

江河隧道/城市管廊GIL的可靠性与适用性设计

黎 斌, 张 烈¹, 张 微¹, 李 松¹, 张晓伟¹, 王卫华², 熊贲超²,
张长虹³, 刘婉莹³, 盛 康³

(1. 北京电力设备总厂有限公司, 北京 102401; 2. 华东电力设计院有限公司, 上海 200001; 3. 中国南方电网超高压
输电公司, 广州 510663)

摘要: 介绍了过江河隧道及大城市市区综合管廊中高压/特高压GIL的特殊运行环境及要求,总结了GIL常见的运行故障,从绝缘、密封、电接触、母线及外壳支撑等方面分述了GIL可靠性结构设计要求及方案;从方便现场拆装、特性监测、寻找处理故障等方面分述了GIL的适用性设计要领,提出了长线GIL设置封闭式隔离开关分段运行理念以及局放监测系统的可靠性设计理念和应用设计理念。为确保GIL运行可靠性文中还特别强调了制造质量监控的重要性,为GIL的设计、制造和运行提供有益的借鉴。

关键词: GIL内绝缘; 绝缘件表面电场; 高气密性; 母线与外壳支撑; 可靠性及适用性设计; 制造质量监控; 隧道/管廊GIL

Reliability and Applicability Design of GIL in River Tunnel and Urban Pipe Corridor

LI Bin, ZHANG Lie¹, ZHANG Wei¹, LI Song¹, ZHANG Xiaowei¹, WANG Weihua²,
XIONG Yunchao², ZHANG Changhong³, LIU Wanying³, SHENG Kang³

(1. Beijing Power Equipment Group Co., Ltd., Beijing 102401, China; 2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200001, China; 3. CSG EHV Power Transmission Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: This paper introduces the special operation environment and requirements of GIL with high voltage or ultra-high voltage (UHV) in the cross-river tunnel and the integrated pipe corridor in large cities. The common operation failures of GIL are summarized. The design requirements and scheme of GIL reliability structure are described in terms of insulation, seal, electrical contact, busbar and shell support. The essentials of GIL applicability design are discussed from the aspects of convenient field disassembly and assembly, characteristics monitoring, fault finding and treatment, etc. The concept of partitioned operation of long GIL with enclosed isolation switch and the design concepts of reliability and application of local discharge monitoring system are proposed. In order to ensure the reliability of GIL operation, the importance of manufacturing quality control is emphasized, which may provide reference for GIL's design, manufacture and operation.

Key words: GIL internal insulation; surface electric field of insulating parts; high air tightness; busbar and shell support; reliability and applicability design; manufacturing quality control; GIL in tunnel/pipe corridor

0 引言

面对国内GIL市场需求的增长,中国能源建设公司北京电力设备总厂有限公司认真总结了GIS母线设计、制造和运行经验,剖析了国内外GIL的结构特点和运行中存在的各种质量问题,成功研发了

GXL4系列126/550 kV GIL,与国内外同类产品相比绝缘可靠性更高,见表1、2,并在厂内特高压试验站和国外某变电站安全运行多年。为适应不同类型用户对GIL的需要,近年来北京电力设备总厂有限公司受中国能源建设有限公司委托,协同华东电力设计院等单位以公司现有500 kV GIL为基础,对超/

特高压江河隧道 GIL 和城市市区地下综合管廊 GIL 的结构设计进行了专题研究。文中提炼了该课题研究成果,考虑超/特高压输电线过江巨型钢塔建造、雷电防护、导线覆冰舞动等方面不好处理的难题及江河航道管理的限制,采用隧道 GIL 过江河是合适的;在大城市市区高压输电网,由于负荷大电压高,

当电缆满足不了要求时,采用管廊 GIL 是个好选择。这些隧道/管廊 GIL 大都设在我国经济发达地区,任何一种短时间的停电都会造成重大经济损失,因此提高 GIL 设计和制造的可靠性是对产品至高无上的要求。考虑到管廊 GIL 使用空间狭窄,从拆装、检修、试验多方考虑其结构设计的适用性也是重要研究课题。

表 1 国内外部分 550 kV GIL 性能对比

Table 1 Performance comparison of some 550 kV GIL at home and abroad

对比项目	引进产品国产化 GIS 母线	国外某 GIL	进口 GIL	GX14-550 GIL
母线导体直径 d_i/mm	$\phi 140$	$\phi 190$	$\phi 178$	$\phi 150$
母线筒内径 D_i/mm	$\phi 492$	$\phi 540$	$\phi 495$	$\phi 520$
母线对外壳间距 δ/mm	176.0	175.0	158.5	185.0
最低 SF ₆ 工作气压/MPa	0.35	0.35	0.40	0.40
母线表面允许场强/(kV·mm ⁻¹)	22	22	24	24
可承受雷电冲击/kV	1 935	2 184	2 185	2 238

注:GX14-550 外壳尺寸适中,内绝缘能力最强。

表 2 国内外 550 kV GIL 几种盆式绝缘子对比

Table 2 Comparison of some 550 kV GIL type insulators at home and abroad

参数	外径/mm	高/mm	爬距/mm	楔形气隙处理	金属外圈	简评
某引进国产化产品	625	244	255	不好,有绝缘隐患	有	尺寸较小可靠性欠佳
国外某产品	730	260	320	好	无	尺寸较大可靠性高
GX14-550	625	250	306	好	无	尺寸较小可靠性高

注:GX14-550 盆式绝缘子尺寸较小,绝缘可靠性强。

1 GIL 的基本结构

一个工程的 GIL 可由几个或几十个气隔单元组成,长线路的一个气隔单元长约 100 m,总长较短的 GIL 每个气隔单元长约 50 m。每个气隔单元由几个基本母线单元(M_b)和一个可拆母线单元(M_c)组成,见图 1。126~363 kV GIL 分三相共箱和单相分箱两种,550 kV 及以上为单相分箱结构。

基本母线单元和可拆母线单元都在工厂组装好,各基本母线单元在现场用壳体法兰螺栓对接,可大量减少现场组装工作量,减少环境对 GIL 内绝缘的不利影响,提高了 GIL 拼接安装的可靠性。

基本母线两端用盆式绝缘子支撑,各段母线通过弹簧触头 2 实现电联结,母线右侧通过螺钉 8 与右侧弹簧触头座紧固,便于拆装 GIL 时推进或拉出母线。根据母线长短在母线中点可设置支柱绝缘支撑 4。

可拆母线单元 M_c 包括可拆母线 5、可拆短筒 6、调节壳体伸缩的波纹管 7,部分可拆母线单元设置

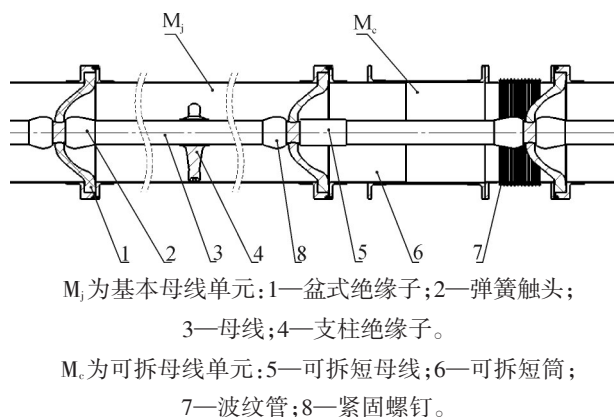


图 1 GIL 主要结构

Fig. 1 Main structure of GIL

有高压试验和回路电阻测试接口。每个可拆单元设有充气口。

2 母线及其电联结可靠性设计

2.1 母线截面及长度

母线用铝合金管制作(导电率 $\geq 55\%$),分相式 GIL 母线长期工作电流密度取 $J_r = (1 \sim 1.15) \text{ A/mm}^2$ ^[1],三相共箱式 GIL 因内部热源多、外壳散热面积相对

较小, 电流密度 $J_r \leq 0.7 \text{ A/mm}^2$ 。为便于运输和组装, 基本母线长可取 $L=12\sim 18 \text{ m}$ 。

2.2 极少维护的母线电接触

母线联结的电接触性能对 GIL 运行可靠性影响很大, 从使用方常发出“免维护”的呼声。中国高压电器使用寿命基本都在 30 年以上, 在产品寿命期内电联结免维护通常很难做到。对于江河隧道/大城市廊道中特别重要的 GIL, 提出 30 年不维护电接触设计是必要和可以争取做到的, 具体措施分述如下。

2.2.1 电接触形式的选择

从通流能力考虑, 传统的梅花触头、表带触头都能使用。但是, 弹簧触头的长期工作通流能力和短时耐受通流能力是最强的。

弹簧触头的通流能力在文[1]中第 8 章有专述, 这里特别指出的是: 对于 4 000 A 以上大电流触头宜选用 $\phi 1.5$ 的铬锆铜丝, 长期工作电流密度要根据产品结构取值: 对于分相式 GIL, 取 $[J_r] = 8 \text{ A/mm}^2$; 对于三相共箱式 GIL, 取 $[J_r] = 5\sim 6 \text{ A/mm}^2$, 原因同 2.1 所述。

