

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.009

特高压直流 GIL 运行可靠性设计与研究

黎 斌, 刘 琳¹, 梁作栋², 李丽娜³, 曹少华⁴, 梁芳蔚²,
李传扬², 何金良², 张长虹⁵

(1. 广东电网有限公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 清华大学, 北京 100084; 3. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 4. 山东泰开高压开关有限公司, 山东 泰安 271000; 5. 南方电网超高压输电公司, 广州 540610)

摘要: 特高压直流 GIL 运行可靠性取决于内绝缘设计的可靠性。此外, 导电元件直流电流密度的取值、弹簧触头的定位设计、GIL 各元件中的绝缘件与金具连接处的楔形气隙的处理以及母线中支撑件的结构设计细节, 都会对产品运行可靠性产生重大影响, 不能忽视。对于运行环境十分严酷的 UHV DC GIL 为保证内绝缘工作可靠性和减少气体维护工作量, 文中还提出了高气密性结构设计。为适应 -50 ℃ 低温运行要求, 产品选用了液化温度很低的 N_2/SF_6 混合气体, 对两种气体的配比, 压力特性和绝缘特性进行了讨论与计算。还有产品的局放、气体密度及微水含量的监视系统的可靠性设计, 都会对产品运行可靠性产生直接影响。文中对上述问题的研究成果作了介绍, 可供高压直流产品设计使用。对其中未解的新技术如基于冷镜露点测试原理、微机电技术制作的智能气体湿度和密度监测装置、高压直流复合绝缘套管伞面局放起始场强提出了研究方案。文中提出的诸多 GIL 运行可靠性设计要点, 对于其他超/特高压直流气体绝缘电器可参考选用。

关键词: 电流密度; 弹簧触头定位; 楔形气隙; 高气密性设计; 局放微水监测预警新技术

Design and Research on Operation Reliability of UHV DC GIL

LI Bin, LIU Lin¹, LIANG Zuodong², LI Lina³, CAO Shaohua⁴, LIANG Fangwei², LI Chuanyang²,
HE Jinliang², ZHANG Changhong⁵

(1. Guangdong Power Grid Limited Liability Electric Power Science Research Institute, Guangzhou 510080, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China; 4. Shandong Taikai High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shandong Tai'an 271000, China; 5. UHV Transmission Co., Ltd., China Southern Power Grid, Guangzhou 540610, China)

Abstract: The operational reliability of ultra-high voltage DC GIL depends on the reliability of the internal insulation design. In addition, such issues as selection of DC current density of conductive element, the positioning design of spring contacts, the treatment of wedge-shaped air gaps at the connection between insulation part and fitting in GIL components as well as the structural design details of support components in the busbar will have a significant influence on the operation reliability of product and cannot be ignored. For UHV DC GIL operating in a very harsh environment, a high airtightness structural design is proposed in this paper in order to assure the reliability of internal insulation work and reduce gas maintenance work. To meet the requirements of low temperature operation at -50 ℃, N_2/SF_6 gas mixture with very low liquefaction temperature is selected for the product. The ratio, pressure characteristics and insulation characteristics of the two gases are discussed and calculated. The reliability design of the monitoring system for partial discharge, gas density, and micro water content of the product will also affect directly the operational reliability of the product. The research results of the above issues are introduced in this paper.

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(52307174)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52307174).

per, which can be used for the design of high-voltage DC products. A research plan is proposed for such unsolved new technologies as intelligent gas humidity and density monitoring devices based on the principle of cold mirror dew point testing and microelectromechanical technology as well as the initial field strength of partial discharge on the umbrella surface of high-voltage DC composite insulation sleeves. The multiple reliability design points for GIL operation proposed in this paper can be used as reference for other ultra-high voltage DC gas insulated apparatus.

Key words: current density; spring contact positioning; wedge shaped air gap; high gas tightness design; new technology for monitoring and early warning of partial discharge and microwater

0 引言

研究特高压直流 GIL 运行可靠性,对于保障直流电网输电安全十分重要。

产品运行可靠性受到下列多方因素的影响:

1)产品选型是否可靠;

2)影响产品长期运行可靠性的结构设计是否可靠(如导电回路及电接触设计、气密性结构设计、GIL 各种接口元件设计、绝缘件—金具—绝缘气体三交区楔形气隙处理合适性、GIL 进出线套管绝缘设计以及适应高寒气候绝缘气体的选择等);

3)GIL 内绝缘监测与预警设备的设计性能及选用的合理性^[1]。

文中对上述已经基本解决的新技术新成果作了介绍与推荐,对尚未探明急待研究的课题作了说明,为产品运行可靠性设计和研究作些铺垫。

1 产品选型的可靠性

已通过型式试验和鉴定的产品,都可上市被用户选用。

在电网运行一段时间后,是否安全可靠,各产品表现不同。设计及制造好的产品,在 30 年内无明显质量事故,运行安全可靠;设计有问题的产品,短时间运行就会暴露种种产品质量问题,影响电网安全运行。

因此,用户在选择产品时,制造方有责任详细介绍产品关键结构及性能。用户方也应该仔细了解产品结构和性能,重点是在电网较长时间运行才能暴露的设计隐患(如处理不好的绝缘件楔形气隙、弹簧触头定位设计不良等)。

在强调产品选型可靠性时,必然要否定“最低价位优先中标”的忽视产品运行可靠性的思维。

2 直流母线及电接触设计

2.1 母线材质与电流密度选择

1)从重量及经济方面考虑,无特殊原因 GIL 母

线常用铝管 6061、6063。

母线内外径大小除了考虑通流能力需求外,还要考虑与触头座及外壳直径的配合,亦考虑电场设计的要求和母线刚度(控制自重挠度变形)的要求。

2)母线电流密度的控制。交流 GIS/GIL 母线常用的电流密度为:铜管为 2~2.2 A/mm²;铝管为 1~1.1 A/mm²。

当某一直流电流 I_d 在数量上与某一交流(有效值) I_a 相等时,可以近似地认为直流电流 $I_d = \sqrt{2} I_a$, 两者流过同一母线产生的热量为

$$\frac{Q_d}{Q_a} = \frac{(\sqrt{2} I_a)^2 t}{I_a^2 t} = 2 \quad (1)$$

由此推论:直流电流密度可相近地取值:铜管为 1.1 A/mm²;铝管为 0.55 A/mm²。考虑到交流通过导电管材多少有些趋肤效应,而直流没有趋肤效应(无此附加损耗),所以铜材电流密度可取 1.2 A/mm²,铝材取 0.6 A/mm²。

