

±500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路绝缘尺寸设计

贾志杰, 甘德刚, 李晶

(四川电力科学研究所, 四川省 成都市 610072)

Design of Insulation Dimension for ±500 kV DC Gas Insulated Transmission Line

JIA Zhijie, GAN Degang, LI Jing

(Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Along with large-scale application of high-voltage power transmission and transformation equipment such as gas insulated transmission line (GIL), the dielectric strength of inner supporting insulators becomes important factor influencing secure and stable operation of the equipment. Two key influencing factors restricting the application of GIL in HVDC power transmission are charge accumulation along insulator surface and free conductive particles. Considering the two factors and by use of finite element analysis software, the insulation dimensions for ±500 kV DC GIL, including insulation dimensions of inner and outer diameters of GIL, inner and outer shielding electrodes and shield pits as well as the structural design of alumina-filled epoxy resin disc-type insulator, are designed. Besides, three principles for the structural design of outer form of disc-type insulator for DC GIL are proposed and in the design the influences of surface charge accumulation and metal particles on insulation level of GIL are considered. Designed results achieve anticipated targets; the distribution of equipotential lines is uniform, however, the insulation performance of designed results is to be further verified by experiments.

KEY WORDS: lightning impulse withstand voltage; inner shield electrode; outer shield electrode; free conductive particle; surface charge accumulation; gas insulated transmission line (GIL)

摘要: 随着高压输变电设备如气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)的大规模应用, 内部支撑绝缘子的介电强度成为设备安全稳定运行的重要因素。限制 GIL 在直流输电中应用的 2 个重要因素分别是绝缘子表面电荷积聚和自由导电微粒的影响。在考虑这 2 种影响因素的情况下, 借助有限元分析软件, 设计 ±500 kV 直流 GIL 的绝缘尺寸, 包括 GIL 的内外径, 内、外屏蔽电极和屏蔽坑, 含氧化铝的环氧树脂盆式绝缘子的结构设计。此外, 还提出直流 GIL 盆式绝缘子外形结构设计的 3 项原则, 设计中考虑了表面电荷积聚和金属微粒对 GIL 绝缘水平的影响因素。设计结果达到预期目标, 绝缘子和电极系统的等位线

分布比较均匀, 但是其耐电性能还有待实验的进一步检验。

关键词: 雷电冲击耐受电压; 内屏蔽电极; 外屏蔽电极; 自由导电微粒; 表面电荷积聚; 气体绝缘金属封闭输电线路

0 引言

由于气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)具有传输容量大、可靠性高、电能损耗小和后期维护成本小等特点, 在特殊环境下被广泛应用于交流输电中, 成为替代架空输电线路的首选方案, 如用于向用电密度高但征地困难的城市负荷中心送电、两段架空线交叉、高落差地区和高压长距离大容量输电中。然而, GIL 在直流输电中的应用却受到了极大的限制, 主要是因为绝缘子表面电荷积聚和自由导电微粒给直流 GIL 带来了不利影响^[1-9]。

长期以来, 国内外对高压直流下 SF₆ 气体绝缘装置的电场控制和绝缘设计进行了大量研究^[10-19]。文献[18]研究显示: 为减小直流全封闭式组合电器(gas insulated switchgear, GIS)的电荷积聚, 需要显著增大调整系数 η 。 η 称为安全因子, 它与整个过渡过程中绝缘子表面绝缘强度的减少量有关, 并满足不等式 $E_{smax} \leq \lambda \eta E_{gmax}$ (E_{smax} 为固体介质表面最大场强; E_{gmax} 为 SF₆ 气体中的最大场强; λ 为小于 1 的数, 它是对绝缘子沿面放电电压统计值进行修正的差数)。文献[19]作者研究了直流下 SF₆ 中金属导电微粒对绝缘子的影响, 结果显示: 绝缘子侧壁与接地电极的夹角为钝角时, 可减小微粒受到的向上静电力和微粒受到的指向绝缘子方向的水平静电力, 从而可增大微粒浮起和附着于绝缘子表面的难度, 提高装置绝缘的可靠性。

本文借鉴直流 GIS 绝缘尺寸设计的相关研究成果, 进行了 ±500 kV 直流 GIL 的绝缘尺寸设计, 并

提出了直流 GIL 盆式绝缘子外形结构设计的原则。

1 GIL 内外径的设计

确定 GIL 的内外径主要是确定 GIL 的内导体内、外径和外壳内径。内导体的设计依据主要有 2 条：1) 按额定电流大小及允许电流密度选择导体截面；2) 按导体表面允许的雷电冲击场强 E_1 确定内导体外径 r_1 的范围。