2.2.2 接触压力及镀银层耐磨性比较

表带触片的接触压力与弹簧触头相近但表带触片的冲剪尖棱对触头镀银层的磨损都比弹簧触头大得多。梅花触头片少、单片接触压力大 (20~30 N), 弹簧触头圈多接触压力分散、每圈只有 6~7 N, 因此弹簧触头对镀银层的运动磨损比梅花触头小。GIL 选用弹簧触头也是基于弹簧触头在电网已有连续运行 15 年以上未更换的实际经验。

2.2.3 提高弹簧触头使用寿命的措施

1) 按文[1]第 8 章设计和核算触头的长期通流能力 I_r 和短时通流能力 I_k , 其设计裕度对于文中所论述的重要工程用 GIL 不应小于 20%。

2) 镀银厚度不小于 $12 \mu\text{m}$, 其触头镀银层耐磨性可以与 GCB 弹簧触头分合试验数据作对比分析如下:

GCB 分一次行程 $\geq 150 \text{ mm}$, 镀银层厚 $50 \mu\text{m}$, 触头银层不露铜可分合操作 10 000 次。触头银层每磨损 $1 \mu\text{m}$ 对应电接触点运动的行程 $S_1 = 2 \times 150 \text{ mm/次} \times 10\,000 \text{ 次}/50 \mu\text{m} = 60\,000 \text{ mm}/\mu\text{m}$; GIL 触头每天因日温差伸缩量 $\leq 15 \text{ mm}$, 一年为 $2 \times 15 \times 365 \text{ mm} = 10\,950 \text{ mm/年}$ 。每 μm 银层可承受的磨损时间 $t = (60\,000 \text{ mm}/\mu\text{m}) / (10\,950 \text{ mm/年}) = 5.479 \text{ 年}/\mu\text{m}$; 弹簧触头 $12 \mu\text{m}$ 的银层可耐磨损时间为 $T = 5.479 \text{ 年}/\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m} = 65.75 \text{ 年}$ 。

制造工艺保障, 这是决定电接触寿命最重要的因素: ① 弹簧热处理工艺不能失误, 否则硬度变化会导致弹性不合格, 接触压力变化, 接触电阻快速增长; ② 镀银层厚度、硬度、结合力必须合格, 并坚

持提供随槽电镀样板由供需双方检验的质量控制制度; ③ 弹簧触头中心定位杆与动触头 (母线) 同轴度要调好, 杜绝两者不同轴时强行插入挤坏弹簧触头或挤破镀银层现象。

3) 弹簧触头及母线动触头镀炭银改善电接触减少磨擦力, 炭银层具有自润滑功能, 当产品运行一段时间, 电接触面涂抹的银层保护润滑脂 (Z9203 等) 挥发后, 炭银自润滑功能仍在。

以上多方面的设计制造措施都落实了, 尤其是制造质量监控措施落实了, GIL 电接触 30 年不维护是可实现的。

3 母线支撑的可靠性设计

3.1 母线短路电动稳固性设计

如图 1 GIL 主要结构所示, 长 18 m 的母线两端用绝缘件支撑时在短路电流冲击下, 短路电动力会使母线产生塑性变形吗? 在母线自身重力作用下变形下垂挠度会影响 GIL 内绝缘吗? 这是 GIL 可靠性设计必须认真核算的^[2]。

3.1.1 短路电动力的影响

GIL 发生三相短路故障时, 故障电流的交流分量被外壳反向感应涡流平衡, 其直流分量 I_{km} 将产生强大的电动力 F_B , 其三相短路电动力, 见图 2。

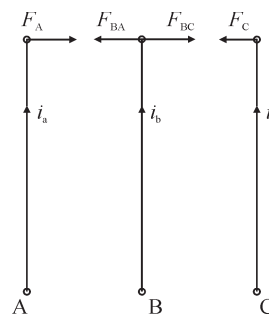


图 2 三相短路电动力

Fig. 2 Three-phase short-circuit electric power

$$\begin{aligned}
 F_B &= F_{BA} - F_{BC} = 2 \times 10^{-7} I_{km}^2 \frac{l}{a} \\
 &[\sin wt \cdot \sin(wt - 120^\circ) - \sin(wt - 120^\circ) \cdot \sin(wt - 240^\circ)] = \\
 &2 \times 10^{-7} \cdot I_{km}^2 \frac{l}{a} \left(\frac{3}{4} \cos 2wt - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2wt \right) \\
 \text{令 } dF_B/dt &= 0, \quad -\frac{3}{2} \sin 2wt - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2wt = 0, \quad \text{亦} \\
 \tan 2wt &= -1/\sqrt{3}, \quad \text{在 } wt = 165^\circ + n\pi \text{ 时 } F_B \text{ 有极值} \\
 F_{Bm} &= 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} \cdot I_{km}^2 \left(\frac{3}{4} \cos 2 \times 165^\circ - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2 \times 165^\circ \right) = \\
 &1.73 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} I_{km}^2 \text{ N} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)中: a 为相中心距,mm; l 为母线长,mm; I_{km} 为短路峰值耐受电流,A。

F_{km} 均匀分布在母线上,母线一端为固定支点,另一端为水平向可移动支点,在 F_{km} 作用下母线产生的弯矩为

$$M_w = \frac{ql^2}{8} = \frac{F_{Bm} \cdot l^2}{8} = F_{Bm} \cdot l/8 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (2)$$

弯矩在母线上产生的弯曲应力为

$$\sigma_w = M_w / \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \text{ MPa} \quad (3)$$

式(3)中: D 为母线外径,mm; d 为母线内径,mm; l 为母线长(母线中点不设支撑时, l 为基本母线长度,母线中点设支撑时, l 为基本母线长的一半)。

当计算 $\sigma_w \geq [\sigma_{0.2}] = 176 \text{ MPa}$ 时,母线会产生塑性变形,因此母线中点必须设置绝缘支撑点;当 $\sigma_w \leq [\sigma_{0.2}]$ 时,中点可不设支撑。

3.1.2 母线自重变形挠度与母线支撑

两点支撑的母线中点在重力作用下的下垂挠度为

$$f = \frac{5ql_0^4}{384EI} \text{ mm} \quad (4)$$

式(4)中: q 为每单元母线重,N/mm; l_0 为两支点间母线长,mm; E 为铝管6063弹性模量 $0.7 \times 10^5 \text{ MPa}$ (70000 N/mm^2); $I = \pi(D^4 - d^4)/64$,铝管转动惯量, mm^4 。

求出挠度 f 后,经电场计算确定母线自重变形是否影响内绝缘。综合考虑计算值 σ_w 及 f 的影响后通常长18 m的基本母线中点必须设绝缘支撑。长10~12 m的母线中点可以不设中点支撑。GIL工程设计时,还是应该根据母线内外径和短路电流值进行电动稳定性核算。

3.2 母线支撑方式的可靠性比较与选择

母线支撑可用盆式绝缘子也可用支柱绝缘子,两者对比见表3。

表3 母线支撑方式对比

Table 3 Comparison of busbar support modes

对比项	盆式绝缘子	单支柱/双支柱绝缘子	三支柱绝缘子
表面电场分布均匀性	好	较好	较好
母线及外壳直径相同时,绝缘件闪络距离 L_n	设计方便, L_n 值较大	设计受限, L_n 值较小	设计方便, L_n 值较大
母线支撑的稳定性	好	较差	稍差
浇注工艺及质量的可控性	较好	较好	较差
电网使用量/运行时间	多/长	少/短	少/短
运行可靠性	严格控制制造及组装质量时,事故较少	较差,有事故发生	事故较多 ^[3-4]
制造成本	较高	低	与盆式绝缘子相近

注:现运行的单/双支柱绝缘子不带包绕母线的绝缘筒,爬距偏小,容易发生闪络事故;如果支柱带包绕母线的绝缘筒,也可得到较大的 L_n 设计值和较高的沿面闪络电压。

从表3对比分析可见,选用盆式绝缘子支撑母线更合理。三支柱绝缘子可用作母线中点滑动支撑,与单/双支柱相比具有更高的抗短路电流的电动稳定性。但是,必须重视支柱结构的可靠性设计和制造质量的严格控制。

4 三支柱绝缘子绝缘可靠性的设计与制造

在南网运行的550 kV GIL中的三支柱绝缘子,仿国外产品设计,存在设计隐患,制造时质量管理失控,导致支柱绝缘子局部放电多发,多处发生支柱爆炸引发GIL对地闪络^[3-5]。为避免类似故障,文中对支柱可靠性设计^[6]和制造质量的监控^[7-8]提出以下4点改进意见。

