

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.009

GIS支撑绝缘子表面状况对其雷电冲击闪络特性的影响

马径坦¹, 赵军平¹, 游浩洋¹, 秦逸帆¹, 张伶俐¹,
张乔根¹, 李金忠^{1,2}, 张书琦², 吴超²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: SF₆气体绝缘开关设备(GIS)的运行经验表明,绝缘子往往是系统绝缘最薄弱环节和决定性因素,因此研究绝缘子闪络特性的影响因素具有十分重要的意义。文中通过搭建1 000 kV陡前沿冲击试验装置,研究了雷电冲击作用下GIS内部支撑绝缘子表面状况对其闪络特性的影响。结果表明:绝缘子沿面闪络电压随表面粗糙度的增大而降低,文中从绝缘子表面吸附能力的角度对其进行了分析;绝缘子表面附着导电微粒时其闪络电压显著降低,且导电微粒距高压电极越近,绝缘子闪络电压越低,可从导电微粒附着位置对绝缘子沿面电场分布的影响上进行解释。

关键词: 雷电冲击; GIS; 支撑绝缘子; 粗糙度; 导电微粒; 附着位置

Influence of Surface Conditions on Flashover Characteristics of Supporting Insulators in GIS Under Lightning Impulse

MA Jingtan¹, ZHAO Junping¹, YOU Haoyang¹, QIN Yifan¹, ZHANG Lingli¹,
ZHANG Qiaogen¹, LI Jinzhong^{1,2}, ZHANG Shuqi², WU Chao²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The operating experience of SF₆ gas insulated switchgear (GIS) shows that insulators are often the weak link and key factor of system's insulation. Therefore it's important to find out factors influencing flashover characteristics of insulators. Based on a steep-front impulse test device, this paper presents our study about the influence of surface conditions along insulators on their flashover characteristics. The results show that increasing the surface roughness would decrease the flashover voltage of insulators, and this phenomenon is analyzed from the perspective of surface absorption ability of insulators. Flashover voltage drops obviously when conductive particle is attached to insulator surface, and the closer the particle is to the high-voltage electrode, the lower flashover voltage becomes, which is due to the change of electric field along insulator surface brought by the change of particle position.

Key words: lightning impulse; GIS; supporting insulator; roughness; conductive particle; attached position

0 引言

随着中国电力系统电压等级的不断提高, SF₆气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)越来越广泛地应用在中国的电力系统之中。而由于绝缘子沿面闪络导致GIS发生事故的案例屡见不鲜,且该种情况下检修时间长,事故原因分析比较困

难。因此研究绝缘子闪络特性的影响因素具有十分重要的意义^[1-2]。

绝缘子表面状况对其闪络电压有很大影响,受到了国内外学者的广泛关注。而对于绝缘子表面粗糙度和附着导电微粒的研究更是其中的热点问题。究其原因,一方面,通过控制绝缘子表面粗糙度来提高闪络电压是一种简单易操作的措施。另一方面,统计数据表明相当大比例的GIS绝缘子故障是

收稿日期:2015-11-21; 修回日期:2015-12-29

基金项目:国家电网公司科技项目资助项目(SGAH0000KXJS1401753)。

Project Supported by State Grid Corporation of China(SGAH0000KXJS1401753).

由导电微粒附着在绝缘子表面造成的^[3]。虽然 GIS 在生产和装配过程中内部已经被反复检查并打磨冲洗以确保无毛刺或突起,但是在运输、安装以及投运过程中由于机构动作都会不可避免地产生导电微粒。如果这些导电微粒运动到绝缘子表面并附着在其上,往往会使绝缘子的沿面闪络电压出现大幅度的下降。

关于表面粗糙度对绝缘子闪络特性的影响,各国学者得出的结论不完全相同^[4-12]。美国南卡罗来纳大学 A. Mitra 和 T. Asokan 等人研究了氧化铝绝缘子闪络电压与其表面粗糙度的关系,研究结果表明随着粗糙度的增大闪络电压会随之降低^[4]。西安交通大学田杰等人对于可加工陶瓷表面粗糙度对冲击闪络电压的影响进行了研究,提出打磨方向对闪络电压有较大影响,并且不论打磨方向如何闪络电压均随表面粗糙度的增大而升高^[5]。