2.2 触头及触头座(屏蔽)设计

GIL 母线电联结通常可选用弹簧触头或表带触头,两者通流能力都很大,外形尺寸较小。考虑到运行时母线冷热胀电接触点会产生轴向滑动摩擦,采用弹簧触头时其电接触点比表带触片更圆滑,耐磨性更好,产生镀银层微屑更少,因此用弹簧触头更合适。

1)触头座结构。弹簧触头结构见图 1。静触头座 4 与椎盘嵌件合为一体,上面装 4 条弹簧触头。母线 1 的导电面内径 $\phi 102$ mm 间为滑动配合。 $\phi 102$ mm 导电面镀硬银。母线为 $\phi 100$ mm $\times$ $\phi 150$ mm 铝管 6063。满足额定工作电流 5 000 A 要求。

弹簧触头安装槽形及尺寸应符合文[2]表 8-6 要求。

弹簧触头电接触滑动位移尺寸 L_k 。产品满负荷运行时,母线触头极限温升 65 ℃,外壳温升通常为 10~15 ℃,母线动触头与 GIL 外壳极限温差不会超过 50~55 ℃。根据极限温差 55 ℃、铝母线长 18 m 及铝温度线膨胀系数 $\alpha = 23.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 算出 $L_k = 24$ mm。间隙 $L_l > L_k$ (母线另一端与其静触头底部相

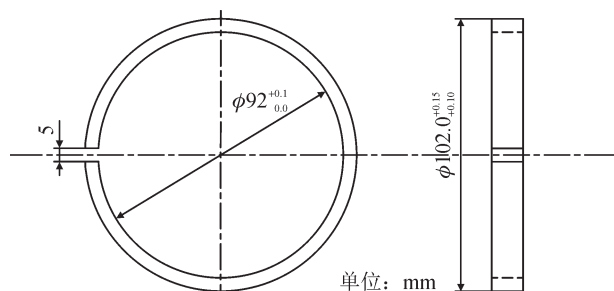


图4 绝缘定位套

Fig. 4 Insulated locating sleeve

错误的触头定位设计,会破坏弹簧触头工作可靠性^[4],其中一例见图5。

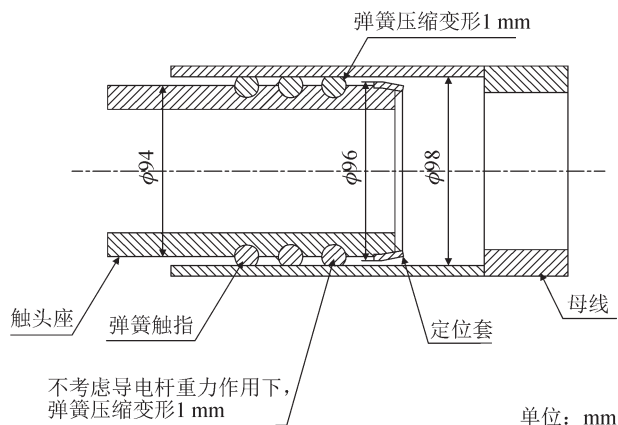


图5 设计不良的触头定位

Fig. 5 Poorly designed contact positioning

从母线电接触面尺寸 $\phi 98$ mm 及绝缘定位套外径 $\phi 96$ mm 可知,母线因自重下沉量为 1 mm。

大电流铬锆铜弹簧触头单圈接触压力常为 4~8 N,弹簧压缩变形 ± 1 mm 时,接触压力约 ± 5.7 N (参见文[2]图 8-13)。

当母线下沉 1 mm 时,弹簧触头的上半部最大压缩量增大值为 1 mm,从图 3 可见,接触压力 F_{H} 从 4~8 N 范围增大时,接触电阻变小很少,因此上半部弹簧触头通流值增大很少。但是,下半部弹簧触头压缩量因母线下沉减少 1 mm 时,在图 3 中 F_{H} 从 4~8 N 范围少量减少,会引起接触电阻 R_{c} 很大的增加。注意:此时弹簧触头下半部的通流值 I 变化是很小的。

从触头温升计算式 $\tau_{\text{K}} = I^2 R_{\text{c}}^2 / (8LT)$ 可见^[5]:下部弹簧触头的温度因电流 I 减幅很小,触头温升 τ_{K} 将随 R_{c}^2 关系大量增大——这将导致恶劣后果:轻者,下半部弹簧圈被高温烤热变形并变紫色,不致烧断,带病运行;重者,接触压力 F_{H} 因高温退火继续变小 $\rightarrow R_{\text{c}}$ 不断变大 $\rightarrow$ 不断升温 $\rightarrow$ 直至弹簧烧断、放电并引发 GIL 内绝缘事故。

图 5 所示结构,实质上是把弹簧触头当成了母

线触头定位件了,这种错误的设计造成的后果已被类似产品的运行事故证实。

3 GIL 高气密性设计

高气密性是 GIL 可靠运行的基础。高气密性设计要点是:

1)通过合理的密封结构设计(参见文[2]第 10.3 节)、科学的加工工艺和严格的质量管理,可使产品达到年漏气率不大于 0.5% 要求。到现场通过精细的组装和投运前认真的检漏,符合这个年漏气率要求并能长期保持时,补气周期约为 20 年。

2)固定母线的绝缘子(椎盘/椎盆)内封于 GIL 壳体联结法兰之内,每个泄漏通道设有双密封圈,与常规产品采用外装式盆式绝缘子相比,漏气通道减少,气密性提高了,见图 6。

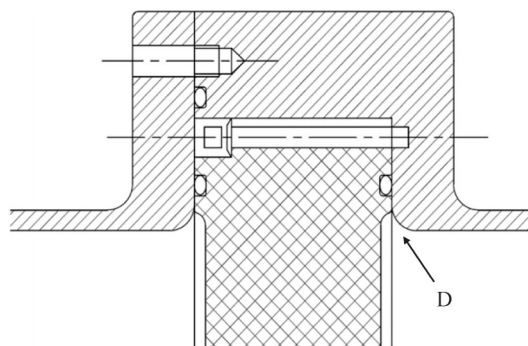


图6 内置式绝缘件的单泄露通道双密封结构

Fig. 6 Single-leakage channel and double-seal structure of built-in insulating element