4.1 支柱与母线用防松螺钉紧固

为避免支柱绝缘体与母线导体间产生装配间隙(以及由此引发局放危害),在支柱中真空浇注铝筒嵌件5(见图3(a)),确保环氧树脂与铝筒嵌件可靠接触无缝隙。

铝筒嵌件与母线铝管间怎么联结?现有产品在嵌件(不足5 mm厚的铝筒)上钻小孔,在小孔上点焊,试图将嵌件与母线焊成一体(见图3(a)序号3处)。

焊接电流的调整、点焊时间的控制以及工人电焊操作诸多的分散性,都可能导致嵌件与母线连接不牢,嵌件筒局部翘起,产生悬浮电位而引发局放^[3]。

为消除这种设计隐患,应该将点焊改为螺钉联结(见图3(a)序号3),沉头螺钉3涂螺纹不可拆紧固

胶后拧入母线或将螺钉头点焊修光锁紧。

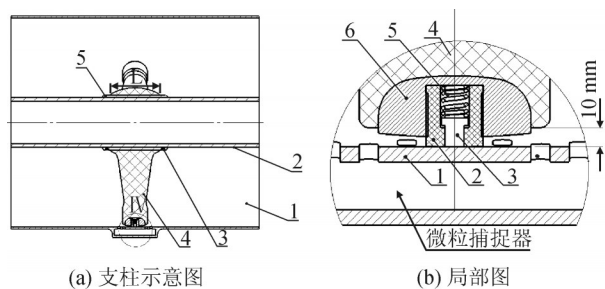


图3 支柱结构

Fig. 3 Strut structure

4.2 支撑点的耐磨性与接地可靠性设计

1)在绝缘支柱—SF₆—壳体三交区为避免产生高场强的楔形气隙,在支柱绝缘体4与外壳1之间设计了宽10 mm的间隙,见图3(b)。

2)支柱在壳体内表面滑动时,为避免产生金属微粒,图3(b)中序号2选用高耐磨塑料聚醚醚酮(PEEK)制作。支柱嵌件6经小弹簧5和有自润滑功能的石墨铜滑块3接地。PEEK耐磨滑块上的螺纹可调节三支撑点的外圆公差。

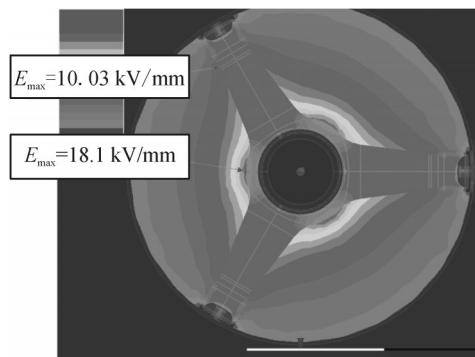
4.3 改善电场分布控制表面场强

文中综合考虑 GIL 壳体直径技术及经济要求,对 1 000 kV 绝缘支柱的形状尺寸进行了优化设计, GIL 取壳体内径 $\phi 840$ mm,在 2 400 kV 雷电冲击电压下进行电场计算,要求支柱表面切向场强不大于 12 kV/mm,母线合成场强不大于 24.5 kV/mm(SF₆最低工作气压 0.4 MPa 表压时)^[1]。文[1]表 4-1 所列场强设计允许值总结了国内外一些重要企业的研究成果,经数十年新品研发使用及数以万计产品运行的检验,其值可靠且具有较好的技术经济指标。

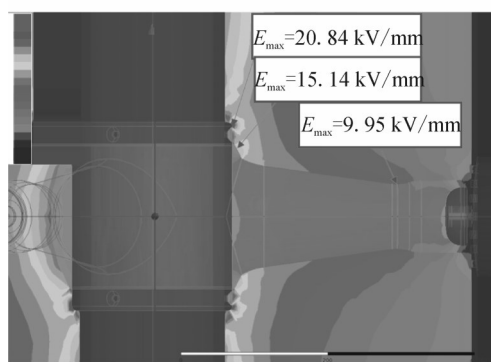
支柱电场分布见图4。支柱8°斜面最大合成场强为 10.03 kV/mm,沿面切向场强为 9.93 kV/mm。支柱圆柱面绝缘筒圆角处最大合成场强为 18.10 kV/mm,考虑文[1]中表 4-1 所列场强设计允许值与放电机电率为零的场强相比还有 10%裕度,支柱表面切向场强的实际设计裕度超过 25%。支柱树脂与两端嵌件表面场强 2.71~3.12 kV/mm(工作相电压下)都在长期运行无局放的安全范围内^[9-10]。

4.4 强化设计、制造及出厂试验全过程的质量监控

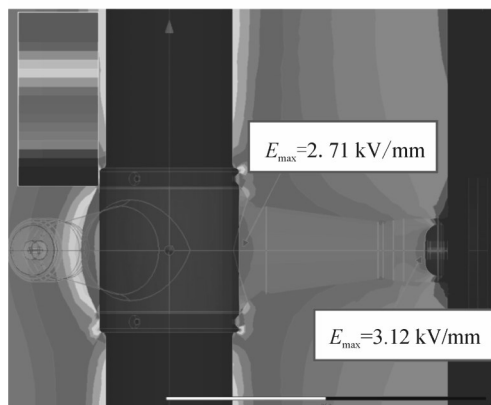
为避免温度变化在树脂与嵌件筒间出现间隙,浇注前在嵌件筒上应涂一层导电橡胶以作缓冲。在南网爆炸的 GIL 支柱碎片中,观察到嵌件筒外圆面有手掌大一块被电弧烧伤的铝灰白色表面(未见导电胶),见图 5(a)、(b)。此处已产生树脂—金属嵌件间的微小间隙,间隙场强骤增(仿真计算相电压下达到 9.9 kV/mm,是许用值的 3 倍)必然产生局放并引发高



(a) 导体施加2 400 kV电压时径向表面合成电场强度



(b) 导体施加2 400 kV电压时轴向表面合成电场强度



(c) 在相电压636 kV时两端嵌件表面场强

图4 支柱表面场强计算值

Fig. 4 Calculation value of pillar surface field intensity

能量电弧烧裂绝缘支柱、对地闪络,见图 5(c)。产生这后果的原因是:嵌件去油清洗不净,或涂导电胶前(或后)零件被污染。见图 5(d),在支柱地电位嵌件面也发现类似问题^[4]。直到文中写作时(2019年1月20日)南网一段 500 kV GIL 又发生了这种事故。

因此,要保证支柱绝缘可靠性,必须从支柱设计图样上强调:严格控制制造全过程的高清洁度,在例行的出厂试验项目中必须列入射线探伤与局部放电测试。制造、试验全过程严格执行设计要求。

针对三支柱浇注工艺难度大的特点^[11],应注意模具结构设计以改善树脂流动性;控制浇注树脂流动速度,不宜太快,使模具内残留的空气尽量排挤

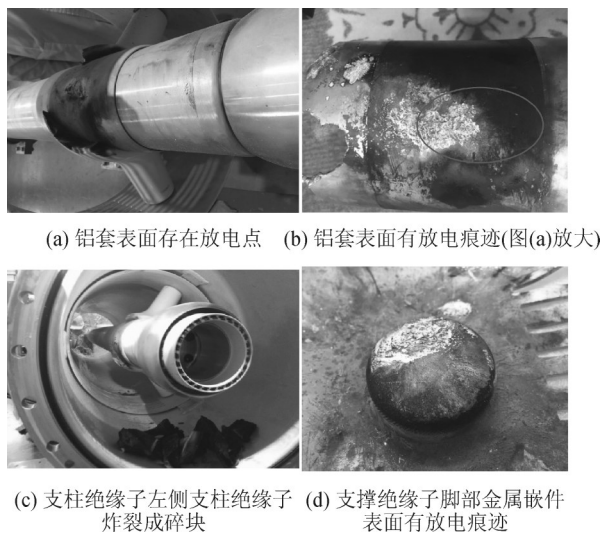


图5 制造质量失控引发支柱炸裂照片

Fig. 5 Manufacturing quality out of control causing pillar burst photo

入浇口空腔,保证绝缘子内部无气泡;保温固化时间应足够,若提前出炉,温度还很高的绝缘体尚未完全固化,嵌件快速冷却收缩,有可能与树脂间出现微小裂缝,留下局放隐患。

有很少数产品绝缘件的金属嵌件表面喷砂清理后,不涂半导体橡胶就浇注入环氧树脂中,没有缓冲层,运行时树脂与嵌件之间出现微小裂缝的可能性更大,这种设计是不可取的。

5 盆式绝缘子的可靠性设计

5.1 主要结构

采用内置式盆式绝缘子,盆子中心嵌件两端设弹簧触头作母线电联结。采用双重椭圆形橡胶圈密封,见图6。

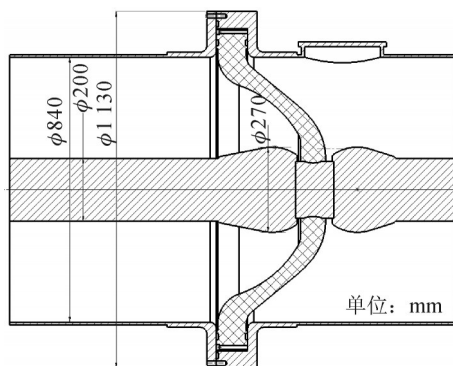


图6 内置式盆式绝缘子主要结构

Fig. 6 Main structure of built-in basin-type insulator

重要工程 GIL 的绝缘子可靠性设计,除认真处理好文[1]第 6.2.4 节强调的有关问题外,还应研究绝缘子表面可能出现的表面电荷积聚现象。

5.2 绝缘件表面电荷的产生

绝缘件表面电荷的聚散及其对绝缘的影响,不再只是直流高压电器讨论的专题,交流高压电器也应研究^[12]。表面电荷产生的原因有:①在 GIL 两端有容性负荷开断时,GIL 的相应端会出现一定数量的直流高压,残留一定量的静电荷;②盆式绝缘子表面若存在金属微粒、绝缘子表面有缺陷,绝缘子与电极接触不良时,在一定电压下都会产生局部放电,局放产生的电荷会附着在绝缘子表面;③盆式绝缘子表面污染后,表面电导变化导致介质表面电压的再分配,可能出现局部表面电场畸变产生局部放电和表面电荷沉积;④盆式绝缘子电极带电后,在绝缘子表面法相电场作用下,部分电子附着(积聚)在高法向场强的绝缘子表面;⑤绝缘子上的表面电荷还会吸附 SF₆ 中飞翔的导电微粒,进一步加强了表面电荷的积聚。

