

特高压 GIL 现场耐压试验技术

赵科¹, 腾云¹, 贾勇勇¹, 陶风波¹, 周志成¹, 邵新苍²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 根据国家电网公司的规划, 1000 kV “淮南—南京—上海”特高压交流输电线路苏通气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)管廊工程将采用 6 km 长, 1100 kV GIL 设备, 文中梳理了特高压 GIL 现场耐压试验的必要性及有效性, 分析了 GIL 常见故障类型, 针对 GIL 设备中常见的自由金属颗粒和尖刺缺陷进行了电场仿真, 并对 GIL 的冲击耐压进行了过电压仿真, 最后对特高压 GIL 的现场耐压试验提出了建议。

关键词: 1100 kV GIL; 现场交流耐压; 现场冲击耐压; 缺陷仿真; 过电压仿真

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)04-0032-04

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)是一种采用 SF₆ 或其他气体绝缘、外壳与导体同轴布置的高电压、大电流、长距离电力传输设备, 具有输电容量大、占地少、布置灵活、可靠性高、维护量小、寿命长、环境影响小的显著优点^[1,2]。GIL 技术的首次应用出现在 1972 年, 美国 CGIT 公司在新泽西州中架设了世界上第一条 GIL 线路。20 世纪 90 年代初期, GIL 设备开始在我国得到应用。南方电网天生桥水电站 500 kV GIL 线路为我国敷设的第一条 GIL 线路, 由 CGIT 公司 1992 年制造, 用于连接变压器和空气套管^[3,4]。

根据国家电网公司的规划, 1000 kV 淮南—南京—上海特高压交流输电线路苏通 GIL 管廊工程将采用 2 回 6 km 长, 1100 kV GIL 设备, 工程建成后将是世界上电压等级最高, 输送距离最长的 GIL 设备。

1 GIL 现场耐压试验的必要性及有效性

根据国际大电网会议(CIGRE)和国家电网公司多年运行经验的统计, 没有进行过现场耐压试验的气体绝缘开关(GIS)/GIL 设备发生事故几率非常高, 经过现场耐压试验的 GIS/GIL 设备发生事故的几率相对较低。究其原因, 主要是 GIL 在工厂完成组装运往安装工地现场过程中, 虽然 GIL 在工厂内组装要求组装车间空气洁净度等级达到 6 级^[5], 但运输中机械振动、撞击等可能导致 GIL 内部紧固件松动或相对位移; 在安装过程中, 联结、密封等工艺处理方面可能存在失误, 导致电极表面刮伤或安装错位引起电极表面缺陷; 空气中悬浮尘埃、导电微粒杂质和毛刺等在安装现场无法彻底清理都会造成 GIL 投运后发生故障。因此为尽早发现缺陷, 及时处理和避免投运后发生事故, GIL 现场安装完成后进行现场耐压是非常必要的。

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-05-28

国家重点基础研究发展计划(973 计划)

基金项目: 2011CB209406

GIL 的现场耐压试验主要包括: 交流耐压、雷电冲击耐压、操作冲击耐压 3 种方式。目前随着检测技术的发展, 超声或超高频局放测量也成为了现场试验的重要手段之一, 一般交流耐压试验后在 1.1 倍的运行电压下进行^[6-11]。根据 CIGRE 33/23.12 工作组的研究, 对现有的现场耐压试验方法及其有效性进行了说明, 如表 1 所示。

表 1 现场试验方法及其有效性

缺陷	高压交流	低压交流加局放	高压交流加局放	雷电冲击	操作冲击
固定在带电部分的尖锐突出物	低效	低效	低效	有效	低效
固定在带电部分的球形突出物	低效	低效	有效	有效	有效
绝缘子上的颗粒	低效	低效	低效	有效	低效
绝缘子上的裂缝	低效	低效	有效	低效	低效
自由颗粒	有效	有效	有效	低效	低效
悬浮部件	低效	有效	有效	低效	低效
遗忘的外来物	有效	低效	有效	有效	低效

2 GIL 现场耐压试验的有效性

GIL 内部发生绝缘故障的原因往往是多方面的, GIL 在制造和组装过程中, 难免会留下一些微小的缺陷。在 GIL 中引起局部放电最常见的缺陷有: 严重装配错误、固定突起、自由金属微粒、导体间电气接触不良、绝缘子内绝缘缺陷及绝缘子与电极接触面缺陷等, 如图 1 所示。根据国网公司的运行经验报告, GIS/GIL 中各种缺陷导致故障的分布情况如图 2 所示。选取 GIL 内部比较容易引入的自由金属微粒和金属尖刺进行仿真计算。

