₆ 气体分子化学键发生断裂并生成低氟化物^[54]。如果 GIS 设备内充满的 SF₆ 纯净无杂质，这些低氟化物又可还原为 SF₆。然而在生产制造和装配运输的过程中，GIS 气室难免会渗入一部分微量的水分、空气等，它们可与 SF₆ 裂解后的低氟化物发生化学反应，生成复杂的化学产物。因此，只需要监测气室中是否有分解产物产生，即可判断有无相关故障发生。该检测法属于非电测法的一种，不受电磁干扰，可实现故障气室的简单定位。

6.4.2 GIS 特高频在线监测大数据分析技术

目前，GIS 特高频在线监测装置厂家主要包括英国 DMS、上海莫克、上海格鲁布、武汉朗德、广州安电等，其中 DMS 局放监测装置占比 46.31%，莫克局放监测装置占比 39.30%，其余厂家占比较低。系统在开发研制过程中，一般选取合适的开发环境，以保证应用软件的平台通用性。选择合适的开发工具可以减小系统开发难度，加快开发进度。此外，各类在线监测装置型号与在线监测数据文件种类繁多，包括 PDMG-RH、EC-3000、NCT-M 等 10 余种型号，以及“.dat”、“.tdms”、“.sig”、“.dan”、“.ced”、“.cei”等多种数据格式，但实际传输某厂家的在线监测数据时，数据库中包含了整个变电站环境文件、全部传感器的系统参数配置、数据获取与显示参数、事件管理规则、数据库监控配置和规则等大量复杂重复文件，且每种格式的数据文件仅能通过该厂家的在线监测软件打开解读，单一变电站的平均数据增量达到 0.6 TB/年，难以直接读取调用，对局放缺陷的横向比对与历史分析造成了较大困难。

为提升 GIS 综合预警策略及故障诊断技术水平，亟需研究基于先验知识和标准化结构数据的特高频在线监测偶发局放告警策略优化技术；研究基于 ppb(1 ppb=1×10⁻⁹)级 SF₆ 气体分解产物特征组分的特高压 GIS 缺陷诊断的适用性，研究基于运行 GIS 设备

中 ppb 级 SF₆ 气体组分检测/监测数据的 GIS 典型缺陷诊断方法, 提出特高压 GIS 设备内部 SF₆ 气体组分检测/监测技术方案及缺陷预警方法。融合局放、气体、X 射线、触头温升、气室压力变化等综合检测技术, 研究基于在线监测与带电检测功能互补的 GIS 放电故障预警策略。

7 GIS 全寿命周期健康评估

7.1 全工况试验平台

针对 GIS 全寿命周期健康评估, 国内高校和科研机构搭建了若干试验平台, 开展了大量工作。许渊、刘卫东等建立了 126 kV 局部放电试验平台, 配置工频电源和一段直母线, 以 126 kV 盘式绝缘子为试品, 以 0.5、2、5、8、10 mm 的金属微粒作为缺陷模型, 研究了微粒长度对局放特性的影响^[35]。张施令建立了 220 kV SF₆ 气体绝缘 GIS 真型试验平台, 在管道上设置观察窗, 探查高电压条件下 GIS 管道内部可见火花放电情况, 并在该处安装特高频传感器, 用于对管道内局部放电测量^[55]。牛勃、孙尚鹏等建立了 363 kV 真型 GIS 测试回路, 配置工频电源和 1 相真型 363 kV 断路器, 研究获得了不同操作次数下的微米级微粒及粉尘的分布规律, 并通过工频耐压试验验证了存在微米级微粒的状态下 GIS 设备的绝缘裕度^[56]。杨宁、毕建刚等设计了 1 100 kV GIS 真型试验平台见图 12, 配置了工频电源, 试品为一段 L 型母线腔体, 研究了金属尖端、悬浮电位、自由金属微粒、绝缘件内部气隙及表面污秽缺陷放电特征^[57]。以上为研究 GIS 缺陷放电特征和微粒影响等目的而搭建的试品平台, 其回路布置、试品结构、电源类型均较为单一, 均为特定目的而搭建的有针对性的平台, 无法模拟实际产品在实际带电操作工况下的电场状态, 也无法进行工频叠加冲击、直流残压叠加冲击等复合激励下的试品绝缘性能研究。