3)采用接触环面宽的近似椭圆密封圈,可获得比用 O 形圈更好的气密性。文[2]中第 21.7.5 条对此作了详细介绍。

4)最重要的是,必须选用优质的密封橡胶圈。国产 HX807 改性三元乙丙橡胶是中国最优秀的用作多种封闭电器密封圈的材料,其极小的高/低温时永久压缩变形和耐热老化的长寿指标,是国内外其他橡胶难以比拟的(详见文[2]的表 10-3),在 -50~+80 °C 环境使用寿命 20 年以上。任何以低成本或别的什么理由来选用低于 HX807 特性的橡胶,都是 ± 800 kV GIL 可靠性设计所不能接受的。技术在不断进步,欢迎有比 HX807 更好的橡胶供选用。

遵守以上 4 点,产品有望达到 0.125% 年漏气率。

4 重视绝缘件—金具—气体三交区楔形气隙的处理

GIL 用弯头见图 7。图 7 箭头 C 所示的三交区,存在场强很高的楔形气隙。作者曾对楔形气隙的

形成和危害做过介绍^[2], 在文[2]第6.2.4节分别对国内外多种产品设计不处理(或处理不当)的现象做过介绍和分析。

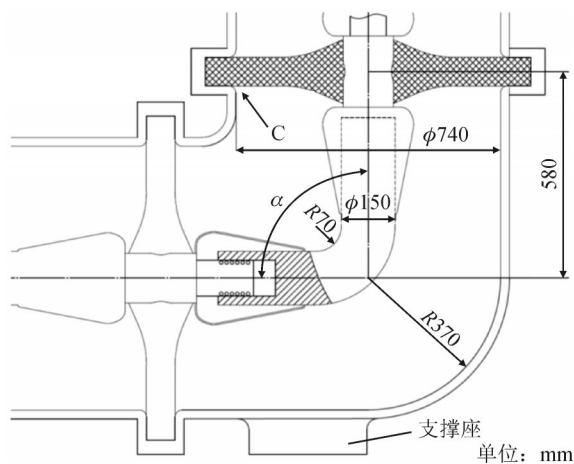


图7 GIL用弯头

Fig. 7 GIL elbow

30多年来, 凡将三交区楔形气隙处理好的产品(如图6中的箭头D), 在运行中绝缘件展示了良好的绝缘性能。楔形气隙没处理或处理不当的产品, 在运行中暴露了不少绝缘事故。特高压直流GIL绝缘件设计时应特别重视^[6]。

值得输配电气体绝缘电器设计和使用者该共同深思的是: 为什么30多年前已成功处理好的楔形气隙, 直到现在又在国产和进口的产品中重现并频发绝缘事故? 为什么至今还在国内某些新品研发试验中干扰我们的工作? 深思并处理好这个问题对确保产品运行可靠性很重要。消除楔形气隙的有效方法, 详见文[2]第6.2.4(4)条和图6.6。

5 GIL用弯头、三通和进出线接口元件设计要点

5.1 弯头与三通

- 1) 角度 α 随工程设计需要调整。
- 2) GIL进出线套管座, 用弯头改造, 取 $\alpha=90^\circ$, 在下方加支撑座, 套管置于上方。
- 3) GIL分支用三通, 可参照弯头结构设计。

5.2 进出线套管设计要点

5.2.1 充气套管要求

采用局部放电量小、电场分布较均匀制造质量稳定可控、运行可靠性高的充气式复合绝缘套管。基本结构与500~1 000 kV交流套管相同, 见图8。

5.2.2 中间电位屏蔽的取舍

无中间电位屏蔽时, 接地屏蔽以上套管电位梯度很小, 套管下部电位梯度很大, 导致套管下部外场强很高, 在试验电压附近套管下法兰处空气严重

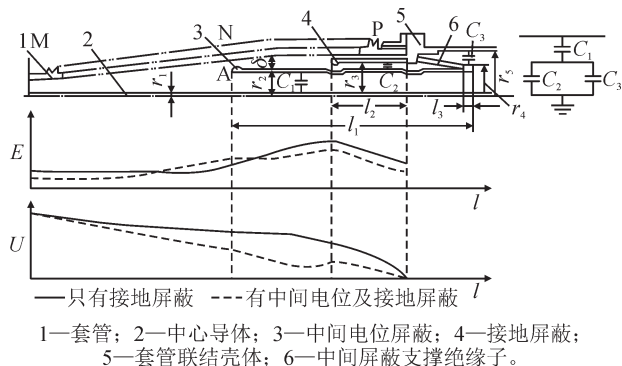


图8 充气套管

Fig. 8 Inflatable sleeve

电离放电, 导致内部接地屏蔽上端产生大量的局放。只能加大套管直径和高度来改善。

有中间电位屏蔽时, 如图8虚线所示, 从上至下电位梯度和场强分布比较均匀。套管内外电场都明显改善, 绝缘可靠性提高, 套管直径显著缩小, 与无中间电位屏蔽相比重量可减轻一半左右。

5.2.3 中间电位屏蔽设计要点

中间电位屏蔽由薄壁铝管旋压制作, 直流电压下其表面电荷分布较少, 因此屏蔽罩电位值基本上按套管内部元件间的电容分配的, 如图8所示, C_1 是中心导体(如 $\phi 150 \text{ mm} \times \phi 100 \text{ mm}$ 铝管)与中间屏蔽间电容, C_2 为中间电位屏蔽与接地屏蔽间电容, C_3 是中间电位屏蔽筒下端铝环与套管联结壳体间电容。中间电位屏蔽的电位与套管全电压的比值为 K_2

$$K_2 = C_1 / [C_1 + (C_2 + C_3)] \quad (8)$$

K_2 常用值为0.45~0.5。详细设计过程参见文[2]第4.3节。

直流高压复合绝缘套管内绝缘设计时需用的 $[E_d]$ 及 $[E_i]$ 值可以与GIL所用值通用。中间电位屏蔽表面电荷对套管电场分布的精确影响, 有待电场计算确认。

5.2.4 套管外绝缘设计要点

- 1) 直流高压套管高度的控制。文[2]特别指出超/特高压交流套管高(干闪距离) L_g 是由操作波耐受电压 U_{sw} (单位kV)决定的, 推荐按书中式(4-16)计算

$$U_{sw} = [1.5(L_g - 200) + 1200] \times (1 - 3.08\sigma) \quad (9)$$

式(9)中: L_g 为干闪距离, cm; $\sigma=0.06$, 为操作冲击闪络电压分布标准偏差。

直流高压套管操作波试验电压 U_{sw} 接近雷电冲击电压 U_{th} , 且 U_{sw} 的电应力比等值的 U_{th} 电应力大很多, 因此直流超/特高压套管 L_g 也应由操作波试验电压决定。

