

不同 SF₆ 气压下不同填料 环氧树脂绝缘子的直流闪络特性

贾志杰¹, 范建斌², 李金忠², 张乔根³

(1. 四川电力试验研究院, 四川省 成都市 610072; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;
3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

DC Flashover Characteristics of Epoxy Resin Insulator With and Without Fillers Under Different SF₆ Gas Pressures

JIA Zhi-jie¹, FAN Jian-bin², LI Jin-zhong², ZHANG Qiao-gen³

(1. Sichuan Electric Power Test & Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan Province, China;
2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Gas insulated transmission line (GIL) can be used to substitute part of overhead transmission line or power cable under special environments to enhance the flexibility of choosing transmission corridor. The key factor impacting the insulation level of GIL is the charge accumulation along the surfaces of support insulators in DC environment. In this paper, a cone-plate electrode assembly is built to simulate the electric field distribution of coaxial cylindrical structure inside the GIL under DC voltage and the impacts of the filler and the shape of epoxy resin insulator under different SF₆ pressures in DC environment on its flashover characteristic are researched. Test results show that in DC GIL the epoxy resin insulator using SiO₂ as the filler is indicative of the best insulation performance in short-term voltage impressing and long-term voltage withstanding tests. The points, which attentions should be paid to, in the optimization of contour structure of cone-plate electrode assembly based epoxy resin insulator for DC GIL and the method to approximately acquire charging time constant of insulator are proposed.

KEY WORDS: epoxy resin insulator; DC flashover characteristic; surface charge accumulation; flashover voltage; surface conductivity; time constant

摘要: 建立了锥板电极系统来模拟气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)中同轴圆柱结构的电场分布,研究了直流下 SF₆ 环氧树脂绝缘子的填料和形状对其闪络特性的影响,结果表明,直流 GIL 中填料为 SiO₂ 的环氧树脂绝缘子在短时加压和长期耐压试验中的绝缘性能都是最

优良的。还介绍了基于锥板电极的直流 GIL 绝缘子外形结构优化的注意事项和绝缘子充电时间常数的近似求取方法。

关键词: 环氧树脂绝缘子; 直流闪络特性; 表面电荷积聚; 闪络电压; 表面电导率; 时间常数

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、电能损耗小、可靠性高和全寿命输电成本比较合理等优点,可成为特殊环境下替代架空输电线路的首选方案^[1-7]。GIL 的支撑绝缘子通常由环氧树脂的混合物浇注而成,其沿面闪络是一种最常见的故障^[8-9]。

在直流输配电系统中,由于气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和 GIL 的绝缘子表面电荷积聚机理相同,外形优化方式相近,所以对直流 GIL 绝缘子的研究可以参考 GIS 的相关成果。长期以来,国内外对直流 GIS 关键问题的研究主要集中在环氧树脂绝缘子的表面电荷积聚和电场优化。文献[10]研究显示:为了减小直流 GIS 的电荷积聚,需要显著增大调整系数 η 。 η 与绝缘子表面的绝缘强度有关,并满足不等式 $E_{smax} \leq \lambda \eta E_{gmax}$, 其中, 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。日本有些学者认为:在直流电压作用下,绝缘子沿面电场分布基本上由固体绝缘的表面电阻率决定。由于沿面电位的重新分布

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877073)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50877073).

时间常数一般为几十至几百 min 数量级, 所以对直流电压长期作用下绝缘子沿面电位分布的变化应该给予高度重视, 通过控制表面场强的最大值来防止闪络^[11], 但是, 从短期加压和长期耐压这 2 个角度考察环氧树脂绝缘子的闪络特性, 进而对其电荷积聚和电场分布优化加以研究的文献目前还很少。