同轴圆柱形电场中的内导体表面场强为

$$E = U / [r_1 \ln(r_2 / r_1)] \quad (1)$$

式中： U 为雷电冲击耐受电压，kV； r_1 为内导体外径，mm； r_2 为外壳内径，mm。

根据文献[20]可知，当 $r_2 / r_1 = e$ 时，式(1)中分母最大， E 为最小值 E_{\min} ，耐受电压能力最高。图 1 描述了在 U 和 r_2 为常数的条件下同轴圆柱结构中 E / E_{\min} 与 r_1 / r_2 之间的关系。可以看出，当 r_1 / r_2 在 0.222~0.535 范围内变化时，导体表面场强只变化 10%，这给设计者带来了选择中心导体的灵活性。

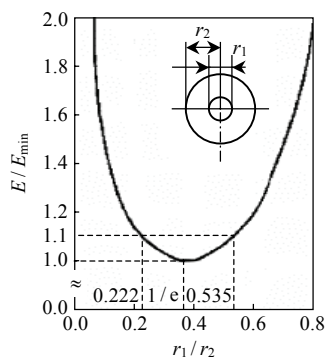


图 1 内导体表面场强 E / E_{\min} 与 r_1 / r_2 之间的关系

Fig. 1 Relationship between E / E_{\min} and r_1 / r_2

当 $\ln(r_2 / r_1) = 1$ 时，有：

$$r_1 = U / E_1 \quad (2)$$

式中 E_1 为对应某种 SF_6 气压时导体表面允许的雷电冲击场强，kV/mm。由式(2)并综合考虑导体的电流密度、外壳半径以及导体材料的供应等多种因素来选择中心导体直径。

根据经验可得到表 1，表中描述了在不同的 SF_6

表 1 不同 SF_6 气压下同轴圆柱电极的 $E_{50\%}$ 、 E_B 和 E_1 的值
Tab. 1 Values of $E_{50\%}$, E_B and E_1 of coaxial cylindrical electrodes under different SF_6 pressures

SF_6 气压/MPa	$E_{50\%}$ /(kV/mm)	E_B /(kV/mm)	E_1 /(kV/mm)
0.0	8.7	7.4	6
0.1	15.0	12.8	11
0.2	21.3	18.1	16
0.3	27.6	23.6	20
0.4	33.9	28.8	24
0.5	40.2	34.2	29
0.6	46.5	41.2	35

气压下，同轴圆柱电极在雷电冲击电压下的 50% 闪络场强 $E_{50\%}$ ，闪络概率为 0.16% 的耐受场强 E_B 和允许场强 E_1 的值。

根据文献[21]知 ± 500 kV 电压等级 GIS/GIL 绝缘子的雷电冲击耐受电压为 1 550 kV，按照 GIS/GIL 中通常采用的 SF_6 气压为 0.4 MPa 来估计，计算得到的 r_1 为 64 mm。在考虑绝缘子的热特性和机械特性后，根据制造企业的参考意见取 r_1 为 65 mm，可知 r_1 的决定因素也与载流量有关。通过前述讨论可知，当 r_1 / r_2 在 0.222~0.535 范围内变化时，内导体表面的最大场强变化不大，通过与相关技术人员讨论，最终取 $r_2 = 265$ mm，即 $r_1 / r_2 = 0.245$ 。将 r_2 尽量增大的目的主要是延长盆式绝缘子的爬电距离，降低其沿面切向场强的平均值。

2 内外屏蔽电极和屏蔽坑的设计

在导体(或地电位法兰)与盆式绝缘子的接触处如留有气隙，发现在未达到应该耐受的电压时，盆式绝缘子高电位及低电位两端都发生了局部放电的树枝状电弧痕迹，使闪络电压降得较低。气隙的存在使盆式绝缘子两端正好与导体、法兰上的最高场强点接触，使盆式绝缘子的两端表面承受较高的场强，以至外施电压不太高时即超过允许值，从而发生放电现象。即使在三结合点(即 SF_6 气体、金属电极、环氧树脂绝缘子三者相交的区域)处没有气隙出现，由于此处场强集中，容易产生高场强局放点，也会降低绝缘子闪络电压。