对于绝缘子表面附着导电微粒的研究,不同学者从不同角度给出了结论^[13-21]。A. Hama 等人认为绝缘子表面由于存在导电微粒致使局部电场集中而引发闪络的过程和极不均匀电场中 SF₆ 气体间隙的击穿过程很相似,都包含流注起始、流注向先导转变以及先导分级发展的过程^[13]。日本东京电力公司 S. Okabe 等人研究了雷电及陡波冲击下不同长度金属微粒对绝缘子闪络电压的影响,结果表明随着导电微粒长度的增加,绝缘子闪络电压逐渐降低^[14]。然而,关于导电微粒附着位置对绝缘子闪络电压影响的研究还少有报道。

文中基于国内外已有成果,通过实验研究了雷电冲击下 GIS 支撑绝缘子表面粗糙度和导电微粒附着位置对其闪络特性的影响,并对实验结果进行了分析。

1 实验装置、试品和实验方法

1.1 实验装置

研究支撑绝缘子冲击闪络特性使用 1 000 kV 陡前沿冲击试验装置。该装置共分 5 个部分,见图 1,分别是总控制台、充电触发装置、Marx 发生器、陡化间隙和实验腔体。总控制台通过充电控制、触发控制和气路控制 3 路实现对整套 1 000 kV 陡前沿冲击试验装置的控制。总控制台经过充电回路实现对 Marx 发生器的正负充电,触发脉冲由充电触发装置产生,经过高压电缆输出到 Marx 发生器进行放电触发。

1 000 kV 陡前沿冲击试验装置的测量系统由锥形电压传感器、双屏蔽电缆、同轴积分器和示波

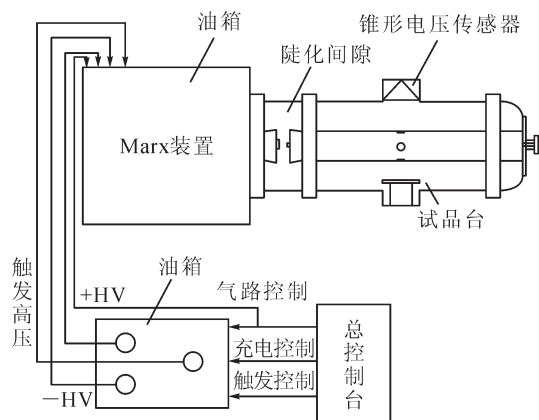


图1 1 000 kV 陡前沿冲击试验装置示意图

Fig. 1 Structure of 1 000 kV steep-front impulse test device

器构成。为了隔离实验时高频信号的干扰,将测量系统在 GIS 外面的部分全部封装在 5 mm 厚的铝制箱子中,且示波器采用锂电池逆变供电。测量的结果通过示波器自带网线输出经光纤传送到总控制台进行波形观察和数据处理。为了抑制测量信号的失真,使信号在进入示波器前通过了一个同轴积分器。该测量系统的核心是安装在 GIS 内的锥形电压传感器,其详细结构见图 2。该锥形电压传感器整体呈锥形,由内锥底面和 GIS 的母线高压导杆构成高压臂,内锥侧面与接地外锥的侧面构成低压臂,从而实现了电容分压器的功能。