2.1 自由金属微粒

GIL 在安装、运输过程中, 会产生一些自由金属微粒。为研究这些微粒对 GIL 内部电场分布的影响, 采用 550 kV GIL 典型尺寸进行仿真, 设计金属微粒直径为

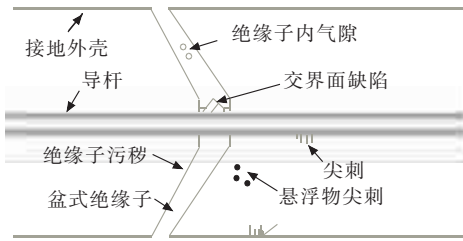


图 1 GIL 中常见的故障类型

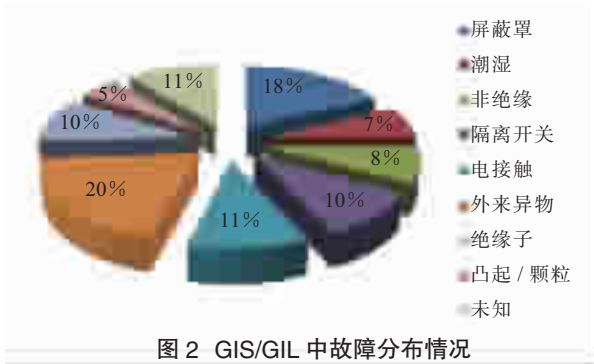


图 2 GIS/GIL 中故障分布情况

5 mm, 分别模拟该自由微粒在靠近外壳、导体和位于中间部位 3 种情况下的电场分布情况, 如图 3 所示。



(a) 微粒靠近外壳



(b) 微粒在中间位置

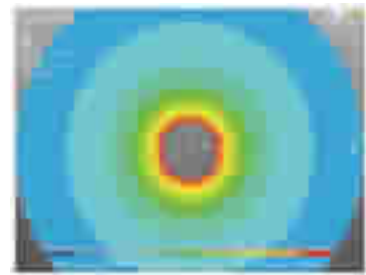


(c) 微粒靠近导体

图 3 GIL 内部自由金属微粒的 3 种情况

选取 SF₆ 气体的相对介电常数为 1.003 1, 采用 ANASYS 进行仿真, 对微粒不进行网格剖分, 将其视

为等电势体。将 73 kV 电压施加在高压导杆表面, 将腔体内表面接地, 微粒靠近外壳的电场分布如图 4 所示。微粒在中间位置的电场分布如图 5 所示。微粒靠近导体的电场分布如图 6 所示。

