

基于有限元的 35 kV 气体绝缘母线放电机理及改进方案研究

耿超 徐楠 李宁

(国网上海电力公司检修公司, 上海 200122)

摘要: 随着城市供电集约化的不断推进, 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)在城市变电站中的应用愈加广泛。而在特大型城市上海, 有着大容量、集成化以及环境友好性等特点的 GIL 已经逐渐替代了敞开型母线, 被大规模地应用于城区变电站中。但在运行过程中发生过多起 GIL 内支撑绝缘子局部放电故障。结合 35 kV 气体绝缘母线的专项技术改进工作, 建立有限元模型对 GIL 支撑绝缘子局部放电产生机理进行仿真计算, 提出一种改进技术方案并进行理论验证。仿真及实际运行结果显示, 改进方案能够较好地解决支撑绝缘子放电故障, 提高了运行的可靠性。

关键词: GIL; 支撑绝缘子; 局部放电; 有限元

中图分类号: TM726.2 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0049-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.011

Research on the Mechanism of Partial Discharge in 35 kV GIL and Improvement Scheme Based on Finite Element Modeling

Geng Chao, Xu Nan, Li Ning

(State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: As the power supply intensity keeps growing in large cities, the gas-insulated metal-enclosed transmission line (GIL) has been widely used in urban substations. Especially in the ultra-large cities such as Shanghai, GIL has gradually substituted the traditional open-type bus benefited from its large capacity and smaller space demand. However, several partial discharge faults have occurred on the support insulator during the operation. A finite element model is established and the mechanism of partial discharge is simulated. With the calculation result, an effective improvement scheme is proposed. The model simulation and practical implementation show that the improvement scheme can eliminate the partial discharge on support insulator, which can greatly improve the operation reliability of GIL.

Key words: gas-insulated metal-enclosed transmission line (GIL); support insulator; partial discharge; finite element

0 引言

随着中国城市化进程的发展, 中东部大型城市的人口密度持续增长, 导致城市中心区域的耗电量逐年攀升。这使得在特大型城市城区建设高电压、大容量变电站成为城市发展的重要一步。然而, 建设在人口密集的市中心变电站对占地面积、噪声控制、电磁环境控制等有着更加苛刻的要求。传统的敞开式设备所带来的占地面积大、电磁环境复杂等问题已经使其无法满足城市变电站的需要。

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated

metal-enclosed transmission line, GIL) 诞生于上世纪 70 年代^[1-2], 其采用 SF₆ 气体作为绝缘介质, 金属筒体作为外壳, 具有绝缘性能好、占地面积小、噪声小、载流量大、易于维护等特点。近年来被广泛应用于城市变电站, 特别是在地下变电站中, 用于电力变压器与开关的连接、气体绝缘电器的母线、高压穿墙套管等领域^[3-4]。

然而, GIL 作为一种全封闭电器, 导体与外壳同轴布置, 壳体与带电导体间布置有多个支撑绝缘子, 用以固定导体的相对位置, 因此要求支撑绝缘子应同时具备良好的机械强度与电气绝缘性能。但长期的 GIL 运行经验表明, 支撑绝缘子或绝缘盆的局部

放电现象是 GIL 故障的主要原因之一^[5-6]。

国内外众多学者对直流或交流 GIL 绝缘子的放电故障进行了深入研究。其中,文献[7]就直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚对闪络特性的影响进行了研究,结果表明 GIL 绝缘子在直流电压下聚集的电荷使其闪络电压明显降低。文献[8]使用超声波法对 GIL 绝缘子局放原因进行诊断,并使用 X 射线法进行验证,准确查找到支柱绝缘子的本体缺陷。文献[9]基于有限元法建立了绝缘子准静态非线性模型,对绝缘子外形进行优化设计,比较研究了优化后对绝缘子表面电场聚集的抑制和改善。日本关西电力公司、四国电力公司等研究人员合作研究了 500 kV 直流 GIS 中绝缘结构的设计和优化问题,提出使用非线性直流场分析法来优化绝缘子设计,以提高其绝缘强度^[10]。