盆式绝缘子结构设计中的十分重要的一点是采用适当的 δ 间隙结构($\delta = 3 \sim 4$ mm)来消除其两端气隙，即在盆式绝缘子与高压电极接触处的两侧加外屏蔽电极，将绝缘子与外壳接触处设计成屏蔽坑结构。这种设计能使绝缘子两端不与导体、法兰上的最高场强点接触，使三结合点处于外屏蔽电极或者屏蔽坑内。由于外屏蔽电极和屏蔽坑内电位较低，降低了三结合点处的场强，改善了绝缘子两端的表面电场强度分布，从而使整个盆式绝缘子的耐受电压明显提高。此外，外屏蔽电极的加入使绝缘子沿面场强与平均场强的比值变化得比较均匀。高压电极圆弧部分的半径取得大一些，并经有限元软件电场计算，优选出最合理(场强最低)的曲线形状。 δ 间隙金属导体侧的深度由圆弧倒角的半径 r 和与导体轴向垂直的坑深 h 构成，一般而言二者满足以下关系： $h / r = 0.5 \sim 0.8$ [22]。

当电压等级较高时,在绝缘子与高压导体相接处只采用外屏蔽电极并不能完全解决绝缘子高压侧沿面场强过高的问题,需要加入内屏蔽电极,即金属插入件。内屏蔽电极为支撑绝缘子和金属电极间提供了一个较好的连接,并且能调节临界区域内的电场强度,从而提高闪络电压。此外,根据相关文献可知一定尺寸、形状的内屏蔽电极可以被用来进行绝缘子附近自由导电微粒的无害化,内屏蔽电极能够降低绝缘子附近的电场强度,降低微粒受到的向上的静电力,使微粒受到的水平方向的静电力指向背离绝缘子的方向,从而使绝缘子对其附近的微粒具有排斥效果,并增加了其浮起的难度^[23]。仿真计算时应遵循以下原则:外屏蔽电极与绝缘子凹面应保持较大距离,与绝缘子凸面相邻的外屏蔽电极高度和曲率半径都应尽量大,内屏蔽电极高度和宽度应在不影响绝缘子机械性能的前提下尽量扩大。计算结果显示,设绝缘子凹、凸面侧对应的外屏蔽电极高度分别为 h_1 和 h_3 ,内屏蔽电极高度为 h_2 ,则有 $h_1 < h_2 < h_3$ 。在电场优化时设置的外壳处屏蔽坑深度为 16 mm,绝缘子凹面侧对应的外屏蔽电极高度为 15 mm,内屏蔽电极高度和底部宽度分别为 20 和 43 mm,绝缘子凸面侧对应的外屏蔽电极高度为 36 mm,如图 2 所示。

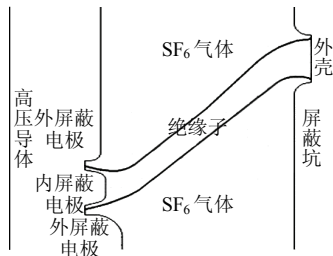


图 2 内、外屏蔽电极和屏蔽坑示意

Fig. 2 Diagram of inner, outer shield electrodes and shield pit

3 盆式绝缘子的结构设计

在采用 SF₆ 气体绝缘的高压电器中,绝缘子结构设计的首个原则是满足如下不等式:

$$\bar{U}_s(1 - a\hat{\sigma}_s) \geq \bar{U}_g(1 + b\hat{\sigma}_g) \quad (3)$$

式中: \bar{U}_s 为绝缘子表面闪络电压的加权平均值; a 为与绝缘子表面放电电压概率分布函数形式有关的系数; $\hat{\sigma}_s$ 为绝缘子表面放电电压的标准偏差; \bar{U}_g 为气体间隙击穿电压的加权平均值; b 为与气体间隙放电电压概率分布函数的形式有关的系数; $\hat{\sigma}_g$ 为气体间隙放电电压的标准偏差。

由式(3)经进一步推导可得到表达式^[24]:

$$E_{smax} \leq \lambda E_{gmax} \quad (4)$$

式中 $\lambda = \frac{1 - a\hat{\sigma}_s}{1 + b\hat{\sigma}_g} < 1$ 为保护因子。它对绝缘子表面或