5.3 表面电荷的影响

绝缘子表面电荷积聚处电场分布畸变,局部场强升高,有可能导致绝缘子表面产生局部放电,并进一步发展成绝缘子表面对地闪络^[13]。或者,在绝缘子承受雷电冲击电压时,表面电荷(有一定的直流高压)的存在会使绝缘子承受雷电冲击的能力大幅度下降。

如营口华能电厂 252 kV GIS 盆式绝缘子不明原因的闪络,在隔离开关 DS 正常换相操作时(DS 没有切负荷),断口间没有开断电弧,而发生了 DS 盆式绝缘子放电事故。检查无其他异常,认为这是表面电荷积聚引起电场畸变,盆式绝缘子表面局部场强大幅度升高,在正常工作电压下产生局放并发展为闪络^[14]。这种不明原因的盆式绝缘子闪络在其他电站也发生过。

表面电荷的不良影响并不是时时存在处处存在。绝缘子积聚表面电荷尚未达到危及绝缘安全时,也可以通过以下方式泄放衰减^[15]:①通过绝缘件的体积电导;②沿绝缘件的表面电导;③材料自然辐射生成的气体离子与表面电荷中和;④电压等级的差异、电网结构及电气参数的不同,表面电荷衰减时间可能是几十分钟也可能长达几十个小时。电荷衰减后其不良影响便消除。

5.4 限制表面电荷积聚不良影响的设计措施

1)改善盆式绝缘子表面电场分布,通过绝缘件形状调整、绝缘件表面与高电位电极相对距离的调整,来控制绝缘件表面切向场强不超过允许值,同时也使法向场强尽量小,以减小表面电荷的积聚;

2)确定必要的绝缘设计裕度。

为抵御表面电荷的不良影响,国内外研究者众

多,目前尚无有效的消除表面电荷的适于产品使用的方法。比较一致的处理办法是将绝缘子的绝缘裕度提升到20%左右,以抵御表面电荷对闪络电压的影响。

文中介绍的1100 kV 盆式绝缘子优化设计后电场仿真计算结果见图7。

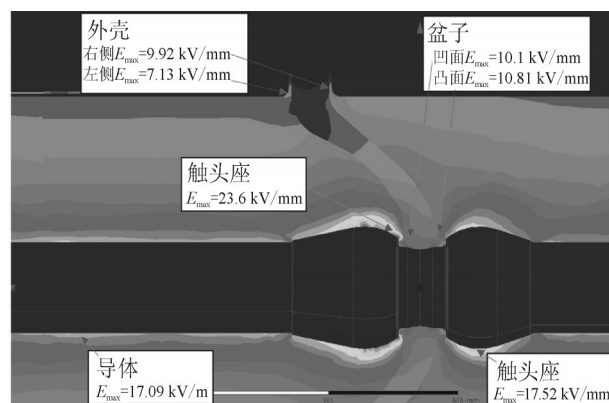


图7 导体施加2400 kV电压时各位置处电场强度

Fig. 7 Electric field intensity at various locations when the conductor is applied with a voltage of 2400 kV

各部位场强为:

在雷电冲击2400 kV电压下,盆式绝缘子凸面最大合成场强 $E = 10.81$ kV/mm,切向场强 $E_{\tau} = 8.80$ kV/mm,影响盆式绝缘子闪络特性的 E_{τ} 值的设计裕度大于30%(与临界闪络场强13.2~13.8 kV/mm相比, SF_6 0.4 MPa表压时)。盆式绝缘子在2400 kV电压下最大法向场强 $E_n = 2$ kV/mm,其值较小,对表面电荷积聚的影响不大。2400 kV时,内导最大场强为 $E_1 = 23.6$ kV/mm,外壳最大场强 $E_s = 9.92$ kV/mm,盆子中心嵌件在 $1100/\sqrt{3}$ 工作电压下为 $E_4 = 2.9$ kV/mm,都在允许的安全工作场强范围内。

6 金属微粒的危害与防治

6.1 金属微粒的飞翔与危害

金属微粒因自重会散落在 GIL 壳体内表面或母线导体上。GIL 运行时母线及外壳带有极性相反的电荷,在母线与外壳间建立空间电场,微粒承受电场力 F_e 作用。当电场力 F_e 克服其重力和与导体(或外壳)间的粘附力时,微粒举起向反极性导体(或壳体)运动^[6]。金属微粒达到反极性导体(或壳体)后进行电荷交换并带上反极性电荷向反方向运动。金属微粒在导体或壳体上反复跳动、反复充电放电交换电荷,并伴随着放电发光——这种反复跳动放电发光现象称为飞蝗现象。

较大尺寸的线形金属微粒向反极性导体运动将接近导体时,微粒与导体间局部场强增大出现击穿,

并可能形成流注(类似尖端放电),流注向另一极发展而发生 GIL 内部间隙击穿。如果线形金属微粒落在绝缘子上可能导致局部电场畸变、局放和闪络。

可见,减少金属微粒的危害也是 GIL 绝缘可靠性设计的重要措施之一。

6.2 金属微粒的预防

金属微粒的防治,以防为主:

1) GIL 组装过程中强化洁净度管理,从零部件清理(特别是壳体涂漆前时焊缝打磨与清理)、个人卫生、环境卫生及组装后的真空吸尘操作,彻底排除“带入微粒”的可能性;

2) 加强电接触件的镀银层硬度及结合力的检验,银层硬度及结合力不合格品不能组装。GIL 运行时因可动件摩擦较容易产生金属微粒的部件就是触头,因此强调电接触零部件银层硬度及结合力检查特别重要。

6.3 金属微粒危害的治理方案

6.3.1 设置微粒驱动器及收集陷阱

在电场力 F_e 作用下微粒与斜面电极碰撞时,产生水平向分力 F_d ,微粒受力分析见图8。

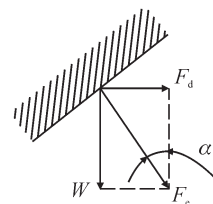


图8 微粒受力分析

Fig. 8 Particle force analysis

图8中, $F_d = F_e \cdot \sin \alpha$ 利用这一特性,可将触头座设计成某种斜面(A-B, C-D) ($\alpha = 2^\circ \sim 5^\circ$),粒子驱动与捕捉设计,见图9。形成粒子定向驱动器,使飞到绝缘件附近的金属微粒朝远离绝缘子方向运动,并在母线适当位置设置局部低场强区W,金属微粒运动到W低场强区后,微粒与内导间的静电吸力下降,当小于重力时落于壳体的粒子陷阱(粒子捕捉器)中,如图9中的粒子a、b、d。

6.3.2 母线及壳体表面涂绝缘漆

壳体及母线导体上的绝缘漆使金属微粒与壳体(或内导)隔离,减少了微粒的充电速度与充电量,对应某一电压下的内导(或壳体)对微粒的静电吸力变小了,提高了微粒的举起电压。

绝缘层使微粒电荷重新分配:微粒与壳体(或内导)接触端带有与壳体(或内导)极性相反的电荷(另一端带相同电荷),因此微粒与壳体(或内导)间产生吸力,限制了微粒飞翔的可能性,减少了它对 GIL 绝