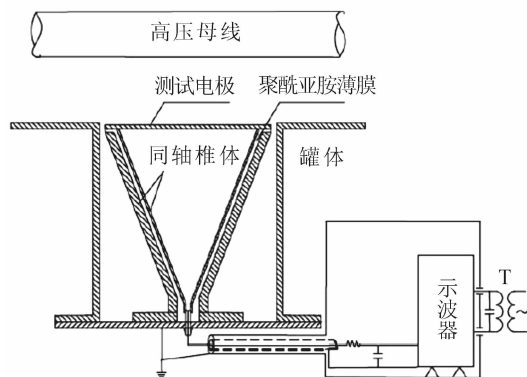


图2 锥形电压传感器结构图

Fig. 2 Configuration of conical voltage sensor

图3给出了实验中使用的雷电冲击波形,其波头时间为 1.1 μ s,波尾时间为 45.6 μ s,符合 IEC 标准中关于标准雷电波的规定。

1.2 试品

研究使用 72.5 kV 支撑绝缘子,绝缘子高度为 64 mm,其中环氧材料即有效绝缘部分的高度为 48 mm。该绝缘子上下对称,上下金属连接部分都浇注在绝缘子的环氧材料里面,金属连接部分的高度

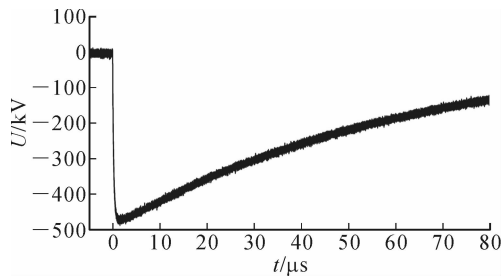


图3 LI 输出电压波形

Fig. 3 Output voltage waveform of LI

为 8 mm, 在金属连接部分的中间开有矩形凹槽, 用以固定绝缘子。图 4 为该支撑绝缘子的实物图。



图4 72.5 kV 支撑绝缘子实物图

Fig. 4 Photo of 72.5 kV supporting insulator

1.3 实验方法

由于试品在雷电冲击作用下闪络电压分散性较大, 文中采用 50% 放电电压描述绝缘子的闪络电压。所谓 50% 放电电压, 是指在该电压下, 试品发生沿面闪络的概率为 50%。测量 50% 放电电压的方法一般有多极法和升降法。两者之中多极法试验工作量较大, 而升降法的试验工作量更为可控, 因此采用升降法获得绝缘子 50% 放电电压。

在研究表面粗糙度对绝缘子闪络特性影响的实验中, 使用不同目数的砂纸对绝缘子表面进行均匀打磨, 并确保每次打磨方向相同, 打磨后将绝缘子用无水酒精擦拭干净以防止脏污影响表面粗糙度的观察和测量。使用激光共聚焦显微镜对经过不同目数砂纸打磨过的绝缘子进行观察并计算绝缘子表面的平均粗糙度, 然后分别测得其在雷电冲击下的闪络电压。

为了研究导电微粒附着位置对绝缘子闪络特性的影响, 在绝缘子表面粘附一根长 4 mm、直径 0.4 mm 的钢针, 针端曲率半径约 35 μm。定义微粒位置 x 为其距绝缘子高压电极的距离, 分别将钢针粘在 $x=8$ mm、 $x=31$ mm、 $x=55$ mm 的位置, 测得闪络电压。具体粘针位置见图 5。

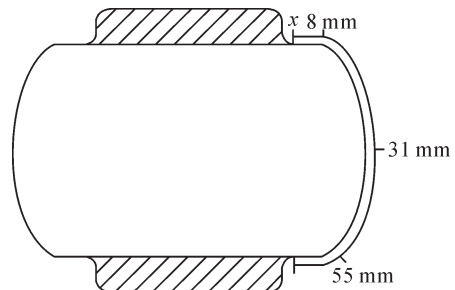


图5 粘针位置示意图

Fig. 5 Positions of needles adhered to insulator

2 实验结果及分析

2.1 表面粗糙度对绝缘子冲击闪络特性的影响

绝缘子在 OLS4000 型激光共聚焦显微镜 5 倍放大镜头下表面情况见图 6。图 6(a) 是未使用砂纸打磨的绝缘子的表面状况, 其表面最光滑, 平均粗糙度为 0.11 μm。图 6(b) 是使用 1500 号砂纸打磨后的绝缘子表面情况, 可以观察到其表面已有砂纸打磨的痕迹, 其平均表面粗糙度为 0.311 μm。图 6(c) 是使用 150 号砂纸打磨后的绝缘子表面情况, 其表面已能观察到明显的打磨痕迹, 这种情况下绝缘子的平均表面粗糙度为 0.402 μm。图 6(d) 是使用 80 号砂纸打磨过后绝缘子的表面情况, 可以看出绝缘子表面明显不平坦, 并且由于砂纸粗糙度较大导致绝缘子表面出现了很多凹陷和突起, 这种情况下绝缘子的平均表面粗糙度为 1.397 μm。