者气体间隙放电电压的概率分布起一个修正作用,同时也表示绝缘子表面的电场必须小于其邻近 SF₆ 气隙中的电场。

以上绝缘子结构设计原则式(3)只适用于交流情况,即绝缘子各部分电位按电容分布,在直流情况下,该原则只是必要条件而非充分条件。由于在高压直流电场从加压开始到稳态的过渡过程中始终伴随着自由电荷积聚,这些电荷会导致初始电场发生很大畸变并降低绝缘子的表面介电强度。考虑到以上情况,对式(4)作一些修正,得到表达式:

$$E_{smax} \leq \lambda \eta E_{gmax} \quad (5)$$

式中: $\eta = \frac{U(T_0)}{U(1min)} = \left(\frac{T_0}{1min}\right)^{-1/m} < 1$ 为安全因子,它

表示电场向稳态过渡的整个 T_0 时间段绝缘子沿面电气强度的减少量; $U(1min)$ 为加压 1 min 后绝缘子的电气强度; $U(T_0)$ 为经过 T_0 电场达到稳态时绝缘子的电气强度。一般情况下, $0.7 \leq \lambda \leq 0.9$, $0.4 \leq \eta \leq 0.7$ 。

绝缘子设计的第 2 个原则是控制三结合点处尤其是靠近阴极处的场强,它是导致沿面放电的重要因素^[25]。可以通过加装屏蔽坑和内、外屏蔽电极来达到改善三结合点处电场分布的目的。

绝缘子设计的第 3 个原则是电场线要尽量少流出或者流进绝缘子^[26],这可以通过改善绝缘子的外形和加装外屏蔽电极来实现,同时,绝缘子表面的电场分布应尽量平滑,场强变化范围小。

然而,在实际运行过程中,绝缘子表面电荷积聚会导致其稳态场强与初始场强发生很大变化,引起局部电场集中,进而发生沿面闪络。这可通过降低绝缘子的实际运行电压、增大绝缘子尺寸或绝缘子表面涂覆表面电导率变化的涂层来解决,但是在实际工程中这些都不是最好的选择。文献[27]指出可以通过优化绝缘子外形来达到减少绝缘子表面电荷积聚,减少局部场强畸变的目的。减少绝缘子表面的电荷积聚主要有 2 条途径。

首先,尽量减少由高压金属电极指向绝缘子表面的电力线。金属电极在高电压下会发生场致发射,产生的电子会沿着电极发出的电力线运动,如果存在指向绝缘子表面的电力线,电荷就会运动到绝缘子表面,引起表面电荷积聚。

其次，绝缘子表面的初始法向场强和切向场强要尽可能小。绝缘子沿面的整体切向场强与爬电距离有较大关系，沿面每一点切向场强积分的结果近似等于绝缘子所承受的总电压值；绝缘子沿面法向场强与绝缘子倾角有较大关系，即如果绝缘子某处的切线与该处等位线越趋近于垂直，则该点法向场强越小。文献[24]提出约束关系式：

$$E_n(+0, l)_{\max} \leq E_N \quad (6)$$

$$E_\tau(+0, l)_{\max} \leq E_T \quad (7)$$

式中： E_N 为法向场强限制值； E_T 为切向场强限制值。

文献[24]提出 $E_N < 1 \text{ MV/m}$ 、 $E_T < 3.5 \text{ MV/m}$ 。如果满足此限制条件，绝缘子表面积聚的最大电荷量不会超过 $10\sim 20 \mu\text{C}/\text{m}^2$ ，在此情形下由表面电荷积聚所致的局部电场变化属于可接受的范围。

4 盆式绝缘子设计结果

按照上述设计原则，选取在闪络特性试验中表现良好的含氧化铝的环氧树脂绝缘子，其绝缘材料物理参数如下：体积电导率 $4.42 \times 10^{-16} \text{ S/cm}$ ；表面电导率 $7.41 \times 10^{-14} \text{ S}$ ；相对介电常数 4.9。经有限元软件计算分析后，得到优化后的盆式绝缘子外形如图 3 所示。

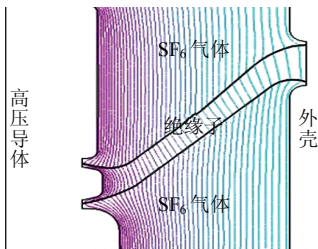


图 3 绝缘子及电极系统等位线分布

Fig. 3 The distribution map of equipotential line of insulator and electrodes system