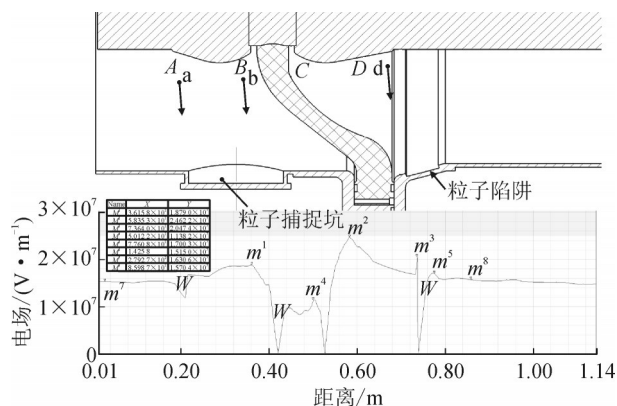


图9 粒子驱动与捕捉设计

Fig. 9 Particle drive and capture design

缘的危害。

GIL母线及触头座等内导表面喷1231等绝缘清漆,壳体内表面喷砂清理后涂环氧锌黄底漆和白色环氧聚酰胺磁漆,效果较好。

6.3.3 电老炼去金属微粒

通过电老炼使微粒运动到图9所示的W低场强区,然后去掉外加电压使微粒落于陷阱。通过一定电压一定时间的电老炼也可使部分微粒放电烧掉,双重作用达到净化金属微粒的目的。

产品在出厂试验或运行现场进行电老炼试验时,要谨防电压快速突增,以免微粒局部放电过大引发产品内部绝缘击穿或闪络。因此电老炼程序应该是低电压(长时间)与高电压(短时间)相配合。特高压GIL电老炼可参照DL/T 304—2011推荐的GIL老炼程序—— $1.2U_n/\sqrt{3} \times 15 \text{ min} + 0.8U_g \times 3 \text{ min} + U_g \times 1 \text{ min}$ (U_n 为额定电压, U_g 为工频耐受电压)^[17]。也可根据产品制造实际情况,通过研究试验,对加电压时间做调整。现场检修投运前做电老炼试验电压最高值不超过 U_g 。

7 隧道/管廊 GIL 高气密性设计与制造质量保障

7.1 年漏气率与补气周期

目前SF₆电器年漏气率 $y_1=0.5\% \sim 1\%$,额定气压 P_r —补气气压—最低工作气压递差大都在0.05 MPa。以漏气率0.5%计算补气周期 T 为: $T=0.05 \text{ MPa}/(P_r \times 0.5\%)$,当 $P_r=0.5 \text{ MPa}$ 时, $T=20$ 年,如果不补气可工作40年。可见0.5%年漏气率与产品30~40年使用寿命期协调。

隧道/管廊GIL特殊工作环境要求产品有更高的气密性,对这类产品应进行更可靠的气密性设计和更严格的制造质量控制。

7.2 GIL高气密性结构设计

年漏气率低于0.5%时,可采用高气密性结构设计,主要措施分述如下。

7.2.1 采用内置式盆式绝缘子

流体通过缝隙的泄漏流量 Q 为

$$Q = \frac{b\delta^3}{12\eta l} \Delta P \quad (5)$$

式(5)中: b 为O型圈周长; δ 为充气后O型圈与法兰面的微观分离间隙; η 为流体动力粘度; l 为O型圈装配压紧时与法兰接触环面宽; ΔP 为壳体内、外压差。

图6中,与常规GIS外装式盆式绝缘子相比,泄漏面由2个变为1个,每个密封面的密封圈由1个增为2个。因此,在密封结构、材料及加工工艺相同条件下(式(5)中 b 、 δ 、 η 相同),高气密性GIL年漏气率 y_2 会明显下降: $y_2=0.5\% \times 0.5 \times 0.5=0.125\%$

7.2.2 采用近似椭圆密封圈

以代号为T10的椭圆密封圈为例:

近似椭圆密封圈见图10。图10中: $d_1=10 \text{ mm}$, $d_2=16 \text{ mm}$, $r=5 \text{ mm}$, $R=25 \text{ mm}$ 。按密封圈压缩率25%为例,其密封槽宽 $B=19 \text{ mm}$,槽深 $w_1=7.4^{+0.1} \text{ mm}$ 。与常规O形圈相比,椭圆密封圈工作时它与金属密封面的接触环面宽(计算式(5)中的 l 值)至少比O型圈大1倍。

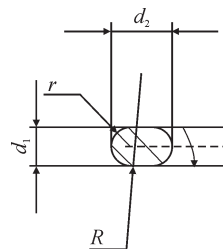


图10 近似椭圆密封圈

Fig. 10 Approximate elliptical seal ring

由此,文中介绍的高压气密性GIL的年漏气率又减少一半以上: $y_2<0.5 \times 0.125\% = 0.0625\%$ 。

如果产品的制造、运行维护检修都能达到和保持这个设计指标,那么补气周期为160年左右。产品制造与运维很难达到这个指标,这个指标与产品寿命不匹配。因此,制定和严格执行0.125%年漏气率指标符合产品实际需要。

7.2.3 密封圈材料的选择

高气密性用密封圈应选用HX807改性三元乙丙橡胶压制,因为其具有如下特点:

- 1)硬度适中,符合高气密性要求,其邵尔70±5;
- 2)恒定形变(25%时)压缩永久变形(100℃×22h)很小,5%~10%;

3)低温性能优良。脆性温度低, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 压缩变形很小, 8%; 密封可靠, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 无泄漏;

7.2.4 有效寿命长

老化试验测试有效寿命长达 50 年。目前, 还没发现性能优于 HX807 的橡胶。若有更优橡胶, 可择优使用。

7.2.5 严格加工质量管理

没有严格的加工和装配质量管理就没有产品的气密性, 高气密性更是奢望。为了保证隧道/管廊 GIL 的高气密性, 以下 5 条必须做到:

1)粗糙度为 $Ra3.2\sim6.3\text{ }\mu\text{m}$ 的密封面不应有任何划痕、碰痕和污迹;

2)每批橡胶成份必须检测, 各种性能指标必须合格;

3)焊接壳体的焊缝必须逐渐进行 X 射线探伤(直焊缝)或着色检查(环焊缝);

4)每只壳体必须进行 $2P_m\times8\text{ h}$ 例行水压试验(P_m 为最高工作气压), 多年的生产和运行经验证明: 8 h 高水压试验对于剔除焊缝中的漏气隐患十分重要。没有这个试验, 靠充 SF_6 检漏也无法暴露藏在焊缝中的可能泄漏通道。有企业强调 8 h 太长, 而将水压时间压缩到 4 h, 因时间不足, 使少数焊缝中的气孔或丝状漏气通道仍被较薄的一层焊皮堵住, 现场运行不久被冲破, 漏气。高气密性 GIL 壳体 8 h 高水压例行试验必须坚持;

5)个人衣着及环境洁净度、产品零部件的洁净度以及组装环境的洁净度对产品气密性影响很大, 不可疏忽。例如金属密封面上卡有极小段细头发丝、套管密封面上残留有少量研磨瓷粉或切削纤维细渣, 都会出现泄漏。

8 隧道/管廊 GIL 的适用性设计

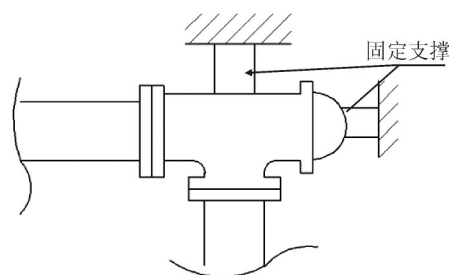
8.1 GIL 外壳支撑/接地的适用性和可靠性设计

8.1.1 波纹管变形力的平衡与固定支撑的设置

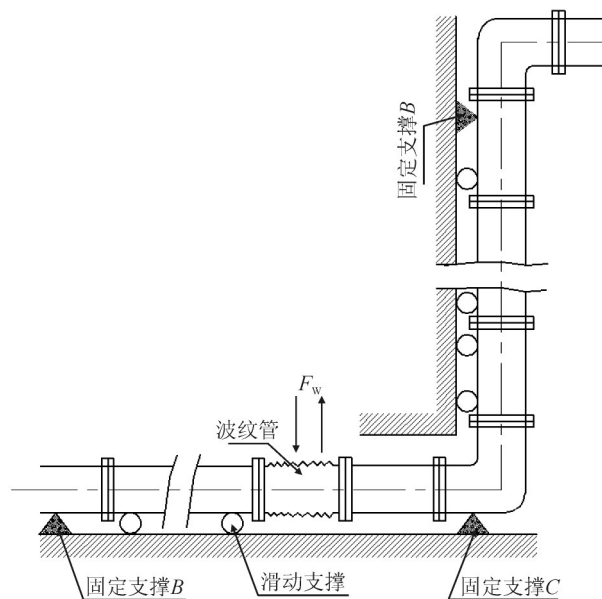
运行中的 GIL 壳体温升(下降)时壳体膨胀(收缩)而压缩(拉伸)波纹管。经计算, 每 18 m 长的壳体温升 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 伸长 12.9 mm, 每气隔单元 4 个基本母线壳体伸长 51.6 mm。内径为 840 mm 的百万伏 GIS/GIL 用波纹管每变形 1 mm 产生的弹性变形力为 1 300 N。GIL 每个气隔单元设置的波纹管产生的总变形力 F_t 为 67 080 N(约 6.8 t), 在 GIL 直线段此力通过可拆单元外壳传递到下一级基本母线外壳的固定支撑上, 4 个 M16 固定安装螺栓可承受此力, 不必采用结构复杂价格贵的力平衡波纹管。