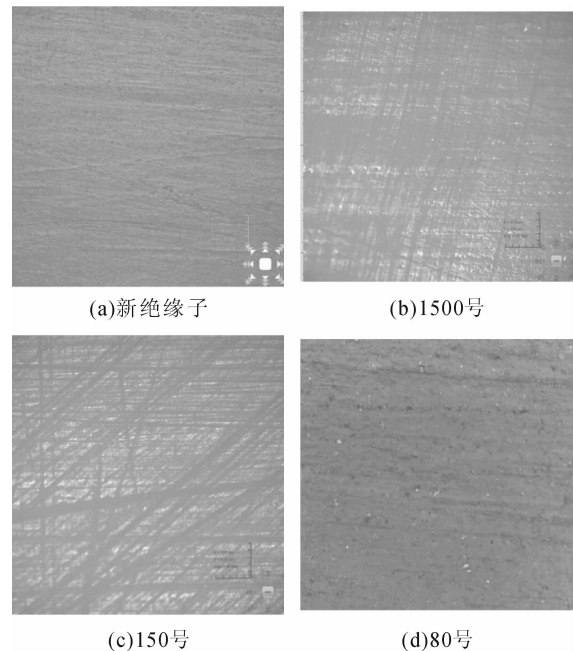


图6 不同砂纸打磨过的绝缘子表面状况

Fig. 6 Surface conditions of insulators polished by different abrasive papers

绝缘子的平均表面粗糙度与砂纸目数的关系

见表1。

表1 绝缘子平均表面粗糙度与砂纸目数关系

Table 1 Relation between average surface roughness of insulators and type of abrasive papers

项目	新绝缘子	1500号	150号	80号
平均表面粗糙度/ μm	0.110	0.311	0.402	1.397

分别对不同粗糙度的绝缘子施加雷电冲击,测得其在正负极性雷电冲击下的50%放电电压。

在正极性雷电冲击下未经砂纸打磨的绝缘子50%放电电压最高,为424.9 kV,经过1500号砂纸打磨过后,绝缘子的50%放电电压为423.5 kV,经150号砂纸打磨的绝缘子50%放电电压为419.6 kV,而经过80号砂纸打磨过后绝缘子的50%放电电压变为了417.3 kV。即随着绝缘子表面粗糙度的增大绝缘子闪络电压逐渐降低。

在负极性雷电冲击的作用下未经砂纸打磨的绝缘子50%放电电压最高,为429.1 kV,经过1500号砂纸打磨过后,绝缘子的50%放电电压为414.8 kV,经150号砂纸打磨的绝缘子50%放电电压为411.8 kV,而经过80号砂纸打磨过后绝缘子的50%放电电压变为了403.7 kV。即随着绝缘子表面粗糙度的增大绝缘子闪络电压逐渐降低。图7为50%放电电压与绝缘子平均表面粗糙度的关系图。

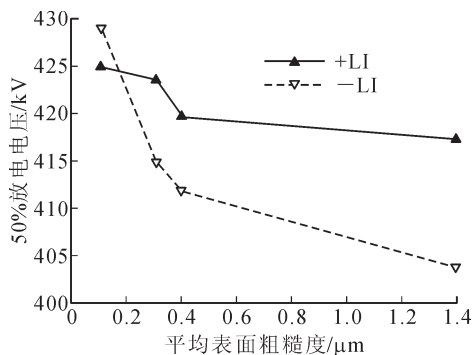


图7 绝缘子50%放电电压与平均表面粗糙度关系

Fig. 7 Relation between 50% discharge voltage and average surface roughness

从图7的统计分析可以看出,不论是在正极性还是负极性雷电冲击作用下,绝缘子的50%放电电压均随着表面粗糙度的增大而逐渐降低,该结果与部分国内外已有研究结果吻合^[4]。