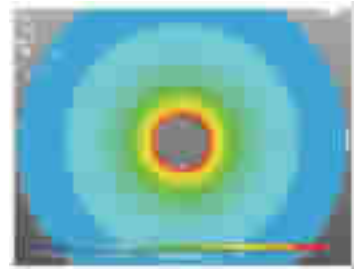


(a) 微粒靠近外壳时的电场整体分布

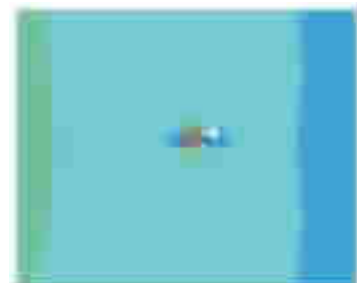


(b) 微粒附近的电场分布

图 4 自由金属微粒靠近外壳的电场分布

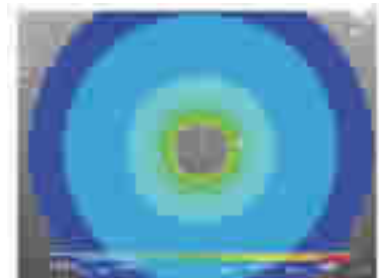


(a) 微粒靠近外壳时的电场整体分布



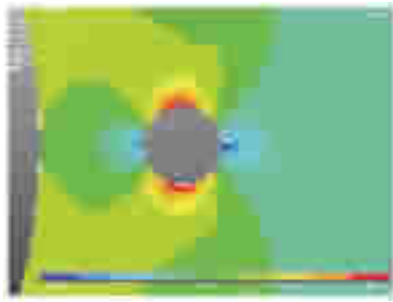
(b) 微粒附近的电场分布

图 5 自由金属微粒在中间位置的电场分布



(a) 微粒靠近外壳时的电场整体分布

由仿真可得, 当自由金属微粒远离外壳时对 GIL 内部电场的畸变效应越大, 尤其是靠近高压导体时, 金



(b) 微粒附近的电场分布

图6 自由金属微粒靠近导体的电场分布

属微粒表面的电场强度最大;自由金属微粒在 GIL 腔体径向方向的电场强度较小,沿 GIL 腔体圆周方向的电场强度较大。

由此可得,当金属微粒未发生跳动时,不会对 GIL 产生较大影响,一旦其发生运动,则会产生剧烈放电。

2.2 导体和筒壁上的金属尖刺

GIL 在安装过程中会产生一些金属尖刺,如在导杆、腔体筒壁上的一些金属毛刺。采用 550 kV GIL 典型尺寸进行仿真,为突出尖刺对 GIL 腔体内电场分布的畸变,设计了 2 种尖刺模型,分别为位于高压导杆上和外壳内表面上的金属尖刺,长为 5 cm、尖端曲率半径为 $80\ \mu\text{m}$ 的金属尖刺,材质为钢,结构如图 7 所示。



(a) 金属尖刺在导体上

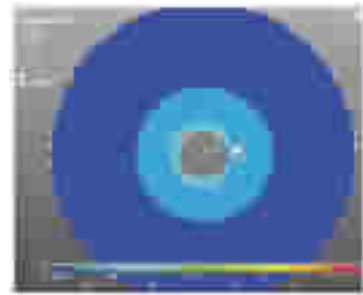


(b) 金属尖刺在外壳上

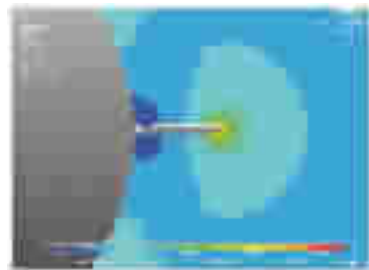
图7 金属尖刺缺陷模型示意图

选取 SF_6 气体的相对介电常数为 1.003 1, 采用 ANSYS 进行仿真,将 73 kV 电压分别施加在高压导杆及其上的金属尖刺表面,分别将腔体内表面及其上的金属尖刺接地,金属尖刺在导体上的场分布如图 8 所示。金属尖刺在外壳上的电场分布如图 9 所示。

由仿真结果图可见,无论尖刺位于高压导体还是筒壁上,针尖部位对电场的畸变最为严重;尖刺底部对

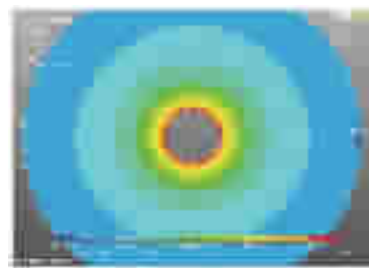


(a) 金属尖刺在导体上的电场整体分布



(b) 金属尖刺附近的电场分布

图8 金属尖刺在导体上的电场分布



(a) 金属尖刺在外壳上的电场整体分布



(b) 金属尖刺附近的电场分布

图9 金属尖刺在外壳上的电场分布

电场强度有所削弱;当尖刺位于高压导体上时,针尖部位的电场值大约是尖刺位于筒壁上时的 3 倍,因此当尖刺位于高压导体上时容易发生击穿。

金属尖刺对 GIL 内部电场的畸变非常稳定,在运行电压下,针尖部位的电场集中,形成稳定的电晕放电。在电晕火花的烧蚀下,尖刺逐渐钝化,电场集中程度降低,从而放电强度变弱,以致电晕放电长期而稳定存在。在过电压的作用下,尖刺放电很可能会导致气体绝缘击穿,造成金属性接地故障。

3 GIL 现场雷电冲击耐压试验的过电压仿真

根据国网公司的规划,苏通特高压 GIL 管廊工程将采用 2 回 6 km 长的 1100 kV GIL 设备。特高压 GIL

现场雷电冲击耐压试验过程中,由于试验电压的上升沿较陡,GIL 设备内部的击穿过电压问题最为显著,下面对特高压 GIL 在现场雷电冲击耐压过程中的击穿过电压进行仿真。

在建立仿真模型时,拟选定施加电压波形为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 标准雷电波,波形无过冲,幅值为 1920 kV ;击穿时刻选定为最高峰值处,即电压 1920 kV 时发生击穿。仿真时,波头电阻固定选为 150Ω ,母线电容量 45.6 pF/m ,套管电容量 411 pF/只 ,盆式绝缘子忽略不计。仿真模型如图 10 所示。