$\pm 800 \text{ kV}$ 套管的 L_g 值按式(9)计算, $U_{sw}=1800 \text{ kV}$

时 $L_g=8.72$ m,用于南网某些5 000 m高海拔地区,经折算 L_g 不能低于14.5 m(考虑了污秽环境要求)。

2)伞形及爬电比距的选择。为适应内陆污秽潮湿多雨的环境,防止伞间的“飘弧短接效应”,应设置大小相间的伞型(详见文[2]);为防止暴雨时伞间形成雨帘造成污闪,应在数组大小伞之间增设伞径更大的隔离伞;伞间距 T 与伞伸出 P 比值 $P/T=1\sim 1.2$ 。伞形也会影响套管污闪性能,推荐按图9的主要尺寸设计。

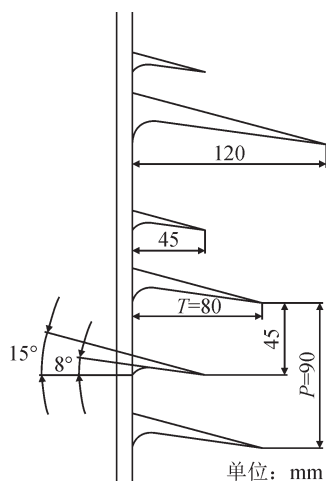


图9 套管伞形主要尺寸

Fig. 9 Main dimensions of sleeve umbrella

为减小硅橡胶伞面在直流电压下电荷积聚的不良影响,可行的办法之一是增大爬电比距。根据部分研究和运行经验^[7-9],可将污秽地区的直流高压套管爬电比距增大到45~55 mm/kV。

3)伞面工作场强的控制。套管在 ± 816 kV工作电压下,伞面不能出现局部放电,这是硅橡胶伞长期稳定工作的重要条件。因此,通过电场计算和直流高压下局放场强的测试,确定伞面局放起始场强 E_j ,是很重要的研究课题。套管设计时要保证伞面最大切向场强 $E_t < E_j$;如果出现 $E_t \geq E_j$ 现象,局放电弧对硅橡胶伞的电蚀会导致套管外绝缘特性严重破坏^[10]。

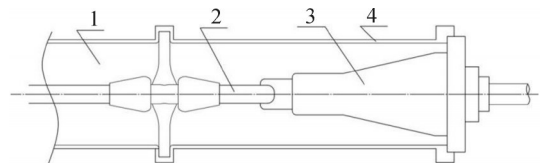
对套管更全面的设计要求及设计方法参见文[2]第4.3、4.5节及第5章。

5.3 GIL—电缆/变压器接口设计要点

GIL外联接口如图10中序号1所示,用母线2与电缆头(电缆出线电容堆或变压器出线电容堆)3相联。联结壳体4内充绝缘气体。

6 母线中点支撑件的可靠性设计

特高压直流GIL母线长18 m以内时原则上不用母线中点滑动支持件。个别特殊结构需用母线



1—GIL接口; 2—连接母线; 3—电缆/变压器出线电容堆; 4—联结壳体。

图10 GIL—电缆/变压器接口

Fig. 10 GIL-cable/transformer interface

支撑时,不能简单地把交流GIL用的三支柱绝缘件搬到直流GIL上用。

6.1 交流三支柱存在大量不安全因素

需要从设计上进行纠正或改进,主要问题分述如下^[11-13]:

1)支柱表面电场分布不均匀,腿部场强太高,超过设计允许值50%多,引发局放,最终发展为对地闪络。

2)支柱内部环氧树脂与嵌件间出现浇注间隙,间隙中进入介电常数 ε 小的气体,间隙场强增大产生局放,支柱闪络电压下降(参见文[2]图1-19),引发对地闪络,因电弧电热效应绝缘件炸裂。

3)绝缘件浇注模具设计欠佳、树脂流动性不好,加上浇注设备真空度不高时,残余气体聚集,绝缘子出现小气孔,引发局放和绝缘事故。形状复杂浇注流动性不好的三支柱更容易出现内部浇注缺陷。

4)树脂浇注后热固化保温工艺欠科学,导致支柱各部分不能等温固化,各部分温差较大,收缩不均而出线内部残留应力或裂纹,出厂时X射线探伤监控不严或未检,为运行留下内部裂隙后患。

5)支柱母线嵌筒与母线滑动套装,套装后嵌筒与母线间点焊相联。点焊面积很小,工艺分散性大,运行中因电磁振动导致焊点开裂,嵌筒与母线间出线悬浮电位,此处场强升高引发局放,导致SF₆气体电离,使腿部绝缘子表面对地闪络。

6.2 对三支柱不安全因素的改进

1)优化结构设计改善电场分布。

2)避免在母线嵌筒、接地嵌件与环氧树脂界面出现浇注间隙的措施:彻底洗净嵌筒与接地嵌件的油污,零件周转、存放和浇注时谨防二次污染,谨防界面涂层划伤。

3)改进模具设计,增强树脂流动性,便于排净模具内残留的气体。设计好浇口脱模结构,避免脱模重力敲打震伤绝缘件。

4)改进热固化工艺,提高绝缘子整体机械及电气性能。

传统的单段固化工艺是在浇注树脂后,模具及

绝缘件在炉中某一恒定温度下(如 135 ℃), 保温数小时, 出炉脱模——由于炉内环温不均匀和模具浇注件各部位传热散热条件不一致, 可能出现绝缘件各部位固化不均匀, 导致材料质密度和弹性模量各处不同, 有可能使绝缘件因运输振动或运行时冷热变形不均匀而出现细微裂隙, 最终导致电气性能变化。

参照某些企业经验^[14], 在不同温度 80~140 ℃ 下分时段保温固化, 最后降到室温脱模。分时段保温固化工艺使绝缘件固化均匀, 能提高绝缘件强度, 靠近模具外端的接地嵌件也不易出现界面裂隙。这种保温固化工艺也适用于其他绝缘件。