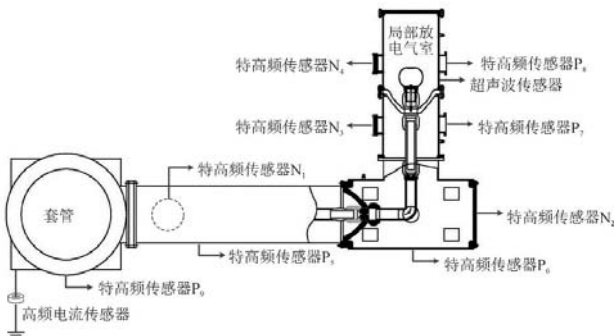


图 12 1 100 kV GIS 真型试验平台

Fig. 12 1 100 kV GIS true type test platform

综上所述, 前期试验研究大多采用缩比模型或低

电压等级样机开展模拟试验, 且其回路布置、试品结构、电源类型均较为单一, 无法模拟实际产品在实际带电操作工况下的电场状态, 也无法进行工频叠加冲击、直流残压叠加冲击等复合激励下的试品绝缘性能试验, 难以反映 GIS 的实际运行条件、复杂绝缘结构和尺度效应, 使得研究结果和据此提出的治理措施对于实践的指导作用有限, 实际上也未能在缩比模型上复现场运行故障, 无法深入研究检测手段、试验方法及抑制措施等。鉴于此, 为系统解决超/特高压 GIS 放电研究的难题, 提升绝缘可靠性, 有必要建设超/特高压 GIS 全工况真型试验平台, 模拟断路器开合空载母线、隔离开关开合短母线等复杂工况的过电压特性, 以及现场典型操作工况的交/直流运行电压叠加冲击电压的试验能力。中国电科院正在开展超/特高压 GIS 全工况试验平台建设, 以期为 GIS 放电问题治理提供基础设施, 为复杂放电问题研究提供手段。

7.2 长期带电考核平台

长期带电试验对电气设备的影响具有累积效应, 与绝缘短时耐受电压试验、动热稳定试验等的考核侧重点存在差异, 国内外均对开关设备的长期带电性能开展过大量研究。在 GIS 交流长期考核方面, 国内 XIHARI 在常州市建设了 1 100 kV/10 kA 交流长期带电试验回路, 可满足 1 100 kV/10 kA 及以下电压等级交流 GIS 设备的全工况长期带电试验, 同时兼顾部分型式试验和研究试验。国网公司在武汉凤凰山建设了特高压交流试验基地, 可开展特高压电气设备长期全电压、大电流带电考核试验等研究。在 GIS 直流长期考核方面, 中国电科院联合平高集团开展了直流 GIS 长期带电考核试验方案研究, 提出了包括 4 000 A 直流热效应的重载等效试验, 并论证了该方案的可行性^[58]。西安西电开关电气有限公司联合西安交通大学开展了±550 kV 直流 GIS 长期带电试验研究, 基于多物理场耦合仿真结果, 提出长期带电试验方案, 并完成了样机设计见图 13^[59]。此外, 南网特高压工程技术国家工程实验室可进行直流±800 kV、交流 1 100 kV 及以下电压等级电气设备的长期带电试验研究和高海拔户外绝缘试验研究, 为解决高海拔地区特高压安全运行问题提供了技术支撑^[60]。