在 GIL 任一角度拐弯处, 为平衡此力, 不让 F_t 传

递到悬空的外壳上, 必须在 GIL 拐弯处外壳设置固定支撑点, 以免此力作用在拐点外壳上引起外壳变形或相邻密封面漏气, 见图 11。



(a) 弯头处的固定支撑



(b) 合适的支撑

图 11 GIL 拐弯处的固定支撑

Fig. 11 GIL fixed support at the corner

竖井中的 GIL, 每个气隔母线单元必须设一个固定支撑。在垂直段与水平段拐弯处, 应按图 11 设置固定支撑, 不能使拐弯处成为自由的悬浮点; 否则, 在图 11(b) 中没有固定支撑 C, 垂直段的热胀冷缩将使水平段临近的波纹管承受频繁而量大的径向变形力 F_w , 有害于该波纹管的强度和使用寿命, 而且水平段的电接触在摇动中会损坏。

8.1.2 固定支撑结构的适用性设计

管廊 GIL 检修拆装空间狭窄, 对壳体支撑设计要求简洁方便, 也要求弹簧触头定位杆的设计与壳体支撑的设计有良好的配合。

弹簧触头中心定位杆对其电接触可靠性有决定性影响^[1], 定位杆第二个功能是支撑母线并承受可能发生的母线短路电动力, 第三功能是 GIL 分段组装对接时给母线动触头插入弹簧触座作导向, 见图 12(d)。

过江河 GIL 安装在隧道上部两侧, 三相垂直布

置,见图12(a),GIL固定在安装支架上,为方便安装调整,在固定支撑与滑动支撑处都装有滚轮,使壳体轴向移动灵活;滚轮螺栓 G_1 可上下调节轮高,使壳体径向调整方便,见图12(b)。在狭窄的管廊/隧道空间,这是GIL设计者应该考虑的方便适用的支撑设计。

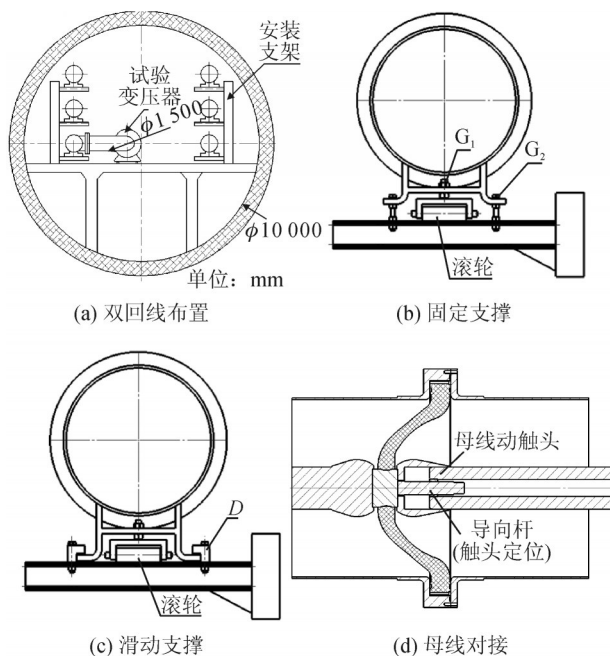


图12 固定支撑与滑动支撑

Fig. 12 Fixed support and sliding support

8.1.3 滑动支撑的功能设计

每个气隔单元的起点外壳设一个固定支撑,见图12(b),在另一端配一个滑动支撑(见图12(c),其余3个基本母线和可拆母线壳体各设2个滑动支撑。支撑滚轮随GIL壳体热胀冷缩而滚动。滚动支撑两边的挡块D除了GIL轴向的导向功能之外,若发生地震还能有效防止GIL水平向摆动和垂直向跳动。

8.1.4 隧道/管廊GIL的接地

GIL外壳接地的目的是为了降低外壳感应电压、保障人身与设备安全并减小GIL对外界的电磁干扰。

1)特高压分箱式GIL若用末端单点接地,外壳无明显感应电流、温升高、能耗小,这是优点;单点接地明显的缺点是:在GIL三相外壳之间的感应电势使外壳电位升高,危及人身安全,尤其是在管廊狭小空间里,这个问题更不容忽视。

2)采用多点接地,外壳形成环流回路,外壳因电磁感应出现感应电流,其大小与母线电流相等方向相反,形成电磁屏蔽效应,对外界无电磁干扰。其缺点是外壳环流产生的热能损耗^[18]较单点接地时大,产品温升设计时应注意。

3)三相外壳还应装短接线,在三相外壳之间构

成电流通道,以减小外壳入地电流、降低外壳电位。

4)根据过江河隧道/城市管廊GIL线路较长的特点并参考某些研究计算,每个气隔单元外壳设2个接地点(两点间相距40 m左右),三相外壳之间每隔一定间距 L 设三相短接点并引出接地铝排与GIL专用接地线相联。利用三相外壳短接线减小入地电流,可将外壳感应电压控制在5 V以下。间距 L 受GIL工作电流、结构尺寸、相间距离等参数影响,通过GIL外壳回路中电磁感应、入地电流及外壳电位的仿真计算来确定^[19-20]。

每相外壳接地线、三相外壳短接线以及GIL安装支架接地线都与GIL专用接地线相联。

8.2 GIL巡查故障、检修测试的适用性设计

为查找和维修故障更方便,为减少维修停电时间,对于江河隧道/城市管廊GIL重点工程,可考虑以下两点适用性设计。

1)工程总体设计便于使用SF₆封闭式试验变压器对GIL进行高压绝缘试验、GIL特性测量和现场组装后的电老炼试验。

图12(a)中,外径为1 500 mm的试验变压器带有小车可在管廊中移动。它的高电压输出端与GIL可拆母线段上的试验接口可方便地对接。

该试验变压器输出工频电压1 250 kV,可接试验负荷10 000~15 000 pF。以1 100 kV GIL为例,每个气隔单元的电容近似计算为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi \times 1 \times 0.0021 \times 8.85 \times 10^{-12} F/m \times 80 m}{\ln(0.84 m/0.2 m)} = 3106 pF。$$

考虑计算误差15%, C 约等于3 600 pF,该试验变可供长300~330 m的百万伏GIL进行现场工频耐压试验和电老化试验。

2)对于长1 000 m以上的GIL工程,可考虑利用封闭式隔离开关将GIL分为数段。例如,百万伏GIL将4个气隔单元组成一段,段间用GIS中的DS联结,每段长320 m,隔离开关(带接地开关)剖面图见图13。要对GIL进行分段检测时,可使相应的隔离开关分闸,从高压试验接口对GIL进行高电压相关试验或回路电阻检测。

GIL分段设计的好处是:

1)运行中的GIL配合超声波和UHF电磁波局放检测仪,可分段查找故障点,快而准,减少停电时间;

2)新装或检修后组装的GIL,可分段进行电老炼和绝缘试验,能准确可靠地消除绝缘隐患。

8.3 隧道/管廊GIL绝缘故障监测的可靠性设计

监测GIL内绝缘状态的必要性人人皆知,但如

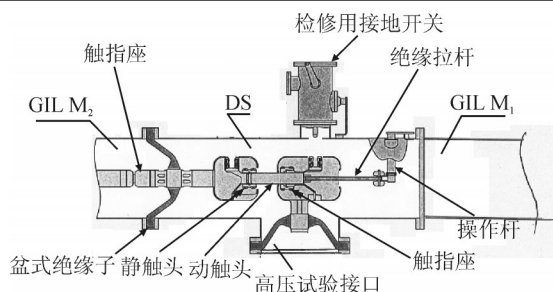


图 13 隔离开关(带接地开关)剖面图

Fig. 13 Sectional view of isolation switch

(with ground switch)

何保证这种监测的可靠性? 有些 GIL 制造和使用者不太重视, 拿来就用, 很难避免诸如 GIL 内部绝缘件已爆炸而局放检测仪毫无反应等现象^[3]。

江河隧道/城市管廊 GIL 大都是国家重点工程^[21], 在这些 GIL 工程总体设计时一定要对绝缘故障监测装置进行可靠性设计和适用性验证^[22-23]。

8.3.1 局放监测系统可靠性设计要求

这项工作要求 GIL 工程设计者弄清下列情况, 作为可靠性设计的依据:

国内外比较先进的 GIS/GIL 局放监测技术是什么? 在哪里? 由哪个单位研发的? 该单位研究硬件装置是否充足? 研究成果有什么创新? 局放监测系统的主要技术指标是否先进和适用? 实际使用可靠性如何? 等等。

8.3.2 局放监测系统可靠性设计示例

针对以上要求, 作为示例将局放监测系统可靠性设计内容分述如下。

1) 在国内外已使用的 UHF 局放监测装置中, 适用性和可靠性较好的是中国首创的 HD-iPD02 型介质窗口式局放 UHF 电磁波检测系统。

该系统包括: 介质窗式超高频传感器+传输线+现场采集单元+局放信息分析和处理单元(IED)+电站终端服务器。

介窗传感器装在 GIL/GIS 壳体外, 中间用环氧玻璃布板与 GIL/GIS 壳体内部的气体相隔。GIL/GIS 内部各种局放 UHF 电磁波从壳体手孔绝缘密封的环氧玻璃布板(介质窗口)传到体外传感器上, 可实现局放在线监测和 GIL 体外巡检。终端服务器可保存在线监测数据, 可对局放监测数据作高级诊断分析, 并可对内部绝缘故障趋势预警。