5) 三支柱母线嵌筒与母线间不能电焊相联, 应改用多点沉头螺钉联结, 螺钉必须用不可拆的紧固胶(可赛新 1271 胶)永久性防松锁紧。

6) 提高支柱支撑点耐磨性设计, 见图 11。

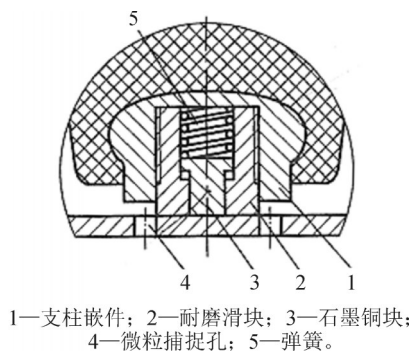


图 11 三支柱柱腿端部结构改进

Fig. 11 Structural improvement of the end of three-strut column leg

图 11 中序号 2 是母线重量支撑点, 母线胀缩时序号 2 在壳体上滑动。耐磨滑块 2 用聚醚醚酮(PEEK)料制作, 此料突出特点是: 它是高温压制的树脂材料, 却有能与合金媲美的刚性和韧性, 极高的耐磨性和抗疲劳性, 常做活塞环和无油轴承等件使用, 应用领域广, 涉及航天航空、电工、医疗、石化……

此处, 利用它的耐磨性, 做支柱具有很长的使用寿命。还利用它的自润滑性和非导电性, 支柱滑动时该件不易磨出导电微粒。

7) 支柱腿端接地可靠性设计。图 11 中序号 3 用具有自润滑的石墨铜制作, 经弹簧 5 将它压紧, 并与支柱腿部嵌件 1 电气相联, 保持可靠的接地。石墨铜良好的自润滑耐磨性, 不仅使用寿命长, 与外壳滑动摩擦产生的金属微粒也较少。

上述改进是有点好处的。但是, 有研究者指出三支柱在直流工作电压下负载运行时, 可能出现 50 ℃ 左右的温度梯度, 将加剧电荷的移动与积聚, 使腿部表面切向场强增大 90% 以上; 此外, 三支柱腿部接

地金属嵌件与环氧界面场强也增长了 155.8%^[15]。这些变化给支柱直流电压下运行可靠性带来许多未知数, 应予重视。

为更有效地缓和支柱腿部接地嵌件与环氧树脂界面电场, 可研究一种新型的单支柱绝缘件, 该结构的特点是利用腿部不同电导率的绝缘材料缓和嵌件周边电场、大幅度降低嵌件界面场强, 提升运行可靠性, 见文[1]第 5 章。

7 GIL 内绝缘状态的检测与预警

7.1 局部放电检测

内绝缘故障大多数从绝缘件缺陷产生的局放开始。绝缘件局放产生的超高频(UHF)电磁波, 只能用相应的局放监测装置来测量, 超声波局放检测仪无能为力。为准确地监测 GIL 内绝缘故障并进行故障预警, 必须对 GIL 配置的局放监测装置进行可靠性设计和适用性验证。

1) 局放监测装置可靠性设计要点。①了解比较该装置研发的背景(研发人员资历, 研发硬件, 研发经历); ②了解比较局放监测装置的技术性能; ③了解比较装置的使用面和使用可靠性; ④了解比较该装置是否具备较丰富的产品绝缘击穿放电特性图谱, 可供故障鉴别使用。

不经过以上 4 点认真的了解、分析和比较, 随意配置局放监测仪, 是产品可靠性设计不能接受的。

文中推荐的高气密性设计采用的内置式母线固定绝缘子, GIL 外壳是金属全封闭的。为检测 UHF 局放信息, GIL 外壳上应设 UHF 电磁波外传接口。

经了解国产 HD-iPD02 型介窗式局放监测系统, 传感器装于 GIL 壳体外部可满足以上 4 点优选要求, 该装置由华北电力大学主持研发, 其成果获得国家发明专利, 在全国数百个电站的 GIS、主变、高抗及开关柜上运行十多年, 检测精度高, 工作可靠^[16]。

2) 局放监测装置适用性验证。局放监测装置工作可靠性必须在产品出厂试验时作适用性试验验证, 试验验证项目包括:

测出局放信息在一段 GIL 气腔中的传输衰减 A_1 、穿过一个绝缘件的衰减 A_2 、穿过 GIL 某一弯头的衰减 A_3 以及局放测量传输线损耗 M , 在已知测量装置灵敏度 S 和被测局放信号强度 U_{PD} 时, 通过式(10)确认局放监测裕度 y 是否满足不小于 15 dB 要求

$$y = (U_{PD} - A - M) - S \quad (10)$$

式(10)中, A 是两个传感器之间的全部传输衰减(包括 $A_1, A_2, \dots$)。

例如, 已知 $S = -70$ dB 与 GIL 允许局放量是 5 pC 对应的 UHF 信号强度 $U_{\text{UHF}} = -15$ dB。

两传感器间的信号衰减 $A = 30$ dB, 测量线上的传输损耗 $M = 3$ dB, 该传感器配置下的局放检测裕度为

$$\begin{aligned} \gamma &= (-15 - 30 - 3) \text{ dB} - (-70) \text{ dB} = \\ &(-48 + 70) \text{ dB} = 22 \text{ dB} \end{aligned} \quad (11)$$

γ 大于预定值 15 dB, 可考虑把两传感器间距 L 加大一点。当 $\gamma < 15$ dB 时, 应缩小传感器间距。

对于 ± 800 kV GIL 这样重要的输电设备, 有条件的使用单位在产品投运前也应该做上述局放监测装置适用性验证试验。

运行中的局放监测装置应具有内部故障报警功能, 在正常工作电压下内部局放量达到某一数值(如 ≥ 15 pC)时应发出报警, 提示运行人员注意检修。

7.2 气体密度与微水监测

绝缘气体保持必要的气体密度(或气压), 是保证产品内绝缘的必要条件。气体中悬浮的水分子、绝缘件表面附着的水分子及渗入绝缘件内的水分子都会改变气体与绝缘材料的导电率, 对绝缘件电荷的积聚与移动带来影响, 对产品内部气隙绝缘件和绝缘件表面闪络特性带来不利的影响。因此, 在线适时准确地检测绝缘气体的密度和微水含量对保证 GIL 安全运行十分重要。但是, 现用的微水测量仪和气体密度控制器都存在一些问题, 影响测量准确性。

1) 现有微水测量技术存在的问题。现用湿度传感器工作原理是: 基于湿敏薄膜吸湿, 水分与湿敏薄膜产生物理化学反应, 湿敏薄膜电阻和电容发生变化, 通过检测阻容变化来测湿度的变化。该传感器在低湿度时灵敏度差, 而且检测数据重复性不好。因为湿敏薄膜多孔, 亲水, 水分子从薄膜中去湿比较困难, 残留水份对后续的湿度测量值有干扰, 同一时间对同一气室水份的测量值重复性差。