图 3 为在 500 kV 直流电压作用下整个电极-绝缘子-SF₆ 气体系统的等位线分布。其中绝缘子的凹、凸面与 SF₆ 气体交界处各有 2 条分界线，2 条分界线之间仍为绝缘子，目的是计算时给绝缘子表面赋电导率值。计算得到的绝缘子凹面和凸面场强如图 4 所示。

由图 4 可知凸面的整体合成场强相比凹面的要均匀一些。凸面合成场强的峰值仅 2.73 MV/m，而凹面合成场强的峰值达到 3.45 MV/m，凸面的切向场强也比凹面的切向场强均匀得多。凸面的平均切向场强为 1.797 MV/m，而凹面的为 1.677 MV/m。凸面的切向场强峰值为 2.54 MV/m，而凹面的为 3.44 MV/m。因此，凸面的沿面绝缘利用系数为

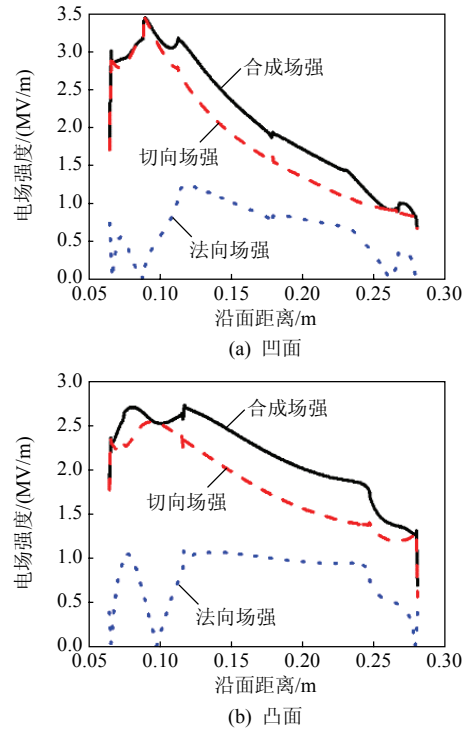


图 4 ±500 kV 盆式绝缘子沿面场强分布

Fig. 4 Electric field distribution along the surface of ±500 kV insulator

0.707，远高于凹面的 0.487。沿面初始切向场强的大小影响金属微粒存在时绝缘子表面的电场分布。无论是凹面还是凸面的最高切向场强都低于阈值 3.5 MV/m。

此外，凸面的法向场强整体比凹面的略高，但凸面的最高法向场强为 1.08 MV/m，而凹面的最高法向场强达到 1.23 MV/m。沿面初始法向场强过高会加剧该处电荷积聚，引起局部电场畸变。无论是凹面还是凸面的最高法向场强都比阈值 1 MV/m 略高，说明还有待进一步优化。

5 结论

±500 kV 直流 GIL 绝缘子尺寸设计结果达到了预期目标，其耐电性能还有待实际实验的进一步检验，其中，直流 GIL 盆式绝缘子外形设计的 3 个原则是：1) 控制三结合点处的场强，主要通过加入内、外屏蔽电极和屏蔽坑来实现，设绝缘子凹、凸面侧对应的外屏蔽电极高度分别为 h_1 和 h_3 ，内屏蔽电极高度为 h_2 ，则有 $h_1 < h_2 < h_3$ ；2) 尽量减少电场线流入或流出绝缘子表面；3) 控制绝缘子沿面的初始法向场强 $E_n < 1 \text{ MV/m}$ ，初始切向场强 $E_\tau < 3.5 \text{ MV/m}$ 。满足以上原则可以有效减小直流下表面电荷积聚和自由导电微粒对绝缘子带来的不利影响。