为了探究绝缘子表面粗糙度与其对闪络电压影响程度的关系,定义系数 K 为

$$K = U/U_{\text{new}} \quad (1)$$

式(1)中: U_{new} 为未经砂纸打磨过的绝缘子即新绝缘子的闪络电压; U 为绝缘子经砂纸打磨过后的闪络电压。

在对数坐标下系数 K 与绝缘子平均表面粗糙度的关系见图8。

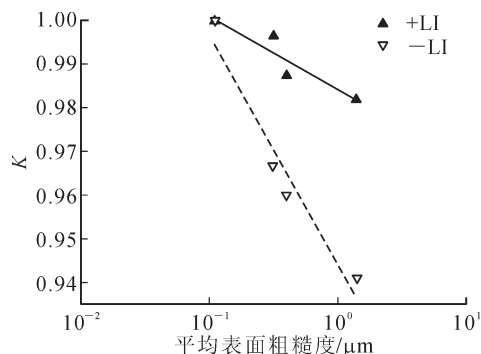


图8 系数 K 与平均表面粗糙度的关系

Fig. 8 Relation between K and average surface roughness

可以看出,不论是在正极性还是负极性雷电冲击作用下,系数 K 在对数坐标下均与绝缘子平均表面粗糙度近似呈线性关系。

对于绝缘子表面粗糙度增大闪络电压降低这种现象,可以考虑从绝缘子的表面吸附能力上来解释。由于原子间化学键产生的强结合力和分子间范德华力的存在,绝缘子表面会吸附很多带电粒子。通常材料的表面积越大所吸附的各种原子和分子也会越多。而当绝缘子表面粗糙度增大时,不平整程度增高,相当于间接地增大了绝缘子表面积,这就会使绝缘子表面吸附更多带电粒子。带电粒子的增多使电子在形成电子崩时碰撞增多,即形成电子崩所需电子数减少,从而使得绝缘子的沿面闪络电压降低。

2.2 导电微粒附着位置对绝缘子冲击闪络特性的影响

实验观察到绝缘子表面固定钢针后闪络往往发生在钢针处,闪络痕迹会贯穿钢针并在绝缘子表面形成明显的闪络痕迹。附着钢针后绝缘子的沿面闪络电压明显降低,且出现闪络后绝缘能力迅速下降,这也说明绝缘子表面附着导电微粒会对GIS的安全运行带来巨大隐患。

图9为不同微粒附着位置下绝缘子的闪络电压(气压 $P=0.1\text{ MPa}$),为方便对比,图9中还给出了正常绝缘子的闪络电压。由图9可知,正常绝缘子的闪络电压最高,随着微粒附着位置距高压电极的距离减小,绝缘子闪络电压降低。附着微粒位于近高压电极侧($x=8\text{ mm}$)时,绝缘子闪络电压最低,这表明位于近高压电极侧的金属微粒对绝缘子威胁最大。

绝缘子表面金属导电微粒会引起局部电场集中,并导致绝缘子表面积聚大量电荷,降低闪络电压。金属导电微粒附近 SF_6 气体在高场强下发生局

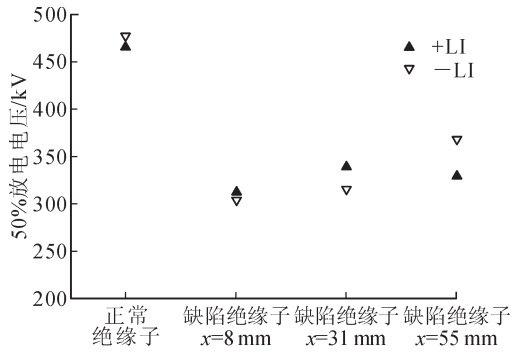


图9 不同微粒附着位置下缺陷绝缘子 50%
放电电压($P=0.1$ MPa)