另一个问题: 现有湿度传感器测出的水分与环境温度和产品运行时绝缘气体当时的温度有关, 所测数据是否符合国标规定的 20 °C 时的数据, 还要经温度折算后确认, 不方便(参见文[2]第 2.2.3 节)。

还有, 现有湿度检测装置是将产品中的气体引出到大气中来检测, 检测结果不仅受大气湿度的影响, 还与检测装置和检测气体管道含水量有关。

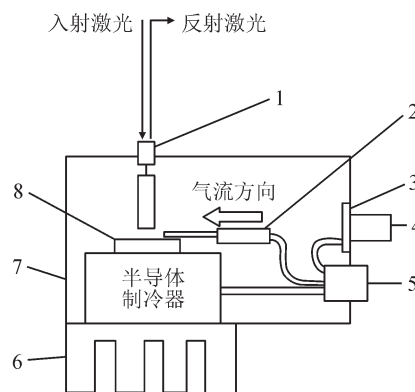
2) 现有 SF₆ 密度控制器其工作原理导致它存在着“欠补偿”, 示数“假高”和受海拔影响等质量问题(详见文[2]第 2.3.4 节)。有些产品针对这些问题作了

些改进, 但上述问题没全部解决。

7.3 在线式微水/密度监控仪的研发

解决上述问题的出路是研发新型在线式微水/密度监控装置。

国内曾有研究人员提出下面设想: 基于“冷镜”露点测量湿度原理, 采用 MEMS(微机电系统技术)提出了在线式微水/密度监控器研制方案, 其工作原理见图 12。所有元件封于外壳 7 内, 通过气体采样口 4 经自封阀—气管—截止阀与 GIL 相联。



1—密封光纤连接器; 2—微型压电气泵; 3—压力传感器(密度变送器); 4—气体采样口接 GIL/GIS; 5—气体密封电连接; 6—散热器; 7—封装外壳; 8—MEMS 湿度传感器芯片。

图 12 在线检测微水/密度传感器结构图

Fig. 12 Structure diagram of online detection micro-water/density sensor

当整个传感器体积不大时, 也有可能将图 12 中所有元件都置于 GIS 被测气室的小支筒内。

图 12 中微型压电气泵 2 用来提供被测气体循环, 使被测气体流经湿度传感器芯片 8, 该芯片经微型半导体制冷器降温, 至芯片上的光学镜面结露时, 反射激光信号将急剧下降, 此时控制系统切换制冷器, 同时在芯片表面的温度传感器立即将温度量转换成微电压量, 经放大和 A/D 转换, 将 SF₆ 中水分凝露温度 T_d 传到上位机软件。与此同时, 上位机软件也从压力传感器 3 得到 SF₆ 气体压力 P , 上位机软件由 T_d 和 P 很快算出湿度 X 。传感器 3 同时具备 SF₆ 密度采样功能。

MEMS 露点湿度/密度传感器的技术特点:

- 1) 湿度最低检测量为 100 $\mu\text{L/L}$, 测量值有良好的重复性, 测量精度为 20 $\mu\text{L/L}$;
- 2) 可同时监控 SF₆ 的密度;
- 3) 记录 SF₆ 密度及湿度变化趋势并根据设定值报警;
- 4) MEMS 芯片可批量生产, 成本较低;
- 5) 可置于产品壳体内或壳体外。

8 高寒地区 GIL 绝缘气体选择

根据 ± 800 kV GIL 途径高寒 $-50\sim-40$ °C地区对绝缘气体低液化温度的要求和途径人口密集和景观地区对绝缘气体的环保要求, 产品应减少 SF_6 用量, 采用 SF_6/N_2 混合气体可减少 SF_6 用量, 因 N_2 在 0.1 MPa时沸点很低(为 -194 °C), 混合气体还可以满足 -50 °C低温运行要求。

8.1 混合气体及混合比选择

1) 选择混合气体的依据如下: ①液化温度很低; ②全球变暖潜能很小; ③与 SF_6 配合有良好的协同效应; ④气源供应方便经济。

价格不贵供应方便的氮气 N_2 符合以上4个条件: 0.1 MPa时液化温度为 -194 °C, 能有效地解决 -50 °C时 SF_6 液化问题; 全球变暖潜能 $\text{GWP}=0.1$, 特小, 符合环保要求; 强电负性的 SF_6 与中性气体 N_2 配合具有协同效应, 使混合气体临界击穿场强等于两种气体按各自的分压力加权所得到的临界击穿场强, 两者配合协调。

2) 混合比的选择。国内外的研究表明^[17], 在 SF_6 体积分数达到20%后, 混合气体交流临界耐电强度(E/P)与 SF_6 相应值之比——相对耐电强度 RES 的增速变慢而趋于饱和, 见图13。

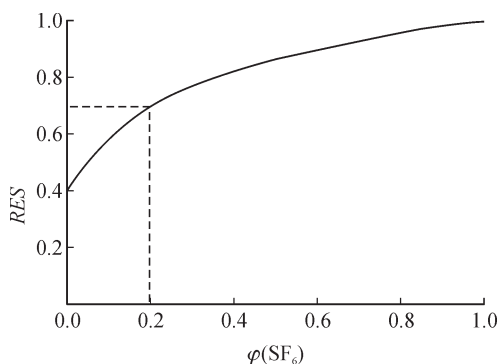


图13 SF_6/N_2 混合气体的相对耐压强度(工频电压下)与 SF_6 体积分数的关系

Fig. 13 Relationship between the relative withstand voltage of the SF_6/N_2 gas mixture (under power frequency voltage) and SF_6 content

在 $\varphi(\text{SF}_6)=0.2$ 时, 在 $0.2\sim 0.6$ MPa压力范围内, RES 约为 $0.7\sim 0.8$ 。

SF_6 及 SF_6/N_2 混合气体间隙直流击穿场强标幺值随气压的变化见图14。在直流电压下, 高电位导体表面积附电荷极少, 气隙绝缘基本上无表面电荷干扰, 因此在 $\varphi(\text{SF}_6)=0.2$ 时, 从图14^[18]可折算出在产品常用气压 $0.4\sim 0.6$ MPa范围内, 直流电压下的 RES 约为 0.8 , 与交流时相近。