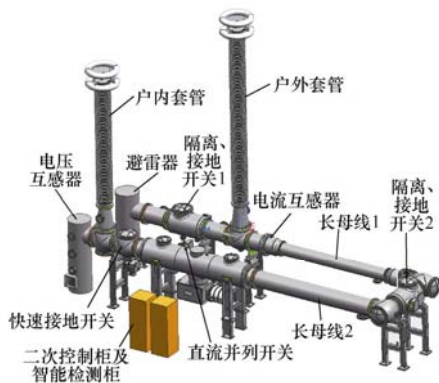


图 13 ±550 kV 直流 GIS 长期带电试验样机

Fig. 13 ±550 kV DC GIS long live test prototype

上述知名试验研究机构花费了大量的人力和资金建设的长期带电模拟试验场,虽取得了若干带电考核研究成果,但其试验平台均未考虑断路器开合空载母线、隔离开关开合短母线等带电操作情况,且对开关设备长期带电考核过程状态的检测方式不足。综上,有必要建设超/特高压 GIS 长期带电考核试验平台,可具备开展研究长期运行条件下断路器开合空载母线、隔离开关开合短母线等复杂工况下过电压特性的能力,以及完好产品、缺陷产品、改进产品等设备的长期带电考核试验,并配备过电压、局放等多类型状态检测手段。为此,中国电科院正在构建超/特高压 GIS 长期带电考核试验平台,为对开关设备的状态检测,验证故障分析结果和改进措施有效性提供有力支撑。

7.3 全寿命周期管控

对于 GIS 全寿命周期管控,目前主要从推动 GIS 管理模式从事后处置向事前预防转变,探索实践 GIS 健康管理和以可靠性为中心的状态检修等方面开展了工作,并取得了一定的成效。但近年来 GIS 故障次数有所反弹,暴露出设备故障认知、状态评估、检修决策等健康管理方面仍存在短板:①设备厂家关键组部件管控不严、装配工艺标准执行不到位等问题频发, GIS 故障机理研究、全寿命质量管控等亟需加强;②设备状态精准感知能力亟待提高, GIS 局放类监测装置现场抗干扰措施、告警阈值等有待优化,监测有效性、准确性需进一步提升;③设备健康管理和检修策略仍需优化,现有健康评估模型缺乏通用性,设备状态难以准确评估,“何时修、修什么、怎么修”决策缺乏规范依据,迫切需要深入推进以可靠性为中心的状态检修。

面向存在的问题和短板,深化现代设备管理体系建设对 GIS 全寿命健康管理提出了新的期待。一方面,设备健康管理作为体系中实物管理提升的核心,

尽管前期在可靠性评估、检修策略库等方面进行了探索研究,但总体进度滞后于体系建设,需加快推动从以往侧重于设备运维检修阶段的传统管理方式,向注重全寿命管控、全方位感知的健康管理方式转变。另一方面,由于缺少配套的管理保障机制,没有有效建立技术政策主导权, GIS 全寿命周期质量管控措施在前端难以有效落实,需要全面预控设备本质安全基础不牢与电网高可靠要求间的矛盾、新旧设备“浴盆曲线”与业务资源匹配之间的矛盾、设备状态评估不全面与精准运检策略实施之间的矛盾、各类风险有效平衡与隐患治理闭环之间的矛盾风险,树立设计、制造、装配等环节以可靠性为中心的思路,强化基础研究,降低对生产工艺提出的特殊要求,保障设备健康水平可控在控。

为提升全寿命周期管控措施,全面推进现代设备管理体系建设,国网部分省市公司开展了 RCM 试点应用,积极推动数字化管理转型,初步建立了基于全寿命周期的 GIS 设备质量管控体系。在此基础上,为切实提升 GIS 全寿命周期健康评估能力,需进一步细化管理职责分工,强化状态管控能力,聚焦 GIS 关键组部件,完善出厂、交接、预防性试验的规程修订,推进 GIS 生产制造的高端化、智能化、绿色化,加快 GIS 高灵敏局放在线监测新技术的试点应用,做好早期异常监测预警和应急处置;推动设备差异化运检,充分结合高海拔、大温差、沙尘等不同环境,动态更新 GIS 针对性运检策略,细化断路器开断短路电流等不良工况下的运检措施,推进以可靠性为中心的检修,完善 GIS 健康评价模型,开展可靠性评估和剩余寿命评估。