Fig. 9 50% discharge voltage of insulators with conductive particle attached to different positions($P=0.1$ MPa)

部放电或电晕放电,放电产生的正、负带电粒子在绝缘子表面法向场强作用下运动到绝缘子表面,引起电荷积聚。绝缘子与 SF_6 气体分界面因法向电场分量形成的表面电荷,可由 Maxwell 方程组求得。图 10 为绝缘子与 SF_6 气体分界面示意图及相应的基本参量。

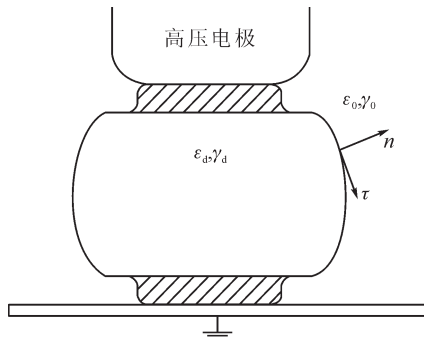


图 10 介质分界面处场量示意图

Fig. 10 Field quantities at the interface of solid and gaseous dielectrics

根据 Maxwell 方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \sigma \\ D = \epsilon E \\ \nabla \cdot J + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \\ J = \gamma E \end{cases} \quad (2)$$

结合电场在不同介质分界面的衔接条件,可得

$$\begin{cases} \epsilon_0 E_{n0} - \epsilon_d E_{nd} = \sigma \\ \gamma_0 E_{n0} - \gamma_d E_{nd} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

消除式(3)中的 E_{nd} ,可得绝缘子表面电荷分布规律

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\gamma_d}{\epsilon_d} = \frac{\epsilon_0 \gamma_d}{\epsilon_d} E_{n0} - \gamma_0 E_{n0} \quad (4)$$

式(2)-(4)中: n 代表分界面场量的法向分量; σ

和 γ 分别为介质表面电荷密度和介质电导率。当表面电荷分布达到稳态时,其电荷密度为

$$\sigma = E_{n0}(\epsilon_0 \gamma_d - \epsilon_d \gamma_0) / \gamma_d \quad (5)$$

式(5)表明,只要电场在交界面上存在法向分量,同时 $\epsilon_0 \gamma_d \neq \epsilon_d \gamma_0$,界面就一定有电荷积聚。且电荷分布到达稳态时电荷密度与介质分界面处电场强度法向分量成正比^[22]。

为解释导电微粒附着位置不同对闪络电压造成不同程度影响的原因,采用有限元分析软件计算得到了 72.5 kV 正常支撑绝缘子和附着微粒绝缘子的表面电场分布情况,见图 11-14。计算时,在高压导体施加 1 000 kV 的电压。

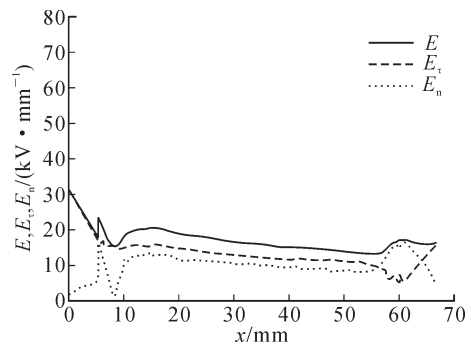


图 11 正常支撑绝缘子表面场强分布

Fig. 11 Electric field intensity distribution along surface of the insulator without conductive particle