本文借鉴 GIS 用绝缘子的表面电荷积聚和电场分布的相关研究成果, 主要研究直流下 SF₆ 中环氧树脂绝缘子的填料和形状对其闪络特性的影响。

1 试验过程

1.1 试品

从填料的角度选取 3 种浇注环氧树脂绝缘子: 无填料、填料为 Al₂O₃、填料为 SiO₂。这 3 种绝缘子均由相同的双酚 A 型环氧树脂和酸酐固化剂在真空下高温浇注而成, 区别仅在于填料。含 Al₂O₃ 和 SiO₂ 的绝缘子中填料的质量分数分别为 70% 和 60%, 均符合 GIS 或 GIL 中常用支撑绝缘子的成分要求。无填料和填料为 SiO₂ 的绝缘子的形状只有 1 种, 即圆柱型, 而填料为 Al₂O₃ 的绝缘子被设计成 3 种形状: 圆柱型、凹面型和伞裙型, 如图 1 所示。每个绝缘子的高度均为 20 mm, 上下表面直径均为 25 mm。

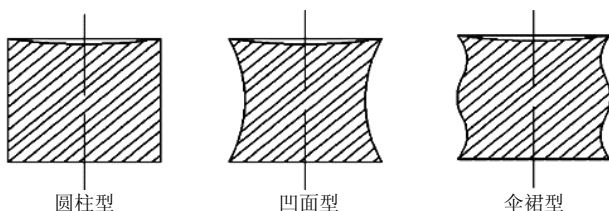


图 1 绝缘子的 3 种形状

Fig. 1 Three different shapes of insulators

1.2 试验装置和方法

直流高压串级发生器产生负极性直流高压, 同时用电阻分压器测量绝缘子上承受的电压。电极连同绝缘子放置在充 SF₆ 气体的有机玻璃容器中, 气压的变化范围为 0.05~0.4 MPa。试验电极为锥板电极, 锥电极的倾斜度为 3°, 用来模拟 GIS 或 GIL 的电场分布, 因为锥电极曲率半径很大且两电极的距离很小, 所以在有无绝缘子时锥板电极间的电场均为稍不均匀电场^[12]。电极结构如图 2 所示, 2 电极间放置一圆柱型绝缘子, 电极与绝缘子间采用导电胶粘接处理以排除气隙的影响。为了观察 3 结合点处在加压时有无局部放电出现, 在接地线处串接一罗氏线圈, 通过示波器观察有无脉冲电流发生^[13]。试验发现在绝缘子闪络前流过地线的电流幅值均

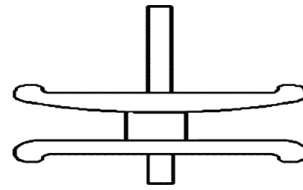


图 2 电极结构

Fig. 2 Structure of electrodes

处于噪声水平, 说明没有局部放电出现, 3 结合点处无气隙。

试品加压采用 2 种方式, 首先是均匀升压, 直到闪络, 升压速度为 5 kV/s, 确定不同气压下绝缘子的短时耐受特性, 气压在 0.1~0.4 MPa 变化; 然后根据短时耐受特性, 将施加电压降低 ΔU , 进行长时间电压作用下的绝缘子耐受特性试验。均匀加压(升压速度为 5 kV/s)到某个值后, 保持电压值不变直到试品闪络, 记录加压时间和施加电压值, 然后电压再降低 ΔU , 重复上述过程, 可得到绝缘子闪络电压与加压时间的关系。长时间耐受试验中, SF₆ 气体的气压恒定为 0.3 MPa。

2 试验结果及分析

2.1 填料对绝缘子闪络特性的影响

短期加压试验选用了 3 种不同填料的圆柱型环氧树脂绝缘子, 测量它们在不同气压下的闪络电压并比较, 如图 3 所示。由图 3 可知, 填料为 SiO₂ 的绝缘子在各个气压下的闪络电压均为最高, 填料为 Al₂O₃ 和无填料的绝缘子在低气压下的闪络电压相差不大, 但是当气压高于 0.3 MPa 时, 无填料的绝缘子的闪络电压随气压升高出现明显的饱和现象, 逐渐低于含 Al₂O₃ 的绝缘子对应的闪络电压。