2) HD-iPD02 系统的主要特性满足使用要求。由北京华电智成电气通过多年局放基础技术的研究, 创新研发的 HD-iPD02 型局放特高频监测系统, 主要特点是: ①可靠性好。介质窗口将传感器与 GIL 的 SF₆ 腔体隔离, 装于 GIL 体外的传感器不影响

GIL 内绝缘, 传感器的拆装维修不影响 GIL 正常运行; ②灵敏度高。GIL 内部局放特高频(UHF)信号可无衰减地穿越介质窗板传到传感器, 比常规体外传感器灵敏度高 1 倍; ③抗干扰能力强。加装屏蔽的传感器能有效屏蔽电站的各种电磁干扰, 抗干扰能力比常规体外传感器高 1 倍。

3) HD-iPD02 的主要技术指标较高。其工作环温为 -20~70 ℃; 传感器检测频带为 (0.3~2) GHz; 传感器灵敏度实验室 5 pC/现场 20 pC; IED 检测灵敏度 S 为 -70 dB; 噪声传感器检测频带为 (0.3~1.5) GHz (与 -70 dB 对应的最小可检的局放信号功率 $P = \tan \lg \left(\frac{-70}{10} \right) p_0 = 1 \times 10^{-7} p_0 = 1 \times 10^{-7} \text{mW}$)。

4) 研制条件与创新成果。该技术研究基地是华北电力大学高电压与电磁兼容北京重点实验室。研究人力较强, 研究设备齐全, 以 220 kV GIS 实体为平台对局放基础技术作了长时间研究, 与工厂相结合开发成功基于介质窗口式 GIS/GIL 局放 UHF 传感器及在线监测与故障诊断系统。因属国内外首创新技术而获国家发明专利。

5) 放电图谱和智能诊断。建立了适于现场应用的 GIL/GIS 典型局放模式识别库。识别库中储存有金属尖端放电图谱, 见图 14、自由金属颗粒放电图谱(图 15 部分)及悬浮电位放电、气隙放电、绝缘件沿面放电等图谱。为实现 GIL/GIS 局放故障等智能诊断创造了可信的条件。

6) HD-iPD02 局放监测系统有较充足、可靠的使用经验

该监测系统自 2000 年以来在 500 座变电站的 GIS、主变、高抗、开关柜等设备进行了现场带电测试, 在众多电站各种主机上安装了 229 套在线监测系统, 共发现和确认了 136 例绝缘缺陷, 近一年来发现高危性绝缘件沿面缺陷间歇性放电案例 10 起。该监测系统在电网运行设备上表现出较好的局放监测可靠性。

根据以上的分析, 选用 HD-iPD02 系统进行 GIL 工程局放监测系统可靠性设计。

9 局放监测系统的应用设计与验证

各 GIL 工程结构形态多样, 给局放监测装置的布置带来许多变数, 为保证可靠的使用效果, 每个 GIL 工程都应进行监测系统的应用设计。

监测系统的应用设计目的是: 确认局放监测系统的灵敏度、被检局放量、局放信号传输衰减、传感器的配置间距(配置位置)及局放检测裕度等参数配

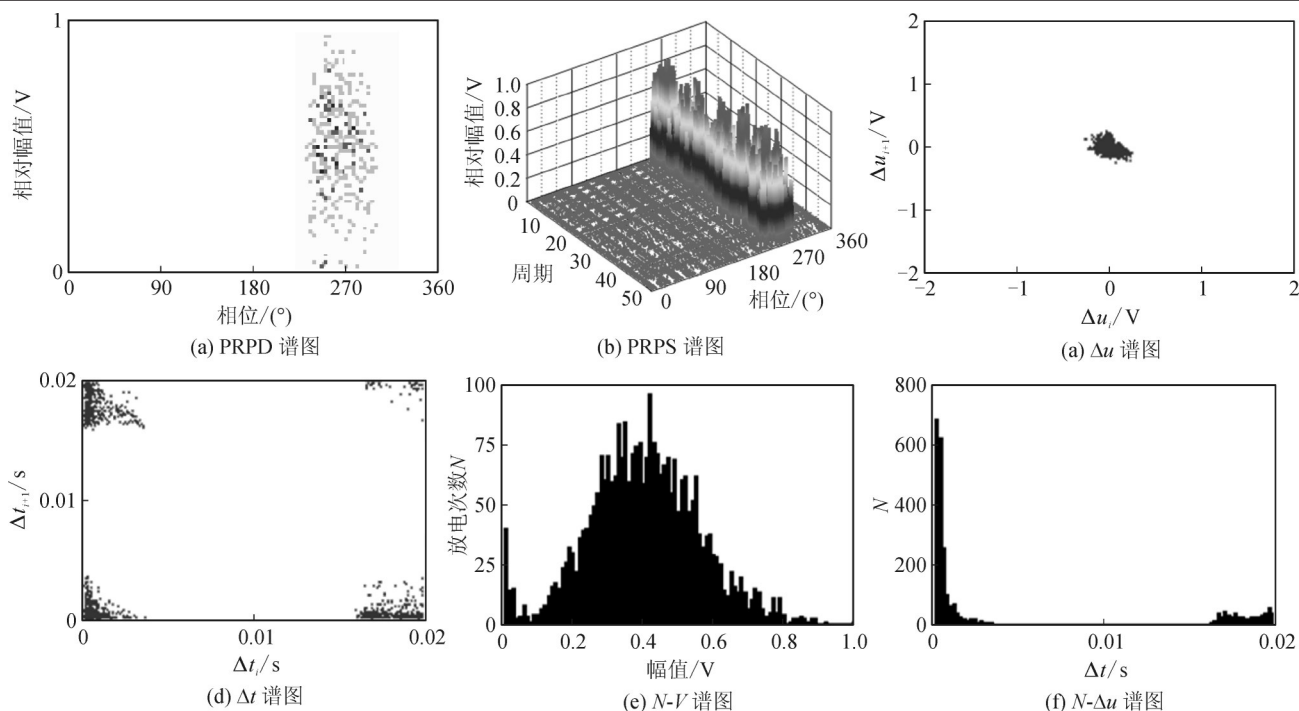


图14 金属尖端放电谱图

Fig. 14 Metal tip discharge spectrum

合是否适当。

为做好局放监测系统的应用设计, GIL制造厂应提供产品的下列实测数据: 局放信号通过一段基本母线的衰减量 L_1 , dB; 穿过一个盆式绝缘子的衰减量 L_2 , dB; 局放信号通过一个 GIL 弯头的衰减量 L_3 , dB; 两传感器之间局放信号的传输衰减量 L , dB, 包括上述 $L_1 \sim L_3$ 中的一项或多项。

局放监测装置制造单位应提供以下数据: 局放监测系统灵敏度 S , dB; 局放信号在传输线上的损失 C , dB; 与 5 pC 局放信号对应的 UHF 信号强度 U , dB。

GIL 工程设计者根据以上数据在考虑传感器配置方案时进行配置可靠性设计, 确认初步设计的两传感器间距 L_c 合理性, 考虑环境噪音干扰和测量误差, 通常要留测量裕度 $\gamma = 15$ dB。

相关计算示例如下:

若已知: 在长 L_c 的一段 GIL 中测得局放信号传输衰减 $L = 30$ dB; HD-iPD02 系统传输线损失 $C = 3$ dB;

与 5 pC 局放量对应的 UHF 信号强度 $U = -15$ dB;

局放监测系统灵敏度 $S = -70$ dB。

初设的传感器配置方案的局放检测裕度为:

$$\gamma = U - L - C - S = -15 - 30 - 3 - (-70) = 22 \text{ dB} > 15 \text{ dB}$$

因检测裕度 $\gamma = 22$ dB 较大, 因此可将 L 值增大, 亦可以把 GIL 两传感器配置的间距 L_c 增大。

根据以上分析得到产品检测空间局放信号传输衰减量 L 的稳妥值为

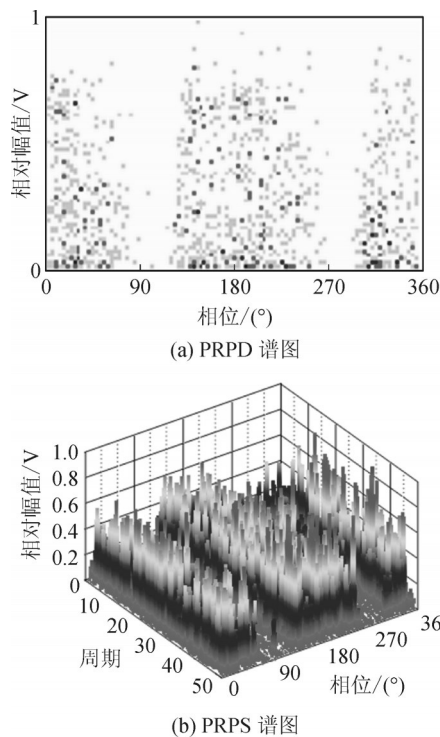


图15 自由金属颗粒放电特征谱图

Fig. 15 Characteristic spectrum of free metal particle discharge

$$L = U - C - S - \gamma \quad (6)$$

式(6)中: U 为与 5 pC 局放信号对应的 UHF 信号强度 (-15 dB); S 为局放监测系统灵敏度, dB; C 为局放信号在传输线上的损失, dB; γ 为检测裕度, 取 -15 dB;