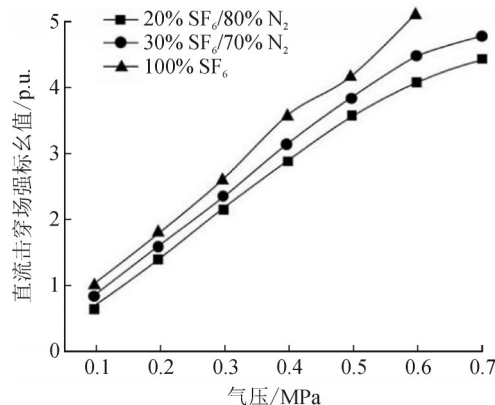


图14 SF_6 及 SF_6/N_2 混合气体间隙直流击穿场强标幺值随气压的变化

Fig. 14 The change of the DC breakdown field intensity scale value of the gap of SF_6 and SF_6/N_2 mixed gas with the pressure

8.2 混合气体的压力选择

通过提高混合气体的气压, 可使混合气体达到纯 SF_6 一样的绝缘性能。

国内多项 SF_6/N_2 混合气体绝缘介质的研究表明^[9]:

在 SF_6/N_2 混合气体承受交流、直流、雷电冲击及操作冲击电压负荷时, 混合气隙击穿电压 U_{hb} 与纯 SF_6 气隙击穿电压 U_b 有下面的换算关系

$$U_{hb} = U_b (x\%)^{0.18} \quad (12)$$

式(12)中, $x\%$ 为 SF_6 体积分数的百分比。

文[2]中26.2.3节还根据 SF_6 绝缘—压力特性, 来分析 SF_6/N_2 混合气体的压力特性, 由文[2]的式(1-24), 推导出混合气体的绝缘—压力特性, 见式(13)

$$\begin{cases} U_{b2} = U_{b1} (P_2/P_1)^{0.9} \\ U_{hb} = U_b (P_{hb}/P_b)^{0.9} \end{cases} \quad (13)$$

由文[2]的式(26-1)及式(26-2)经简单运算得到

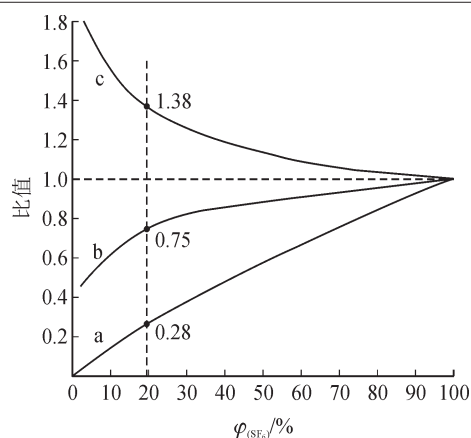
$$P_{hb} = P_b / (x\%)^{0.18/0.9} = P_b / (x\%)^{0.2} \quad (14)$$

例如 $x\%=20\%$ 时, 混合气体击穿电压 $U_{hb}=0.75U_b$, 要求 $U_{hb}=U_b$ 时, 混合气体的压力应增大到: $P_{hb} = P_b / 0.2^{0.2} = 1.38P_b$ 。

当 SF_6/N_2 混合比为 $0.2/0.8$ 的混合气体额定气压取 0.55 MPa时, 对应纯 SF_6 气压为 0.4 MPa。

由计算式(12)及式(14)可作出图15。图15中: 曲线a是混合气体中 SF_6 重量与用纯 SF_6 的重量比; 曲线b为混合气体的耐受电压与用纯 SF_6 时耐受电压比; 曲线c为混合气体气压与用纯 SF_6 气压之比。

按 $0.2/0.8$ 配比配制的混合气体, 在额定气压为 $0.4\sim 0.6$ MPa和 -50 °C条件下, SF_6 的分压为 $0.08\sim 0.12$ MPa, 小于该条件下的 SF_6 液化气压 $0.32\sim 0.23$ MPa, 不会液化(见文[2]图1-3)。

图 15 SF₆/N₂混合气体与 SF₆ 的相对特性曲线Fig. 15 Relative characteristic curve of SF₆/N₂ mixed gas versus SF₆

9 待研究课题

为提高特高压直流 GIL 运行可靠性,急待研究的课题简述如下:

1)高压直流 GIL 用复合绝缘套管伞面局放起始场强测试。套管试品在负极性直流电压下测试出伞面刚产生局部放电时的电压(局放起始电压 U_j)。通过套管电场仿真计算,在 U_j 电压下得到对应的伞面最大场强 E_j ——被定义为套管直流电压下的伞面局放起始场强。设计时,在直流工作电压下要求套管伞面最大切向场强 $E_{\max} < E_j$,以确保长期运行时不发生硅橡胶伞电蚀现象。

2)MEMS(微机电系统技术)露点/密度传感器研制。基于“冷镜”露点测量湿度原理,采用微机电系统技术制作在线式微水/密度监控器,能有效解决现有微水测量仪测量值不准确、重复性不可靠的痼疾,为产品内绝缘运行可靠性提供可靠的监测预警手段。

10 结论

文中继文[1]之后,为提高这类产品的运行可靠性,从以下方面提出了行之有效的方法,可供产品设计制造和运行维护人员思考和使用:

1)强调了产品选型的可靠性,通过对产品结构及性能的剖析,将运行可靠性不高(有隐患)的产品剔除,不宜进入电网。

2)根据直流工作负荷特点,对 GIL 主导电回路诸元件允许电流密度提出了有别于交流产品的设计要求。

3)对弹簧触头定位设计的可靠性作了分析,剖析了某些产品错误的定位设计及其对电网安全运行的危害。提出了弹簧触头正确可靠定位的设计方法。

4)提出 GIL 高气密性设计是保证产品运行可靠的基础,指出高气密性设计的要点是:减少泄露通道、增设双密封结构、采用优质橡胶材料和近似椭圆密封圈。

5)特别强调了处理好绝缘件—金具—气体三交区楔形气隙的重要性,楔形气隙不处理或处理不当,必然会破坏产品内绝缘运行可靠性。

6)提出了电气性能稳定、运行可靠性高的高压直流 GIL/GIS 进出线套管设计方案及其内外绝缘设计要点。

7)为作好高压直流 GIL/GIS 内绝缘的监测与预警,提出了局部放电监测装置可靠性设计及适用性验证的新观念。

8)指出了国内外现用的基于湿敏薄膜制作的微水检测仪,存在着难以克服的多种质量问题。提出了基于“冷镜”露点监测湿度原理,采用微机电系统技术研发在线式微水/密度监控器的创新方案。