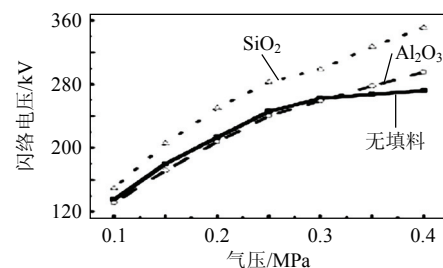


图 3 不同填料绝缘子在不同气压下的闪络电压比较

Fig. 3 Flashover voltages comparison among insulators with different fillers under different pressure

长时间耐受试验同样选用了上述 3 种不同填料的圆柱型绝缘子, 最长加压时间不大于 360 min, 其长时间耐受特性如图 4 所示。横轴为发生闪络对应的加压时间, 纵轴为闪络电压的幅值(绝对值)。图 4 的各子图中均有一个箭头, 表示某个电压下经过 360 min 后, 绝缘子未发生闪络。

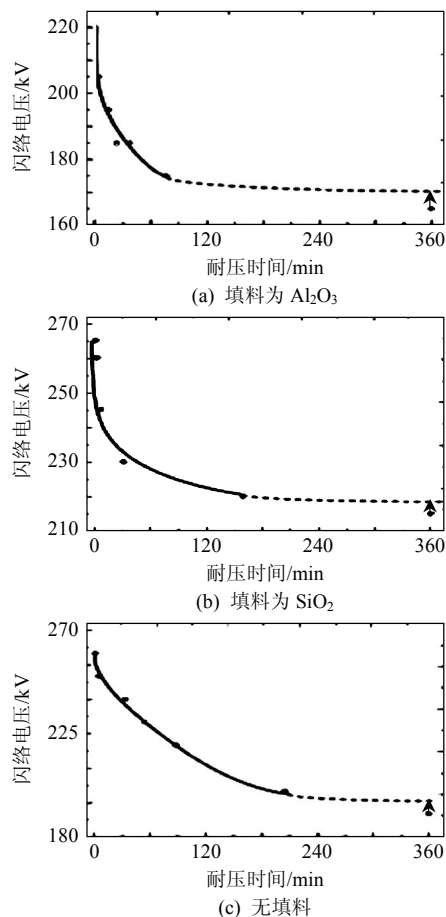


图4 不同填料环氧树脂绝缘子的闪络特性

Fig. 4 V-T characteristics among epoxy resin insulators with different fillers

由图4可知,填料为 SiO_2 的绝缘子在0~360 min内耐受特性较好,即使被360 min长时间电压作用,其闪络电压仍可高于215 kV。经过相同的360 min长期加压后,填料为 SiO_2 、 Al_2O_3 和无填料的绝缘子所对应的闪络电压幅值分别相当于各自1 min短期闪络电压幅值的83.0%、77.3%和75.0%,也就是说,填料为 SiO_2 的绝缘子的360 min闪络电压与其1 min短期闪络电压的比值是最高的,填料为 Al_2O_3 的其次,无填料的最低。此外,图4中显示了不同绝缘子存在同样的趋势,即随着电压作用时间的增长,绝缘子发生闪络时对应的闪络电压幅值降低,并逐渐趋于饱和,呈现指数衰减趋势。大量试验数据表明,在3~10 MV/m的直流场强的长时间作用下,环氧树脂浇注绝缘子的表面会积聚大量的电荷,甚至能接近 mC/m^2 数量级,严重畸变周围电场,从而降低闪络电压^[14]。这些电荷的产生方式有很多种,比如在临近绝缘子的 SF_6 气体中发生的各种电离,绝缘子的表面电导电流和体积电导电流^[15]。

文献[16]对直流电压作用下表面电荷的积聚过程进行了研究,发现如果介质各向同性,则表面电

荷密度随时间的变化规律为

$$\sigma(t) = U \frac{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1}{A \gamma_2 + B \gamma_1} (1 - e^{-t/\tau_0}) \quad (1)$$

式中: ε_1 和 ε_2 分别为固体和气体的介电常数; γ_1 和 γ_2 分别为固体表面电导率和气体的电导率;A、B为常数; τ_0 为电荷积聚时间常数; U 为外施直流电压。