由上可见,目前针对 GIL 绝缘子放电的研究大多集中于以下两个方面:一是对直流 GIL 绝缘子表面电荷积累效应的研究;二是高电压等级 GIL 局放的检测技术研究。但针对中低电压等级交流 GIL 绝缘子放电现象的研究及抑制措施则少有文献涉及。而目前在上海众多市区变电站中,35 kV GIL 通管被广泛用作 GIS 电器的母线,运行过程中出现过多起支撑绝缘子放电故障。35 kV GIL 内支撑绝缘子结构与高电压等级 GIL 有显著区别。

下面以 35 kV GIL 通管支撑绝缘子为研究对象,结合现场解体检修实践,建立了 GIL 支撑绝缘子有限元模型,对绝缘子放电机理进行仿真计算,以探究 35 kV GIL 绝缘子端部放电的理论机理。同时提出一种简洁有效的改进方案,并成功地应用于实际检修工作中。理论模型验证及实际运行结果表明,所提出的改进方案能够较好地解决绝缘子端部放电故障。

1 理论基础

1.1 静电场的有限元分析法

为讨论 35 kV GIL 支撑绝缘子的放电现象,可以建立二维静电场分析模型。二维静电场问题满足拉普拉斯方程及如下边界条件:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \in \Omega \\ \varphi|_{S_1} = \varphi_0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{S_2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 为计算场域; φ 为电位; ρ 为体电荷密度; φ_0 为第 1 类边界条件给定电位; S_1 、 S_2 分别为第 1 和第 2 类边界。

使用伽辽金余量法求解,取 φ 的近似解 $\tilde{\varphi}$, 则有 余量方程为

$$R(\tilde{\varphi}) = A\tilde{\varphi} - \rho \quad (2)$$

式中 $A = -\varepsilon \nabla^2$ 。

将场域 Ω 剖分为 z_0 个单元、 N_0 个节点, 区权函数为 W_p , 则有加权有限元余量函数为

$$\begin{aligned} \langle W_p, R(\tilde{\varphi}) \rangle &= \int_{\Omega} W_p R(\tilde{\varphi}) d\Omega \\ &= \sum_{e=1}^{z_0} \int_{\Omega_e} W_p R(\tilde{\varphi}) d\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

求解式(3) 加权余量函数即可求得有限元模型各个单元处的电位。

1.2 有限元实体建模

针对广泛使用的 MGC 型 35 kV GIL 通管内支撑绝缘子的实际尺寸,建立二维有限元模型。绝缘子实体与有限元模型见图 1、图 2。



图 1 MGC 型 35 kV GIL 通管绝缘子装配图

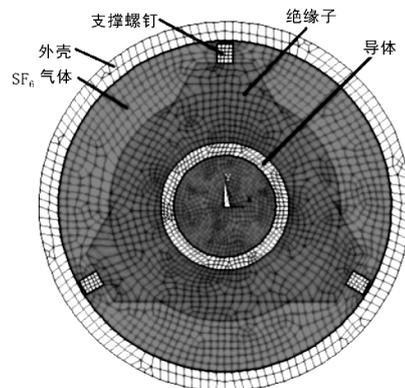


图 2 二维有限元模型

模型采用静电场分析,边界条件为中间导体施加额定工作电压,筒体为零电位。

2 绝缘子局部放电理论仿真

由绝缘子实际结构及有限元模型可见,铜制导体穿过绝缘子中心,绝缘子对铜导体起支撑作用。绝缘子3个支撑点通过金属支撑螺钉与GIL外壳接触。正常情况下3个金属螺钉均应当与外壳接触,电位为0。正常工况下,GIL内部电场分布如图3所示。同时,GIL内部电压分布见图4。