参考文献

- [1] Benato R, Carlini E M, Di M C, et al. Gas insulated transmission lines in railway galleries[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 704-709.
- [2] Koch H J. Gas-insulated transmission line (GIL)[C]//Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada: IEEE, 2003: 13-17.
- [3] Takinami N, Kobayashi S, Miyazaki A. Applications of the world's longest gas insulated transmission line in Japan[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 19-22.
- [4] Hillers T. Gas insulated transmission lines (GIL): ready for the real world[C]//Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore: IEEE, 2000: 575-579.
- [5] Sabot A. Insulation go-ordination procedure for 420 kV gas insulated lines (GIL)[C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IEEE, 1999: 1-10.
- [6] Nitta T, Shibuya Y, Fujiwara Y. Factors controlling surface flashover in SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 959-965.
- [7] Okabe S. Phenomena and mechanism of electric charges on spacers in gas insulated switchgears[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 46-52.
- [8] 范建斌, 李鹏, 李金忠, 等. ± 800 kV 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 1-7.
Fan Jianbin, Li Peng, Li Jinzhong, et al. Study on key technology of ± 800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 1-7(in Chinese).
- [9] 贾志杰, 张斌, 范建斌, 等. 直流气体绝缘金属封闭输电线路中绝缘子的表面电荷积聚研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 112-117.
Jia Zhijie, Zhang Bin, Fan Jianbin, et al. Study of charge accumulation along the insulator surface in the DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 112-117(in Chinese).
- [10] 汪泓, 邱毓昌. 气体绝缘开关装置(GIS)的近期发展动向[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 54-57.
Wang Hong, Qiu Yuchang. Recent development trend of gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 54-57(in Chinese).
- [11] 唐炬, 陈长杰, 刘帆, 等. 局部放电下 SF₆ 分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 116-122.
Tang Ju, Chen Changjie, Liu Fan, et al. Detection of constituents from SF₆ decomposition under partial discharge and recognition of insulation defect coding[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 116-122(in Chinese).
- [12] 骆立实, 姚文军, 王军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的 SF₆ 分解气体研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 231-236.
Luo Lishi, Yao Wenjun, Wang Jun, et al. Research on partial discharge diagnosis of GIS by decomposed gas of SF₆[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 231-236(in Chinese).
- [13] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 62-65.
Liu Youwei, Wu Liyuan, Gong Yanpeng. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 62-65(in Chinese).
- [14] 唐炬, 周倩, 许中荣, 等. GIS 超高频局放信号的数学建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 106-110.
Tang Ju, Zhou Qian, Xu Zhongrong, et al. Establishment of mathematical model for partial discharge in GIS using UHF method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 106-110(in Chinese).
- [15] 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): 43-46, 58.
Qian Yong, Huang Chengjun, Jiang Xiuchen, et al. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 43-46, 58(in Chinese).
- [16] 黄兴泉, 康书英, 李泓志. GIS 局部放电超高频检测法有关问题的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 42-45, 68.
Huang Xingquan, Kang Shuying, Li Hongzhi. Research on ultra-high-frequency method for detection of partial discharge in GIS [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 42-45, 68(in Chinese).
- [17] 崔在玉, 江昌元, 朴基俊, 等. 预防气体绝缘开关装置故障的高频局部放电在线实时监控系统的[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 51-54.
Cui Zaiyu, Jiang Changyuan, Piao Jijun, et al. On-line UHF partial discharge monitoring system for prevention of failures in gas-insulated switchgears[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 51-54(in Chinese).
- [18] Volpov E K. HVDC gas insulated apparatus: electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 7-36.
- [19] 贾江波, 马自伟, 查玮, 等. 稍不均匀电场中绝缘子附近导电微粒受力分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 141-145.
Jia Jiangbo, Ma Ziwei, Zha Wei, et al. Electrostatic force on particle near spacer in inhomogeneous electric field between diverging electrodes[J]. Proceedings of The CSEE, 2006, 26(10): 141-145(in Chinese).
- [20] 严璋, 朱德恒. 高压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 164-172.
- [21] 中国电力企业联合会标准化部. GB 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [22] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 57-62.
- [23] 贾江波. GIS 中稍不均匀场内自由导电微粒的运动特性[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- [24] Volpov E K. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [25] Rizk M S, Hackam R. Performance improvement of insulators in a gas-insulated system[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1987, EI-22(4): 439-446.
- [26] Cooke C M. Charging of insulator surfaces by ionization and transport in gases[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1982, EI-17(2): 172-178.
- [27] Hasegawa T, Yamaji K, Hatano M. Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500kV DC GIS[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 194-202.



贾志杰

收稿日期: 2011-03-08.

作者简介:

贾志杰(1985), 男, 硕士, 工程师, 从事高电压试验技术和开关设备绝缘技术研究, E-mail: lixiangmylover@gmail.com;

甘德刚(1980), 男, 硕士, 工程师, 从事输配电设备状态监测与评价研究;

李晶(1962), 男, 高级工程师, 从事开关设备试验与绝缘技术研究。

(责任编辑 马晓华)