8 结论与展望

自 20 世纪 60 年代以来, GIS 凭借其自身各种优点,已经成为电力系统中不可或缺的一部分。但是近年来超/特高压 GIS 设备的故障率升高, GIS 安全运行形势严峻。从异物放电机理与抑制措施、绝缘试验技术优化与创新、高可靠性关键组部件研发和设备故障预警与健康评估等方面入手,解决电网 GIS 设备故障高发这一难题,全面提高超/特高压 GIS 可靠性,具有重要的理论和现实意义:

1)推进全寿命周期异物产生与放电机理研究。开展全寿命周期机械操作异物摸底试验,明确异物特征及产生规律,据此制定典型零部件表面异物清理规范,建立标准化作业流程及安装质量管控要求,强化异物治理管控质效;同时,从超/特高压 GIS 实际绝缘结构出发,基于其内部电场分布特性,结合缺陷诱

发的局部放电与设备故障特征,构建合理的放电机理研究模型,深入研究多因素复杂物理效应下典型微粒的运动特性及放电规律,揭示超/特高压 GIS 复杂放电的诱发机理。

2)深化 GIS 绝缘设计、微粒抑制技术。针对 GIS 不同功能单元特点,完善微粒陷阱的差异化设计方案,建立微粒陷阱有效性评估方法;评估覆膜对 GIS 绝缘强度的提升效果及微粒活性抑制的有效性,确定覆膜材料的长期服役寿命特性表征以及老化过程失效判据;提出微粒陷阱与覆膜的综合抑制方案,联合阶梯加压老练程序进行协同优化,并验证其有效性。

3)提升设备绝缘试验技术。研究 GIS 开关带电操作试验方法,综合运行电压、暂态过电压、机械振动等因素影响,验证对异物缺陷激发放电的规律,据此提出试验参数、流程及电磁暂态防护措施;研究带电操作影响因素解耦的绝缘试验新方法,包括工频叠加冲击、直流叠加冲击、陡波冲击、外施冲击振动下耐压试验等,明确其在出厂试验和现场试验的适用性,提出试验参数和流程。

4)加快 GIS 关键组部件质量提升及国产化。研究提升特高压 GIS 国产玻璃纤维绝缘拉杆生产工艺的稳定性,跟踪国产绝缘拉杆在试用工程中的运行表现,完善绝缘拉杆性能检测要求和手段;开展特高压 GIS 芳纶纤维绝缘拉杆的结构设计与生产工艺关键技术研究,推动实现国产化。

5)提高 GIS 故障预警能力。推广偶发局放长时带电检测装置,提升气体成分和 X 射线检测有效性,积极探索新型传感和智能诊断技术,攻克超/特高压罐式断路器内部缺陷带电检测技术;开展重点设备带电检测,在线监测数据跟踪分析和优化提升,试点开关操作前后状态检测,探索超高压设备长时整站带电检测技术。

6)构建 GIS 全寿命周期健康评估能力。推进超/特高压 GIS 真型试验平台关键电源、工装设备研制,完成性能调试,加快打造超/特高压 GIS 绝缘试验检测能力,有力支撑超/特高压 GIS 现场故障分析和新产品研发;研究借助母线侧隔离开关自身承压能力,提出减少断路器检修时在运母线陪停的可行性方案;针对 GIS 全寿命周期管控,需进一步健全设备健康管理体系与创新保障机制,细化管理职责分工,强化包括高灵敏局放在线监测在内的 GIS 状态管控能力,推动设备差异化运检,切实提升 GIS 全寿命周期健康评估能力。

参考文献:

- [1] 谢佳男,王增彬,吴吉.一起 500 kV GIS 断路器放电故障分析[J].广西电力,2019,42(1):65-67.
XIE Jianan, WANG Zengbin, WU Ji. Analysis of a discharge fault of 500 kV GIS circuit breaker[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(1): 65-67.
- [2] 邱炜,蔡川,杨红权,等.一起 252 kV GIS 盆式绝缘子放电故障分析[J].四川电力技术,2019,42(3):75-79.
QIU Wei, CAI Chuan, YANG Hongquan, et al. Analysis on discharge fault of basin-type insulator in 252 kV GIS[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(3): 75-79.
- [3] 庄丞,曾建斌,袁传镇.表面异物对 252 kV 气体绝缘组合电器盆式绝缘子绝缘性能的影响[J].电工技术学报,2019,34(20):4208-4216.
ZHUANG Cheng, ZENG Jianbin, YUAN Chuanzhen. Effect of surface foreign matters on the insulation property of 252 kV gas insulated switchgear basin insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4208-4216.
- [4] MORCOS M M, WARD S A, ANIS H, et al. Insulation integrity of GIS/GITL systems and management of particle contamination[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(5): 25-37.
- [5] 刘绍峻. SF₆ 气体绝缘电器中金属屑的控制[J].高压电器,1989,25(1):35-43.
LIU Shaojun. Control of metal shavings in SF₆ gas insulated apparatus[J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(1): 35-43.
- [6] 李翔宇,淡淑恒,尤伟任,等. SF₆ 气体绝缘高压设备颗粒陷阱综述[J].高压电器,2013,49(9):150-154.
LI Xiangyu, DAN Shuheng, YOU Weiren, et al. Review of particle trap in SF₆ gas insulated apparatus[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 150-154.
- [7] 王健,常亚楠,王靖瑞,等.基于捕捉效用分析的直流 GIL 微粒陷阱设计与参数优化[J].中国电机工程学报,2020,40(15):5050-5060.
WANG Jian, CHANG Yanan, WANG Jingrui, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5050-5060.
- [8] 耿秋钰,胡智莹,李庆民,等.特高压交流 GIS/GIL 拔孔型陷阱优化设计与协同布置方法[J].电工技术学报,2023,38(23):6539-6552.
GENG Qiuyu, HU Zhiying, LI Qingmin, et al. Optimal design and synergism arrangement methodology of Convex-Shaped traps for ultra high voltage AC GIS/GIL applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6539-6552.