参考文献:

- [1] 黎斌,刘琳,梁作栋,等.特高压直流 GIL 绝缘设计与研究[J].高压电器,2024,60(2):1-25.
LI Bin, LIU Lin, LIANG Zuodong, et al. Insulation structure design and research of UHV DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 1-25.
- [2] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 第 5 版. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin. SF₆ high voltage equipment design[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [3] 黎斌,张烈,张微,等.江河隧道/城市管廊 GIL 的可靠性与适用性设计[J].高压电器,2019,55(6):1-14.
LI Bin, ZHANG Lie, ZHANG Wei, et al. Reliability and applicability design of GIL in river tunnel and urban pipe corridor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 1-14.
- [4] 张正周,黎斌.弹簧触头设计(IV)—弹簧触的损坏与对策[J].高压电器,2013,49(5):18-20.
ZHANG Zhengzhou, LI Bin. Spring contact design(IV)—damage and countermeasures for spring contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 18-20.
- [5] 张节容. 高压电器原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1989.
ZHANG Jierong. Principles and applications of high voltage apparatus[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [6] 黎斌.论 GCB/GIS 的可靠性设计(上)—对用户期盼的回应[J].高压电器,2011,47(6):98-106.
LI Bin. Discussion about the reliability design of GCB/GIS (I)—a response to the customer demand[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 98-106.
- [7] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑-2006 年[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.

- LIU Zhenya. Ultra high voltage direct current transmission technology research achievement album[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [8] 范建斌, 宿志一, 李武峰, 等. 高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 1-6.
FAN Jianbin, SU Zhiyi, LI Wufeng, et al. Research on profiles of HVDC post insulator and bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 1-6.
- [9] 黎斌, 王日新. 超/特高压直流套管的研发新思路—— ± 800 kV 电容式复合绝缘穿墙套管结构设计的探讨[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 1-11.
LI Bin, WANG Rixin. New idea on the development of EHV/UHVDC bushing—discussion on structure design of ± 800 kV capacitive composite insulated wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 1-11.
- [10] 周义华. 长期暴露在户外环境的有机绝缘复合绝缘子表面劣化判断[J]. 电瓷避雷译丛, 1992(37): 7-16.
ZHOU Yihua. Long term exposure to outdoor environments and surface degradation of organic composite insulators[J]. Insulator lightning Translation Series, 1992(37): 7-16.
- [11] 王井飞, 张强, 李祥斌, 等. 特高压直流输电工程 GIL 三支柱绝缘子故障分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 246-252.
WANG Jingfei, ZHANG Qiang, LI Xiangbin, et al. Fault analysis and improvement measures of GIL three - pillar insulator in UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 246-252.
- [12] 南方电网科学研究院南方电网超高压检试中心. 两渡直流输电工程 GIL 故障分析报告[R]. 广州: 南方电网科学研究院南方电网超高压检试中心, 2017.
CSG UHV Maintenance Test Center of CSG Grid Research Institute. GIL fault analysis report of Liangdu DC power transmission project[R]. Guangzhou: CSG UHV Maintenance Test Center of CSG Grid Research Institute, 2017.
- [13] 南网超高压检修试验中心. 特高压直流工程 GIL 关键部件故障分析, 性能提升及工程应用[R]. 广州: 南网超高压检试中心, 2018.
CSG UHV Maintenance Test Center. Fault analysis, performance improvement and engineering application of UHVDC GIL key components[R]. Guangzhou: CSG UHV Maintenance Test Center, 2018.
- [14] 田浩, 林生军, 张鹏飞, 等. 不同工艺对特高压 GIL 三支柱绝缘子组织均匀性的影响[J]. 绝缘材料, 2018, 51(12): 67-73.
TIAN Hao, LIN Shengjun, ZHANG Pengfei, et al. Effect of different processes on structure uniformity of UHV GIL three post insulator[J]. Insulating Materials, 2018, 51(12): 67-73.
- [15] 胡琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 温度梯度下直流 GIL 三支柱绝缘子电荷积聚对电场分布的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(7): 20-27.
HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Impact analysis of charge accumulation on electric field distribution of DC GIL tri-post insulator under temperature gradients[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(7): 20-27.
- [16] 卢启付, 郑书生, 李兴旺, 等. GIS 金属法兰孔特高频信号传播特性研究与外置式发射天线开发[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2303-2309.
LU Qifu, ZHENG Shusheng, LI Xingwang, et al. Study on propagation characteristics of UHF signal via hole of GIS mental flange and development of external radiating antenna[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2303-2309.
- [17] 陈庆国, 肖登明, 邱毓昌. SF_6/N_2 混合气体的放电特性[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(4): 338-342.
CHEN Qingguo, XIAO Dengming, QIU Yuchang. Discharge characteristics of SF_6/N_2 mixture gas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 338-342.
- [18] 罗颜. 直流 GIL 中 SF_6 替代气体绝缘性能的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
LUO Yan. Research on insulation properties of SF_6 substitutes in HVDC-GIL[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [19] 邱毓昌, 冯允平, 张鸣超. SF_6/N_2 混合气体绝缘介质的研究[J]. 西安交通大学学报, 1993, 27(1): 5-10.
QIU Yuchang, FENG Yunping, ZHANG Mingchao. Research on SF_6/N_2 mixed gas insulating medium[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1993, 27(1): 5-10.
- 黎斌(1939—), 男, 教授级高级工程师, 从事高压电器研发。
- 刘琳(1990—), 女, 博士, 助理研究员, 从事 GIS/GIL 绝缘结构研究及气固界面放电研究。
- 梁作栋(1999—), 男, 博士, 从事直流 GIS/GIL 绝缘件仿真优化设计及环保型绝缘材料研究。
- 李丽娜(1985—), 女, 工程师, 从事输变电开关设备研发。
- 曹少华(1988—), 男, 高级工程师, 从事交、直流超特高压组合电器研制(E-mail: caosh@sdtai.com)。
- 梁芳蔚(1992—), 男, 博士后, 从事 GIS/GIL 绝缘件表面电荷测量技术研究。
- 李传扬(1987—), 男, 助理研究员, 从事直流 GIS/GIL、绝缘件微缺陷离线检测及微放电在线监测技术研究。
- 何金良(1966—), 男, 教授, 从事先进电能传输、电力传感技术及智能绝缘材料及装备研究。
- 张长虹(1983—), 男, 教授级高级工程师, 从事高电压绝缘技术、高压电器选型与运维关键技术研究。