由 L 值通过 GIL 模拟局放试验确定传感器配置间距 L_c 。GIL 工程设计时, 经过计算和局放模拟试验知道间距 L_c 值, 获得可靠的局放在线监测效果。盲目配置传感器会导致 GIL 内部绝缘监测失误。

GIL 内部绝缘故障的监测, 辅以超声波检测也很有必要。

10 结论

文中讨论了江河隧道/城市管廊 GIL 的可靠性和适用性设计, 提出了以下几点主要看法:

1) 用盆式绝缘子支撑母线比用支柱绝缘子更好; 三支柱绝缘子可用于数量较少的母线中点的滑动支撑。

2) 考虑交流 GIL 运行是也存在绝缘件表面电荷积聚的可能性提出了: 在盆式与支柱绝缘子形状和尺寸设计时注意电场分布的均匀性; 注意控制沿面切向场强值尽量小的同时, 其法向场强不能太大; 应积极研究表面电荷快速消散的办法, 在未找到有效办法前各绝缘件的绝缘性能应设计有不少于 20% 的绝缘裕度。

3) 从运行可靠性出发还提出了 GIL 外壳支撑的设计要点和可能出现的设计偏差。

4) 从产品运行适用性考虑提出了管廊 GIL 设隔离开关分段运行, 采用 SF₆ 封闭式工频试验变压器进管廊工作, 有利于 GIL 分段快速查找处理事故, 对于提高产品运行可靠性和使用方便性, 对于减少电网检修停电损失都有重要意义。

5) 为提高 GIL 内部局部放电在线监测的可靠性, 提出了局放监测系统可靠性设计的重要理念和可靠性设计要求; 还提出了局放监测系统的应用设计理念, 分析了传感器配置间距与各种传输损失、监测系统灵敏度和检测裕度之间的配合计算关系, 特别强调了局放监测系统与 GIL 配置后进行局放模拟试验(以验证可靠性设计)的重要性。

参考文献:

- [1] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
LI Bin. SF₆ high voltage equipment design[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [2] 阮全荣, 谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
RUAN Quanrong, XIE Xiaoping. Engineering design and practice of gas-insulated metal-enclosed transmission lines [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011.
- [3] 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 Grid Research Institute, CSG UHV Maintenance Test Center. GIL fault analysis report of Liangdu DC power transmission project[R]. Guangzhou: CSG Grid Research Institute, CSG UHV Maintenance Test Center, 2017.
- [4] 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.
- [5] 吴德贵, 彭翔, 李红元, 等. 一起 500 kV GIL 绝缘子炸裂故障分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(1):40-43.
WU Deguan, PENG Xiang, LI Hongyuan, et al. Analysis of a 500 kV GIL insulator burst fault[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(1):40-43.
- [6] 汪建成, 谢文刚, 宫瑞磊, 等. 550 kV GIL 三支柱绝缘子设计[J]. 高压电器, 2018, 54(5):114-118.
WANG Jiancheng, XIE Wengang, GONG Ruilei, et al. Design of 550 kV GIL three post insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):114-118.
- [7] 李凯, 苗晓军, 徐仲勋, 等. 特高压 GIL 三支柱绝缘子压接工艺研究[J]. 电工技术, 2018(8):136-138.
LI Kai, MIAO Xiaojun, XU Zhongxun, et al. Research on crimping technology of UHV GIL three-pillar insulator[J]. Electric Engineering, 2018(8):136-138.
- [8] 杜伯学, 杜强, 李进, 等. 气体绝缘输电管道用环氧树脂/氮化硼高导热复合材料表面电荷动态特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(8):2646-2653.
DU Boxue, DU Qiang, LI Jin, et al. Surface charge dynamic behaviors of epoxy/bn composite with high thermal conductivity for gas insulated transmission pipeline[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8):2646-2653.
- [9] 赵智大. 高电压技术[M]. 第 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
ZHAO Zhida. High voltage technique[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [10] 吴泽华, 王浩然, 田汇冬, 等. 特高压 GIL 三支柱绝缘子结构参数分析与优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3165-3173.
WU Zehua, WANG Haoran, TIAN Huidong, et al. Structural parameter analysis and optimization of tri-post insulator on UHVAC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3165-3173.
- [11] 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.
- [12] 苑 舜. 营口华能电厂 GIS 盆式绝缘子沿面放电分析[J]. 东北电力技术, 1996(5):36-37.
- YUAN Shun. Analysis of GIS - type insulator surface discharge in Yingkou huaneng power plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 1996(5):36-37.
- [13] 汪 汛, 邱毓昌, 张桥根, 等. 表面电荷积聚对绝缘子沿面闪络影响的研究[J]. 中国电力, 2002, 35(9):52-55.
- WANG Feng, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. Research on the effect of surface charge accumulation on surface flashover of insulators[J]. Electric Power, 2002, 35(9): 52-55.
- [14] 杜乾栋, 吴治诚, 刘浩宇, 等. 气—固绝缘分界面电荷积聚模型及数值计算[J]. 高压电器, 2017, 53(2):14-18.
- DU Qiandong, WU Zhicheng, LIU Haoyu, et al. Modeling and numerical calculation of charge accumulation on gas-solid insulation interface[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 14-18.
- [15] IEC D1.03 工作组. 高压直流气体绝缘系统: 直流和交流系统直流电应力[M]. 南振乐, 李振军, 译. CIGRE: IEC D1.03 工作组, 2019.
- IEC D1.03 Working Group. HVDC gas insulated systems: Direct current electrical stresses in DC and AC systems[R]. NAN Zhenyue, LI Zhenjun, Translation. CIGRE: IEC D1.03 Working Group, 2019.
- [16] 孙继星, 戴 琪, 边 凯, 等. 自由导电微粒受迫运动过程与振动特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22):5224-5232.
- SUN Jixing, DAI Qi, BIAN Kai, et al. Forced movement process and vibration characteristics of free conductive particle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22):5224-5232.
- [17] 李 鹏, 李志兵, 孙 倩, 等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计[J]. 电网技术, 2015, 39(11):3305-3312.
- LI Peng, LI Zhibing, SUN Qian, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3305-3312.
- [18] 刘丽岚, 田汇冬, 吴泽华, 等. 特高压交流 GIL 伸缩节损耗分析及结构改进[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3183-3189.
- LIU Lilan, TIAN Huidong, WU Zehua, et al. Loss analysis and structure improvement of expansion joint for UHV AC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3183-3189.
- [19] 汤亮亮, 刘 刚, 吴 敏, 等. GIL 管廊结构参数对接地系统电气特性参数的影响[J]. 电网技术, <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2410.TM.20181016.0944.003.html>, 2018-10-19.
- TANG Liangliang, LIU Gang, WU Min, et al. The influence of GIL tube structure parameters on electrical characteristics of the grounding system[J]. Power System Technology, <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2410.TM.20181016.0944.003.html>, 2018-10-19.
- [20] 王亚楠, 丁卫东, 苟 杨, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)接地问题探讨[J]. 高压电器, 2016, 52(4):98-102.
- WANG Yanan, DING Weidong, GOU Yang, et al. Discussion of the grounding method of gas insulated transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4):98-102.
- [21] 国家电网公司. 国家电网成功研制世界首台 1 100 千伏刚性气体绝缘输电线路设备[J]. 云南电力技术, 2018(3):28.
- State Grid Corporation of China. State grid successfully developing the world's first 1 100 kV rigid gas-insulated transmission line equipment[J]. Yunnan Electric Power, 2018(3):28.
- [22] 佚名. 南瑞继保中标交流特高压苏通 GIL 综合管廊监控监测系统[J]. 电源世界, 2017(11):15.
- Anonymous. Nanrui jibao wins the bid for AC UHV Sutong GIL integrated pipe corridor monitoring system[J]. The World of Power Supply, 2017(11):15.
- [23] 庞庆平, 郭煜敬, 金光耀. 1 100 kV SF₆ 气体绝缘金属封闭输电线路关键技术[J]. 高压电器, 2017, 53(8):34-37.
- PANG Qingping, GUO Yujing, JIN Guangyao. Key technology of 1 100 kV SF₆ gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8):34-37.
- 黎 斌(1939—), 男, 教授级高级工程师, 从事高压电器研发工作。
- 张 烈(1972—), 男, 教授级高级工程师, 从事金属封闭母线及高压气体绝缘输电线路的产品研制工作。