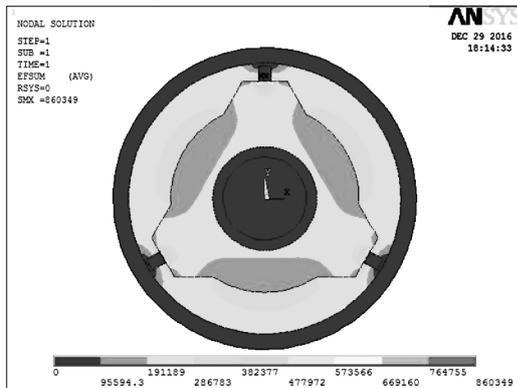


图3 正常工况下GIL内部电场分布

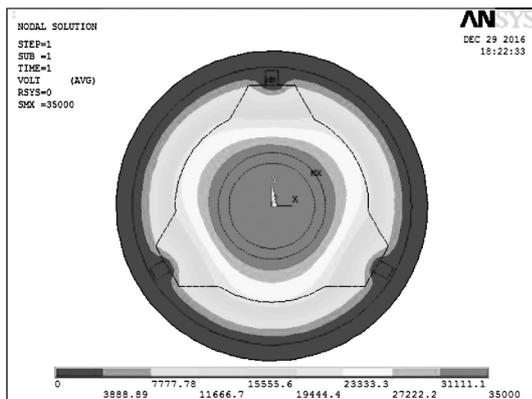


图4 正常工况下GIL内部电压分布

由图3、图4可见,正常工况下,GIL内部电场分布均匀,没有出现明显的电场畸变。而内部电压由中心导体35 kV到外壳零电位均匀递减。绝缘子本体由高性能环氧材料组成,承担了大部分的电压降,具有良好的介电特性,剩余电压降也在周围SF₆气体中逐渐降低至零电位。因此正常情况下,绝缘子表面不易发生局部放电现象。

GIL正常工作时,由于中心导体自重的原因,绝缘子的三颗支撑螺钉中,底部的两颗螺钉一般能够与筒体紧密接触,但顶部的一颗螺钉往往与外壳筒体会产生一定的微小缝隙。

在实际检修工作中,发生了多起因绝缘子支撑螺

钉与外壳筒体间没有良好接触导致的局部放电现象。现场中发现的绝缘子局部放电痕迹如图5所示。



图5 现场绝缘子局部放电痕迹

由图5可见,外壳上端部出现了明显黑色烧蚀痕迹(为方便观察,现场将绝缘子翻转了一定角度,黑色部分原为绝缘子支撑螺丝位置),可以确定支撑绝缘子的上端支撑螺丝与筒体之间发生了局部放电。

利用有限元模型对该种工况进行理论仿真,得到支撑螺钉接触不良情况下,GIL内部电场分布如图6所示,内部电压分布如图7所示。

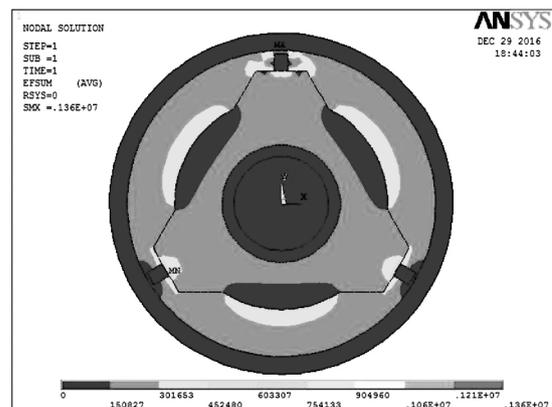


图6 螺钉接触不良时GIL内部电场分布

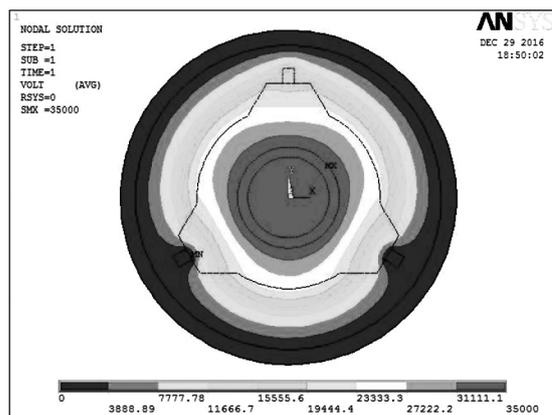


图7 螺钉接触不良时GIL内部电压分布

由图6、图7可见,当螺钉与外壳筒壁接触不良时,两者缝隙间将产生明显电场畸变。缝隙中的电场强度最高达 1×10^6 V/m。而螺钉与外壳间的电压差达到15 kV左右。因此在缝隙中极易发生放电现象。仿真结果与现场放电现象吻合性良好,验证了所建立的有限元模型的有效性。同时,仿真结果为绝缘子放电现象的产生机理提供了有力的理论支撑。