由式(1)可得,在 SF_6 中, ε_1 、 γ_1 和 τ_0 是决定不同固体介质表面电荷密度大小的关键因素。而对于相同形状和表面粗糙度的环氧树脂绝缘子,填料是影响绝缘子沿面闪络电压的决定性因素,因此,填料为 Al_2O_3 、 SiO_2 和无填料的环氧树脂绝缘子在短期加压和长期耐压过程中不同的闪络特性可以解释为:由于它们填料不同,所以各自的表面电导率和充电时间常数不同,进而导致各自的表面电荷积聚情况不同,电场畸变严重性不一样,从而影响了各自的闪络电压。

下面举例说明。经试验可知,填料为 Al_2O_3 和无填料的绝缘子的表面电导率分别为 $8.013 \times 10^{-15} \text{ S}$ 和 $1.129 \times 10^{-13} \text{ S}$,二者的相对介电常数分别为3.8和4.9。而它们的固有充电时间常数 τ 可通过以下公式计算得到: $\tau = \varepsilon \rho$,其中, ε 为介电常数; ρ 为表面电阻率。所以,二者的 τ 分别为70 min和7 min左右。由公式(1)可知,当绝缘子表面电荷积聚达到稳态时,其表面电导率与表面电荷密度近似成反比^[17],而在高压直流GIS中增大绝缘子的表面电导率可有效抑制其表面电荷积聚^[18],因此,在介电常数相差不大的情况下,无填料绝缘子的表面电荷积聚比填料为 Al_2O_3 的绝缘子得到更好地抑制,前者的表面电场分布得到改善,从而使其经过360 min长期耐压后的闪络电压比填料为 Al_2O_3 的高。

2.2 形状对绝缘子闪络特性的影响

短期加压试验选用了3种不同形状的填料为 Al_2O_3 的环氧树脂绝缘子,测量它们在不同气压下的闪络电压并比较,如图5所示。由图5可知,对于填料为 Al_2O_3 的环氧树脂绝缘子,在各个气压下伞裙型绝缘子的闪络电压都是最高的,凹面型的其次,圆柱型的最低。

长时间耐受试验同样选用了上述3种不同形状的含 Al_2O_3 的绝缘子,最长加压时间不大于180 min,如图6和图4(a)所示。

比较图6和图4(a),伞裙型绝缘子在0~180 min范围内耐受特性较好,即使被180 min长时间电压

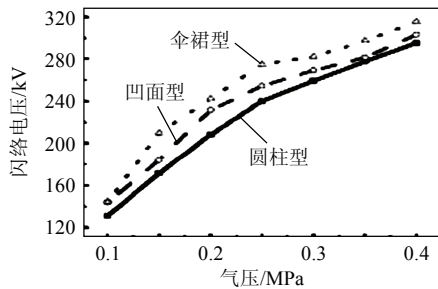
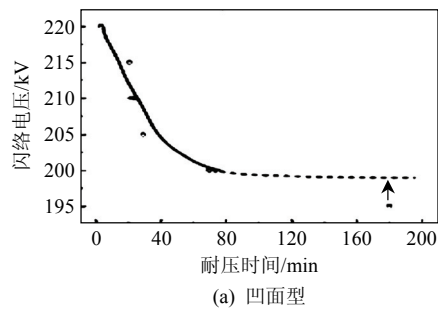
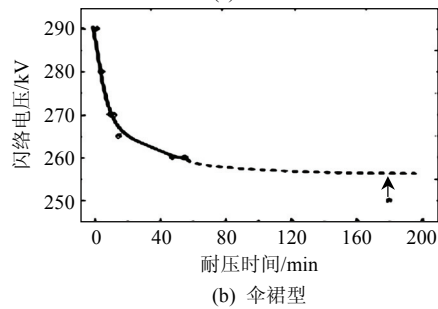


图 5 不同形状含 Al₂O₃ 的绝缘子在不同气压下的闪络电压比较

Fig. 5 Flashover voltages comparison among alumina filled insulators with different shapes under different pressure