- [9] 贾江波, 查 玮, 张乔根, 等. 交流电压下预埋电极对绝缘子附近导电微粒运动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 136-141.
JIA Jiangbo, ZHA Wei, ZHANG Qiaogen, et al. Influence of metal inserted polytetrafluorethylene spacer on the motion of conducting particle under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 136-141.
- [10] HOPKINS M D, BOLIN P C. Gas insulated transmission line with adhesive particle trap carrier : US 4327243 A[P].1982-04-27.
- [11] SLETTEN A M, COOKSON A H. Adherent coating for captivating small particles in gas-insulated electrical equipment: US 3911937 A[P].1975-10-14.
- [12] DALE S J, COOKSON A H. Hybrid particle traps and conditioning procedure for gas insulated transmission line: US 4330682 A[P].1982-05-18.
- [13] 何善庆. 550 kV GIS 盆式绝缘子闪络事故的分析[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 79-80.
HE Shanqing. Analysis on the flashover of basin-insulator in 550 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 79-80.
- [14] 李 杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 正弦振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4580-4589.
LI Jie, LI Xiao'ang, LV Yufang, et al. Motion characteristics of free metal particles in GIS under sinusoidal vibration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4580-4589.
- [15] 张乔根, 李晓昂, 刘 琳, 等. GIS 中 SF₆ 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2689-2698.
ZHANG Qiaogen, LI Xiao'ang, LIU Lin, et al. “One-Zero”phenomenon of discharge induced by defects in SF₆ insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.
- [16] PHELPS A V, PITCHFORD L C. Anisotropic scattering of electrons by N₂ and its effect on electron transport[J]. Physical Review a: General Physics, 1985, 31(5): 2932-2949.
- [17] 胡新文, 李晓昂, 王舒啸, 等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 339-347.
HU Xinwen, LI Xiao'ang, WANG Shuxiao, et al. Free metal particles movement and its induced gap breakdown characteristics in GIS under impact vibration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 339-347.
- [18] 李 星, 刘卫东, 许 渊, 等. 冲击振动下 GIS 内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2838-2847.
LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Movement behavior of metal particles and its induced insulator flashover characteristics under impact vibration in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2838-2847.
- [19] 李晓昂, 李 杰, 任 静, 等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒起跳特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 2005-2012.
LI Xiao'ang, LI Jie, REN Jing, et al. Lift-off characteristics of free metal particles in GIS under shock vibration[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2005-2012.
- [20] 葛 栋, 田 阳, 田洪迅, 等. 500 kV GIS 隔离开关绝缘击穿典型故障分析[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 261-267.
GE Dong, TIAN Yang, TIAN Hongxun, et al. Analysis of typical fault caused by insulation breakdown of 500 kV GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 261-267.
- [21] 张 允, 张鹏飞, 崔博源, 等. 特高压 GIS 断路器用绝缘拉杆应用现状[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2699-2706.
ZHANG Yun, ZHANG Pengfei, CUI Boyuan, et al. Application status of insulation pull rod for 1 100 kV GIS circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2699-2706.
- [22] 李 波, 胡秀敏, 何志琴, 等. X 射线无损检测的 GIS 设备缺陷检测研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(1): 78-82.
LI Bo, HU Xiumin, HE Zhiqin, et al. Research on X-ray non-destructive testing for defects of GIS equipment[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(1): 78-82.
- [23] 侯亚峰, 张 敬, 侯国良, 等. 高性能芳纶绝缘拉杆用环氧树脂配方研究[J]. 热固性树脂, 2018, 33(6): 27-30.
HOU Yafeng, ZHANG Jing, HOU Guoliang, et al. Research on the formula of epoxy resin for high-performance aramid fiber insulated tension Pole[J]. Thermosetting Resin, 2018, 33(6): 27-30.
- [24] 王 睿, 侯 梅, 谢瑞广, 等. 高电压等级绝缘拉杆研究[J]. 电磁避雷器, 2015(3): 13-15.
WANG Rui, HOU Mei, XIE Ruiguang, et al. Research of insulated tension rod with higher voltage levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 13-15.
- [25] 杨 威, 张 卓, 尹 立, 等. 550 kV GIS 隔离开关用芳纶绝缘拉杆的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(3): 28-31.
YANG Wei, ZHANG Zhuo, YIN Li, et al. Preparation and properties of aramid insulated tension Pole for 550 kV GIS disconnector[J]. Insulating Materials, 2017, 50(3): 28-31.