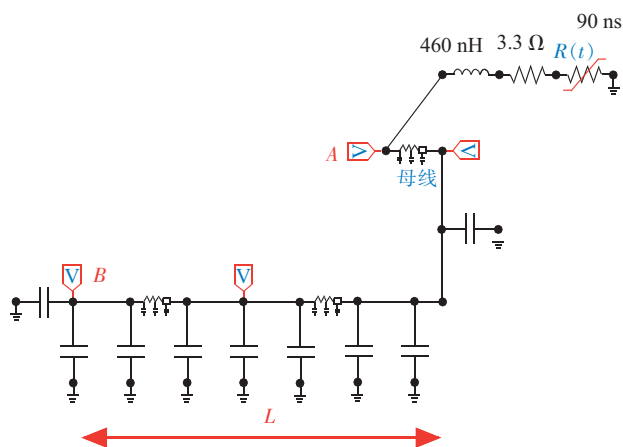


图 10 特高压 GIL 现场冲击耐压中的击穿过电压仿真模型

A 点为 GIL 套管根部,通过套管施加 $1.2/50 \mu\text{s}$ 标准雷电波,幅值为 1920 kV ;B 点为 GIL 设备尾部,设置测点测量过电压水平;考虑到冲击耐压设备的带负载能力,仅仿真 GIL 长度在 95 m 及以内的情况。

特高压 GIL 在雷电冲击电压下,由于 GIL 设备结构的特殊性,过电压幅值较高。在不同的 GIL 长度(L)情况下,最大过电压幅值如表 2 所示。最大过电压倍数如表 3 所示。

表 2 不同 GIL 长度下的过电压幅值

L/m	最大过电压幅值	
	正 /MV	负 /MV
60	2.45	-2.65
70	2.83	-2.73
95	2.58	-2.43

表 3 不同 GIL 长度下的过电压倍数

L/m	最大过电压倍数	
	正(倍数)	负(倍数)
60	1.28	1.39
70	1.47	1.42
95	1.37	1.29

在 GIL 长度分别为 60 m 、 70 m 和 95 m 时,正负 2 种雷电冲击电压下,最大过电压均超过 2400 kV ,超过 GIL 设备的出厂冲击电压值。

4 特高压 GIL 现场耐压试验建议

根据 CIGRE 建议、国家电网公司多年运行经验及上文的仿真结果表明,特高压 GIL 现场开展耐压试验非常有必要,而且建议现场开展交流耐压试验。在现场开展交流耐压试验前,应用绝缘电阻测量仪施加 5000 V 电压测量主回路绝缘电阻。

为保证耐压试验的检验效果,建议分别在 $U_m \sqrt{3}$ 和 $1.2U_m \sqrt{3}$ 电压下进行 10 min 和 20 min 的老练试验,即升高电压值至 $U_m \sqrt{3}$ (635 kV),保持 10 min ;继续升至 $1.2U_m \sqrt{3}$ (762 kV),保持 20 min ;然后升至 $U_m \sqrt{3}$ (1100 kV) (耐受电压值),保持 1 min ;然后降压至 $1.2U_m \sqrt{3}$ (762 kV),保持 30 min 后,进行超声或超高频局部放电检测;最后将电压降至 0 kV 。

5 结束语

(1) 根据 CIGRE 建议和国家电网公司多年运行经验的统计,特高压 GIL 设备现场推荐进行交流耐压试验。

(2) 特高压 GIL 设备现场耐压试验对于 GIL 中引起局部放电最常见的缺陷,如自由金属微粒、尖刺等,具有显著的检测效果。

(3) 对于 GIL 中的自由金属微粒,当金属微粒未发生跳动时,不会对 GIL 产生较大的影响,一旦其发生运动,则会产生剧烈的放电;对于 GIL 中的尖刺缺陷,无论尖刺位于高压导体还是外壳上,针尖部位对电场的畸变最为严重,尖刺底部对电场强度有所削弱。

(4) 特高压 GIL 设备现场交流耐压试验建议按照 $0 \text{ kV} \rightarrow 635 \text{ kV}$ (10 min) $\rightarrow 762 \text{ kV}$ (20 min) $\rightarrow 1100 \text{ kV}$ (1 min) $\rightarrow 762 \text{ kV}$ (保持 30 min 后)测局放 $\rightarrow 0 \text{ kV}$ 的程序施加电压。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2014:331-332.
- [2] 侍海军,王光前,张少炎. GIS 现场绝缘试验技术[J]. 高压电器,2005,41(1):55-58.
- [3] 高凯,李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力,2007,40(1):84-88.
- [4] 阮全荣,施围,桑志强. 750 kV GIL 在拉西瓦水电站应用需考虑的问题[J]. 高压电器,2003,39(4):66-69.
- [5] GB 50073—2001 洁净厂房设计规范[S].
- [6] 周云锋,张子阳,杨景刚,等. 基于超声波法的 GIS 盆式绝缘子内部气隙放电特性研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):3-8.
- [7] 杨景刚,贾勇勇,赵科,等. GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):10-14.