(a) 凹面型



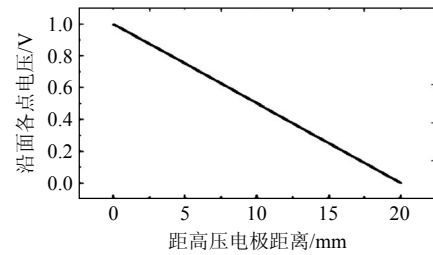
(b) 伞裙型

图 6 不同形状含 Al₂O₃ 的绝缘子的闪络特性

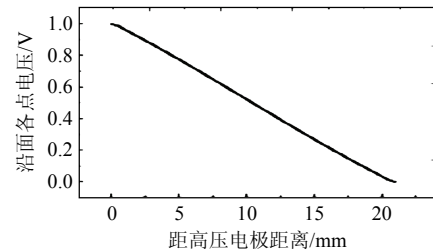
Fig. 6 V-T characteristics among alumina filled insulators with different shapes

作用, 其闪络电压仍可高于 250 kV, 但是, 经过 180 min 长期加压后, 凹面型绝缘子的闪络电压与其 1 min 短期闪络电压的比值约为 90%, 在 3 种形状绝缘子中是最高的。不论是用一定时间内耐受电压平均值还是长期闪络电压与 1 min 短期闪络电压的比值来衡量, 圆柱型绝缘子的绝缘耐电强度都是最差的。与此同时, 3 种形状绝缘子的闪络特性曲线下降稳定时对应的加压时间基本一样, 约 75 min, 而由 2.1 可知, 含 Al₂O₃ 的环氧树脂绝缘子的固有充电时间常数为 70 min 左右, 即闪络电压下降出现饱和时对应的加压时间与绝缘子固有充电时间常数很接近, 也就是说, 此时绝缘子的表面电荷积聚达到动态平衡状态, 绝缘子沿面各点场强变化很小, 其耐受电压也趋向稳定。

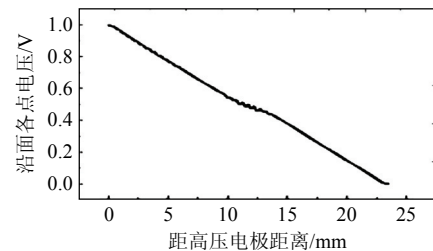
图 7 是不同形状的填料为 Al₂O₃ 的环氧树脂绝缘子沿面电位的仿真结果, 其外施电压为 -1 V, 所以图中沿面各点电压值均为绝对值。



(a) 圆柱型



(b) 凹面型



(c) 伞裙型

图 7 不同形状绝缘子沿面电位仿真结果

Fig. 7 Simulation results of surface potential of alumina filled insulators with different shapes

由图 7 可知, 3 种形状绝缘子的表面电位分布都相对均匀, 伞裙型、凹面型和圆柱型绝缘子的最大表面场强分别为 61、51、50 V/m, 此外, 尽管 3 种形状的绝缘子垂直高度一样, 但是它们的沿面距离是不同的, 伞裙型、凹面型和圆柱型绝缘子的沿面距离分别为 23.7、21.1、20 mm。

结合图 5~7 可知, 凹面型绝缘子的沿面距离比圆柱型绝缘子的长, 并且在绝缘子中央处的最大场强仅为 51 V/m, 与其沿面平均场强 50 kV/m 差不多, 因此, 凹面型绝缘子在沿面电位分布与圆柱型相差很小的情况下, 由于沿面距离的增加使其在不同气压下的闪络电压均高于圆柱型绝缘子, 并且在长期耐压的过程中电压跌落比圆柱型小得多。与此同时, 伞裙型绝缘子的沿面距离最大, 尽管其固体介质的加入使原有电极系统场强分布畸变较大, 但只是发生在绝缘子上下两圈最小直径处, 在三结合点和中央处的场强并未发生大的改变, 而对于高压直流装置的绝缘子, 在没有金属微粒存在时, 不论长时间耐压还是短时加压, 由于电荷积聚导致的绝缘子中央和三界面处场强增强都会被视作最坏的情况^[19], 所以在排除了上述最坏的情况后, 伞裙型绝