- [26]范孝红, 史明, 董伟志, 等. 126 kV GIS用绝缘拉杆的研制[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 33-35.
FAN Xiaohong, SHI Ming, DONG Weizhi, et al. Preparation of insulated tension Pole for 126 kV GIS[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 33-35.
- [27]李璐, 牛田野, 姜国庆, 等.一起 550 kV SF₆断路器爆炸事故的分析[J].中国电机工程学报, 2016, 36(1): 246-250.
LI Lu, NIU Tianye, JIANG Guoqing, et al. Analysis of an explosion accident of 500 kV circuit breaker caused by insulation pull arm defect[J]. Proceedings of the C-SEE, 2016, 36(1): 246-250.
- [28]邓建青, 白晓萍, 邱吉庆, 等. GIS 隔离开关用绝缘拉杆的放电研究分析及防范措施[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 247-252.
DENG Jianqing, BAI Xiaoping, QIU Jiqing, et al. Analysis and prevention measures of discharge research of insulated pull rod in GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 247-252.
- [29]何伟明, 郝艳捧, 邹舟诣奥, 等. GIS 盆式绝缘子应力超声检测技术应用与展望[J]. 广东电力, 2021, 34(1): 13-20.
HE Weiming, HAO Yanpeng, ZOU Zhou yiao, et al. Application and prospect of ultrasonic testing technology for stress in GIS basin insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 13-20.
- [30]韩帅, 高飞, 廖思卓, 等. GIS 盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 12-22.
HAN Shuai, GAO Fei, LIAO Sizhuo, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 12-22.
- [31]齐波, 高春嘉, 邢照亮, 等. 操作冲击电压下 GIS 绝缘子表面电荷的积聚特性[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4538-4547.
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. The accumulation characteristic for surface charge on GIS insulator under switching impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4538-4547.
- [32]施毅舟, 张欣, 李西育, 等. 基于应力应变分析的盆式绝缘子破裂趋势判断方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 19-22.
SHI Yizhou, ZHANG Xin, LI Xiyu, et al. Judgment method of basin insulator rupture process based on the analysis of stress and strain[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 19-22.
- [33]吴昱怡, 王承玉, 陈允, 等. 盆式绝缘子力学性能测试及分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 132-137.
WU Yuyi, WANG Chengyu, CHEN Yun, et al. Test and analysis on mechanical properties of 252 kV basin-type insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 132-137.
- [34]郭子豪, 王浩然, 李禾, 等. 特高压盆式绝缘子水压试验中应力应变分布的仿真计算与光纤测量[J]. 高压技术, 2018, 44(3): 993-1002.
GUO Zihao, WANG Haoran, LI He, et al. Calculation and experimental study on strain and stress distribution of UHV GIS spacer during hydrostatic test[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 993-1002.
- [35]许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [36]钟建英, 狄谦. 550 kV SF₆ 气体绝缘 GIS 套管内屏蔽结构研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 33-36.
ZHONG Jianying, DI Qian. Research of 550 kV SF₆ gas-insulated GIS bushing inner shielding layer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 33-36.
- [37]李永毅, 曲妍, 党建, 等. 某 550 kV 瓷柱式断路器灭弧室瓷套断裂原因分析[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 249-252.
LI Yongyi, QU Yan, DANG Jian, et al. Analysis on rupture of the porcelain bushing of arc extinguishing chamber for a 550 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 249-252.
- [38]孙庆峰, 沈茎, 付军, 等. 法兰进水结冰引起的瓷套开裂研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(1): 229-236.
SUN Qingfeng, SHEN Jing, FU Jun, et al. Porcelain insulator cracking caused by flange icing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 229-236.
- [39]李文书, 徐国政, 关永刚, 等. IEC 61850 标准在 GIS 在线监测系统中的应用探讨[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 347-350.
LI Wenshu, XU Guozheng, GUAN Yonggang, et al. Study on the IEC 61850 standard applied to the on-line monitoring of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 347-350.
- [40]刘颖, 郭小凯, 方义治, 等. GIS 特高频局放在线监测技术的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 128-133.
LIU Ying, GUO Xiaokai, FANG Yizhi, et al. Application of the GIS UHF method for partial discharge on-line

- monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 128-133.
- [41]冯 洋, 黄宏华, 姜一军, 等. 特高压变电站 GIS 局放在线监测技术提升措施及案例分析[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 227-232.
- FENG Yang, HUANG Honghua, JIANG Yijun, et al. The improvement measures and case analysis of partial discharge on-line monitoring technologies for UHV substation GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 227-232.
- [42]卓 然. 气体绝缘电器局部放电联合检测的特征优化与故障诊断技术[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- ZHUO Ran. Feature optimization and fault diagnosis of GIS based on combined detection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [43]LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 2047-2049.
- [44]张天辰, 胡 岳, 李 清, 等. 基于虚拟仪器的 GIS 局部放电声电联合检测系统[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 43-49.
- ZHANG Tianchen, HU Yue, LI Qing, et al. Combined ultrasonic and electrical detection system for GIS partial discharge based on virtual instrument[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 43-49.
- [45]张国治, 鲁昌悦, 周 红, 等. 电力设备局部放电超声、特高频一体化传感技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5090-5101.
- ZHANG Guozhi, LU Changyue, ZHOU Hong, et al. Integrated ultrasonic and UHF sensing technology for partial discharge of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5090-5101.
- [46]张晓星, 姚 尧, 唐 炬, 等. SF₆ 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-669, 747.
- ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 664-669, 747.
- [47]史会轩, 钱 进, 熊志东, 等. SF₆ 电气设备分解产物在线监测方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 56-60.
- SHI Huixuan, QIAN Jin, XIONG Zhidong, et al. Investigation on on-line monitoring of SF₆ decomposition in electrical device[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 56-60.
- [48]唐 炬, 杨 东, 曾福平, 等. 基于分解组分分析的 SF₆ 设备绝缘故障定位方法与技术的研发现状[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 41-54.
- TANG Ju, YANG Dong, ZENG Fuping, et al. Research status of SF₆ insulation equipment fault diagnosis method and technology based on decomposed components analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 41-54.
- [49]陈秀珍, 郭 伟, 高凡夫, 等. 基于气体分解产物检测技术发现的 SF₆ 电气设备放电缺陷分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 87-92.
- CHEN Xiuzhen, GUO Wei, GAO Fanfu, et al. Analysis of partial discharge defects in SF₆ electrical equipment by detecting gas decomposition products[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 87-92.
- [50]丛浩熹, 李庆民, 齐 波, 等. 基于红外传感的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 144-148.
- CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Online GIS Switch contact temperature monitoring based on IR sensing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [51]黄孟丹, 肖 纯, 杨芷宁, 等. GIS 设备发热研究进展[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 24-33.
- HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 24-33.
- [52]陈 强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 高压开关设备触头温度监测技术研究进展[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 146-153.
- CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Advancement of temperature monitoring techniques for HV switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 146-153.
- [53]李 爽, 鲁旭臣, 唐 红, 等. GIS 内触头过热的无线感知系统研制[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 31-38.
- LI Shuang, LU Xuchen, TANG Hong, et al. Development of wireless sensing system on the contacts overheating in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 31-38.
- [54]SCHUMB W C, RUMP J T, PRIEST G. Effect of high voltage electrical discharge on SF₆[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1949, 41(12): 1348-1351.
- [55]张施令. 220 kV SF₆ 气体绝缘 GIS 真型试验平台设计与研制[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 171-174.
- ZHANG Shiling. Design and development of 220 kV SF₆ gas insulated GIS actual test platform[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(5): 171-174.
- [56]牛 勃, 孙尚鹏, 魏 莹, 等. 微米级异物对 GIS 设备绝缘状态影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 93-100.

NIU Bo, SUN Shangpeng, WEI Ying, et al. Study on influence of micron-level metal dust on the insulation condition of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 93-100.

[57]杨 宁, 毕建刚, 弓艳朋, 等. 1 100 kV GIS 设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究及比较分析[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 37-47.

YANG Ning, BI Jiangang, GONG Yanpeng, et al. Experimental research and comparative analysis on live test methods of partial discharge of internal defects in 1 100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 37-47.

[58]邵苋峰, 王 刚, 魏建巍, 等. 直流 GIS 长期带电考核试验方案[J]. 浙江电力, 2021, 40(12): 89-93.

SHAO Minfeng, WANG Gang, WEI Jianwei, et al. Research on long-term live line assessment test scheme of DC GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(12): 89-93.

[59]姚 璇, 南振乐, 杜文娟, 等. ± 550 kV 直流气体绝缘金属封闭开关设备长期带电试验研究[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 46-52.

YAO Xuan, NAN Zhenle, DU Wenjuan, et al. Study on long-term live test for ± 550 kV DC gas insulated switchgear[J]. Electrical Engineering, 2024, 25(3): 46-52.

[60]王国利, 李锐海, 陆国庆, 等. 特高压直流设备长期带电考核场的设计和功能[J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 22-26.

WANG Guoli, LI Ruihai, LU Guoqing, et al. Design and function of long term live examination field for UHVDC equipments[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 22-26.

陈 刚(1972—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升。

郭 冲(1992—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为超/特高压 GIS 绝缘可靠性提升(通信作者)(E-mail:)。