3 绝缘子支撑的改进方案

为了解决绝缘子支撑螺钉与筒体外壳接触不良的缺陷,提出了一种易于施工的改进措施。即在绝缘子支撑螺钉末端钻孔,放入一只金属弹簧。金属弹簧位于螺钉与筒壁之间呈受压状态。若支撑螺钉与筒壁出现缝隙时,螺钉通过金属弹簧依然保持与筒壁的金属连接,保证了电压和电场的分布均匀。现场安装金属小弹簧如图8所示。



图8 绝缘子支撑螺钉末端金属弹簧安装图

带有弹簧的支撑螺钉安装完成后的现场图见图9。由图可见,由于重力作用,最上端螺钉与筒壁出现了明显间隙。图中圆圈中的金属弹簧张开,保证了螺钉与外壳的金属连接。

为验证安装弹簧后GIL内电场和电压的分布情况,将弹簧加入所建立的有限元模型,对支撑螺钉与外壳存在缝隙的工况进行仿真,结果如图10、图11。

由图10、图11可见,模型中以圆圈中的细小矩形单元作为支撑螺钉末端的弹簧,弹簧为螺钉与外壳之间建立了电气连接。对比图6与图7可见,加入弹簧后,GIL通管内的电场分布及电压分布重新恢复了均匀。缝隙间的畸变电场消失,螺钉电位变为零电位,同时螺钉与绝缘子交接部分的电压也随之下降。



图9 支撑螺钉末端弹簧位置图

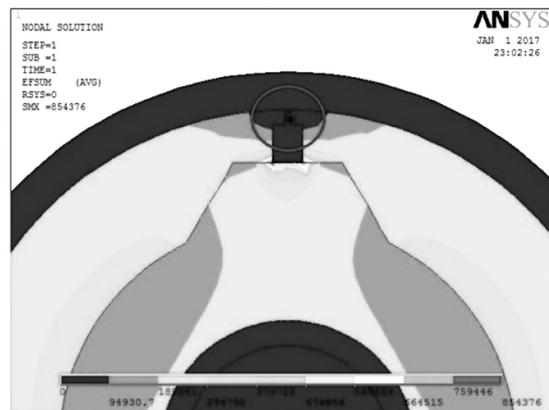


图10 安装弹簧后缝隙处电场分布

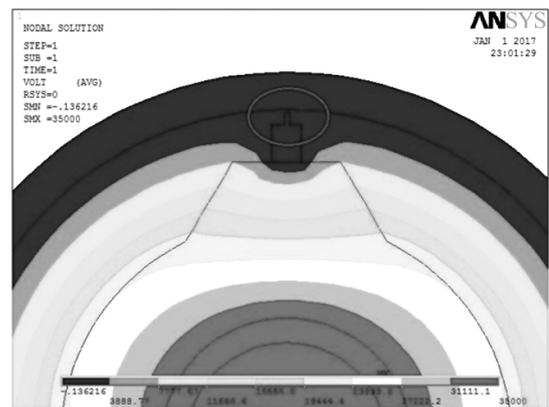


图11 安装弹簧后缝隙处电压分布

理论仿真结果表明,所提出的支撑螺钉末端加装弹簧的改进方法能够使通管内电场分布更加均匀,有效解决绝缘子端部局部放电问题。同时,所提方法仅需在原有绝缘子支撑螺钉的末端钻一个小孔用以安放弹簧,并不需要换装新的绝缘子。而弹簧本身只需采用普通不锈钢材质,并无特殊要求。因此所提的改进方法具有明显的施工简便、成本低的优点。