缘子沿面距离的显著增大对闪络电压的正作用明显大于场强畸变对闪络电压的负作用。在长期加压时,尽管存在场强分布改变带来表面积聚电荷增加这一可能性,比如沿面某处初始法向场强增大导致一定加压时间后积聚电荷增多,但是爬电距离的显著增大仍然使伞裙型在 0~180 min 范围内的耐受电压平均值是最高的。

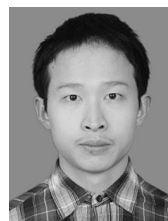
3 结论

在填料为 Al_2O_3 、 SiO_2 和无填料的环氧树脂绝缘子中,填料为 SiO_2 的绝缘子无论在短时加压还是长期耐压的过程中,其绝缘性能都是最优良的,这与填料为 SiO_2 的绝缘子的表面电导率和充电时间常数密切相关。

在高压导体与接地导体垂直距离不变的情况下,尽量增大直流 GIL 中环氧树脂绝缘子的沿面距离可有效增加绝缘子在短时加压和长期耐压过程中的闪络电压,填料为 Al_2O_3 的环氧树脂绝缘子的长期耐压曲线出现饱和时对应的加压时间与其固有时间常数很接近。

参考文献

- [1] 范建斌,于永清,刘泽洪,等. ± 800 kV 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 1-6.
Fan Jianbin, Yu Yongqing, Liu Zehong, et al. Introduction of ± 800 kV HVDC transmission standards system[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 1-6(in Chinese).
- [2] Benato R, Carlini E M, Di M C, et al. Gas insulated transmission lines in railway galleries[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 704-709.
- [3] Koch H J. Gas-insulated transmission line (GIL)[C]. Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003.
- [4] 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, 2003.
- [5] Hillers T. Gas insulated transmission lines (GIL): ready for the real world[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000.
- [6] 周浩,余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9(in Chinese).
- [7] 汪洪,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 Feng, Qiu Yuchang. Recent development trend of gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 54-57(in Chinese).
- [8] 汤浩,吴广宁,范建斌,等. 直流气体绝缘输电线路的绝缘设计[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 65-70.
Tang Hao, Wu Guangning, Fan Jianbin, et al. Insulation design of gas insulated HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 65-70(in Chinese).
- [9] Sabot A. Insulation go-ordination procedure for 420 kV gas insulated lines (GIL)[C]. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 1999.
- [10] Volpov E K. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [11] Nitta T, Shibuya Y, Fujiwara Y. Factors controlling surface flashover in SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 959-965.
- [12] 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).
- [13] 卢鹏,方煜瑛,刘旭. 1100 kV GIS 设备特高频(UHF)法测量局部放电的应用研究[J]. 电力建设, 2009, 30(6): 33-35.
Lu Peng, Fang Yuying, Liu Xu. Study on application ultra-high-frequency (UHF) measuring partial discharge of 1100 kV GIS device [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(6): 33-35(in Chinese).
- [14] Volpov E K. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [15] Okabe S. Phenomena and mechanism of electric charges on spacers in gas insulated switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 46-52.
- [16] 汪洪,肖登明,陈庆国,等. 介质分界面电荷积聚过程分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(4): 347-350.
Wang Feng, Xiao Dengming, Chen Qingguo, et al. Analysis of charge accumulation at dielectric interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 347-350(in Chinese).
- [17] 汪洪,方志,邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 105-109.
Wang Feng, Fang Zhi, Qiu Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 105-109(in Chinese).
- [18] Nakanishi K, Yoshioka A, Arahata Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1983, 102(12): 3919-3927.
- [19] Volpov E K. HVDC gas insulated apparatus: electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 7-36.



贾志杰

收稿日期: 2009-09-18。

作者简介:

贾志杰(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为高电压绝缘技术, E-mail: lixiangmylover@gmail.com;

张乔根(1965—),男,博士,教授,博士生导师,从事气体绝缘与放电等离子技术、大功率脉冲技术及应用的研究工作, E-mail: hvzhang@mail.xjtu.edu.cn。

(编辑 褚晓杰)