参考文献:

- [1] 黄映. 基于改进混合差分进化算法的输电网规划研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4): 36-43.
- [2] 闫安心, 裴昌盛, 查申森, 等. 江苏配电自动化规划分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(3): 1-4.
- [3] 姬源, 黄育松. 智能电网综合评价模型与方法综述[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(3): 81-84.
- [4] 周建华, 孙蓉, 陈久林, 等. 基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划研究[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 28-31.
- [5] 季晓明, 成乐祥. 基于突变理论的配电网规划方案综合评估[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 51-54.
- [6] 于金镒, 刘健, 徐立, 等. 大型城市核心区配电网高可靠性接线模式及故障处理策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 74-80.
- [7] 黄伟军, 钱远驰, 吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 123-127.
- [8] 葛少云, 郭寅昌, 刘洪, 等. 基于供电能力计算的高压配电网接线模式分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 405-411.
- [9] 谢晓文, 刘洪. 中压配电网接线模式综合比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 94-99.
- [10] 戴仲覆, 高强, 谢敏, 等. 城市中压配电网典型接线模式的综合评估[J]. 南方电网技术, 2011, 05(1): 57-60.
- [11] 范宏, 丁会凯, 周利俊, 等. 城市电网中 110 kV 电网接线模式的经济性比较[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 689-693.

作者简介:

陈恩泽(1986), 男, 江苏淮安人, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制、配电网规划;
 黄建波(1969), 男, 江苏淮安人, 工程师, 研究方向为配电网规划;
 叶雪峰(1977), 男, 江苏淮安人, 工程师, 研究方向为配电网规划;
 刘刚(1981), 男, 江苏淮安人, 工程师, 研究方向为配电网规划。

Research on Huaian high voltage distribution network planning

CHEN Enze, HUANG Jianbo, YE Xuefeng, LIU Gang

(State Grid Huaian Power Supply Company, Huaian 223001, China)

Abstract: Reasonable network planning is important to urban distribution network construction. Existing connection modes are compared in terms of reliability, adaptability and economy. Reliability includes power supply, line failure and operational flexibility. Economy includes construction economy, operating economy and annual cost per unit. Adaptability includes network flexibility and resource consumption. The merits and scope of various connection modes are obtained through analyzing and comparing. The Huaian high voltage distribution network is analyzed, and then the problems existed in the network are pointed out. According to the results, the Huaian high voltage distribution network planning scheme is proposed.

Key words: high voltage distribution network; network planning; connection mode

(上接第 35 页)

- [8] 徐敏骅, 吴晓春, 陆振华. GIS 局部放电检测与定位技术的现场应用[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1086-1089.
- [9] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 40-43.
- [10] 刘君华, 王江, 钱勇, 等. GIS 中电磁波传播特性的仿真研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 139-142.
- [11] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 开关设备中 SF₆ 产物检测的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 160-165.

作者简介:

赵科(1985), 男, 江苏江阴人, 工程师, 从事高压电器设备现场

试验工作;

腾云(1987), 男, 辽宁抚顺人, 工程师, 从事高压电器设备现场试验工作;
 贾勇勇(1986), 男, 江西九江人, 工程师, 从事高压电器设备现场试验工作;
 陶风波(1982), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事高压电器设备现场试验工作;
 周志成(1977), 男, 湖南株洲人, 高级工程师, 从事高压电器设备现场试验工作;
 邵新苍(1989), 男, 江苏宜兴人, 工程师, 从事高压电器设备现场试验工作。

Over-voltage Withstand Testing Technology of HUV GIL

ZHAO Ke¹, TENG Yun¹, JIA Yongyong¹, TAO Fengbo¹, ZHOU Zhicheng¹, SHAO Xincang²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China)

Abstract: According to the State Grid's plan, a 6 km long 1100 kV GIL equipment will be adopted in Sutong GIL utility tunnel in 1000 kV "Huainan-Nanjing-Shanghai" UHV AC transmission lines project. This paper gives a detailed introduction to the necessity and effectiveness of UHV GIL over-voltage withstand testing and analyzes some common fault types. The electric field of free metal particles, the spikes in GIL equipment and the GIL over-voltage withstand testing are implemented. Finally, the suggestions to UHV GIL over-voltage withstand testing are proposed.

Key words: 1100 kV GIL; field AC over-voltage withstand testing; defect simulation; over-voltage simulation