(下转第73页)

表 6 改造前后效果对比

	改造前	改造后
电磁噪声	人耳可听到“嗡嗡”的电磁噪声	人耳已感觉不到
流道盖板	有强烈麻脚感	麻脚感消失
噪声	满负荷工况下灯泡头入口处上方 1 m 在改造前测得混频噪声为 102.4 dB	满负荷工况下灯泡头入口处上方 1 米在改造前测得混频噪声为 92.2 dB

6 结 语

振动和噪声是衡量发电机运行性能的重要指标。对于电磁振动,一般只能通过改定子绕组接线,减少绕组系数来减少谐波幅值,但是绕组端部引线结构复杂;或者重新选择槽数,减少分数次谐波的次数。针

上海市电力公司对辖区内所有 MGC 型 35 kV 通管均采用该方法进行消缺作业。经过改进的通管均安全正常运行至今,未再发生过一例局部放电事故。进而也验证了所建立的 GIL 通管绝缘子有限元模型能够准确反映通管内实际电场情况,模拟出了绝缘子局部放电的理论本质,对验证改进方案的有效性有着重要意义。

4 结 语

针对 MGC 型 35 kV 通管内绝缘子放电缺陷,建立了绝缘子及通管有限元模型,对正常及支撑螺钉与筒体接触不良工况下通管内的电场及电压分布进行了仿真计算。结果表明,螺钉与筒体间存在缝隙时,电场将在缝隙处产生严重畸变,导致螺钉与筒体间产生十几千伏的电位差。电位差导致螺钉与筒体之间产生间歇性放电,严重影响通管的安全运行。

同时提出了一种缺陷改进方案,即在支撑螺钉末端安装弹簧,恢复螺钉与筒体的电气连接。并对改进方案进行了有限元仿真验证,结果表明改进后通管内电场分布恢复均匀状态,螺钉与筒体间电位差消失,电压由中央导体到筒体均匀下降,消除了局部放电的产生源头。所提改进方案具有施工简便、成本较低的优点。

参考文献

[1] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线

对 G 电站定子引线端空间小,且原设计铁心轭部偏小的特点,确定了重新选择槽数的改造方案。另外还采用了增加铁心压紧、减少线圈、铁心的多项改造措施。由于改造方案采用的措施得当,改造后机组的振动噪声大幅度减少,取得了令人满意的效果。

参考文献

[1] 白延年. 水轮发电机设计与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
 [2] 许实章. 交流电机的绕组理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
 [3] GB/T 2423.10-2008 电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 [S].

作者简介:

梁宇强(1983),工学硕士、工程师,从事水轮发电机设计开发工作。
(收稿日期:2017-09-15)

路的研究现状及应用前景 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
 [2] 王亚楠,丁卫东,苟杨,等. 气体绝缘封闭输电线路接地问题探讨 [J]. 高压电器, 2016, 52(4): 98-102.
 [3] 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.
 [4] 杨琪. GIL 与 GIS 母线的结构特点与应用 [J]. 高压电器, 2011, 47(8): 72-74.
 [5] 王邸博,唐炬,刘凯. 直流高压下 GIS 支柱绝缘子表面电荷积聚特性 [J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3073-3081.
 [6] 吴超. 直流 GIL 中气体间隙和绝缘子绝缘特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
 [7] 张博雅,王强,张贵新,等. SF₆ 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1481-1487.
 [8] 李红元,陈禾,吴德贵,等. 用超声波检测法对 GIL 设备两次局放的诊断与分析 [J]. 高压电器, 2016, 52(2): 68-73.
 [9] A. De Lorenzi, L. Grando, A. Pesce, et al. Modeling of Epoxy Resin Spacers for the 1MV DC Gas Insulated Line of ITER Neutral Beam Injector System [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77-87.
 [10] K. Watanabe, M. Yoshida, H. Kon, et al. Flash-over Mechanism of SF₆ Gas Type Termination for DC Power Cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 849-856.

作者简介:

耿超(1987),博士,从事电力设备状态检测的研究工作。
(收稿日期:2017-09-02)