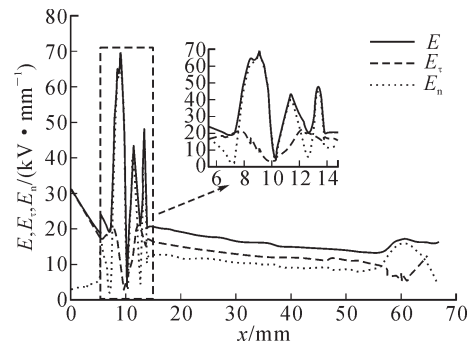
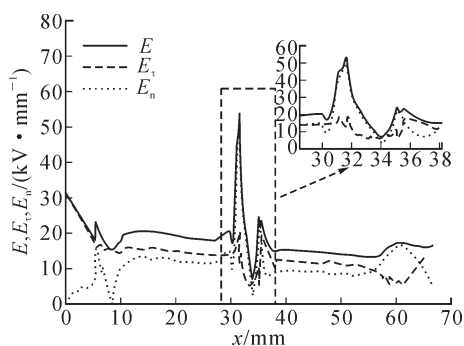
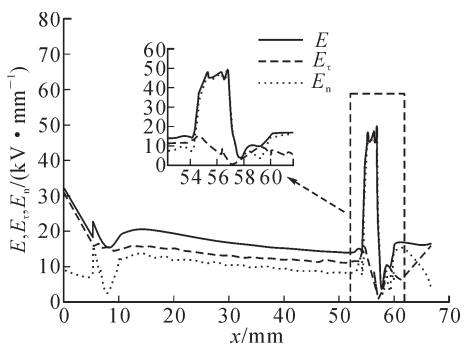


图 12 缺陷($x=8$ mm)支撑绝缘子表面场强分布

Fig. 12 Electric field intensity distribution along surface of the insulator with conductive particle at $x=8$ mm

图 11 表明,正常支撑绝缘子表面场强分布比较均匀。当绝缘子表面附着 4 mm 金属微粒时,微粒附近电场会出现畸变,合成场强和法向场强均急剧增大,因此缺陷绝缘子闪络电压较正常绝缘子均有不同程度的降低。

由图 12-14 可知,微粒附近主要为法向场强分量,切向场强分量相对较小。因此,微粒附近将积聚起大量表面电荷,导致绝缘子闪络电压较正常绝缘子急剧下降。此外,附着微粒越接近高压电极,其附近的最大合成场强和最大法向场强越大,由式(5)知绝缘子表面电荷积聚越严重,因此闪络电压越低。图

图 13 缺陷($x=31$ mm)支撑绝缘子表面场强分布Fig. 13 Electric field intensity distribution along surface of the insulator with conductive particle at $x=31$ mm图 14 缺陷($x=55$ mm)支撑绝缘子表面场强分布Fig. 14 Electric field intensity distribution along surface of the insulator with conductive particle at $x=55$ mm

9的实验结果也验证了该观点。

3 结论

文中研究了雷电冲击下绝缘子表面状况对其闪络特性的影响,得到以下结论:

1)绝缘子沿面闪络电压随表面粗糙度的增大而降低,可从绝缘子表面吸附能力的角度对其进行解释。

2)导电微粒附着位置距高压电极越近,绝缘子闪络电压越低,即越靠近高压电极的导电微粒对绝缘子威胁越大。从导电微粒附着位置对绝缘子沿面电场的影响上对该现象进行了分析。

参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.
- [2] CHRISTOPHOROU L G, OLTHOFF J K, VANBRUNT R J. Sulfur hexafluoride and the electric power industry[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(5): 20-24.

- [3] 马林阳,张祥全,李云阁,等. 750 kV GIS 支柱绝缘子故障分析[J]. 电网与清洁能源, 2009(12): 33-35.
MA linyang, ZHANG Xiangquan, LI Yunge, et al. Fault analysis of the 750 kV GIS supporting insulators[J]. Power System and Clean Energy, 2009(12): 33-35.
- [4] MITRA A, ASOKAN T, SUDARSHAN T S. Surface flashover performance of chemically etched polycrystalline alumina [C]//Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1993: 318-323.
- [5] 田杰,于开坤,郑楠,等. 表面粗糙处理对可加工陶瓷冲击闪络特性研究[J]. 绝缘材料, 2009(6): 61-63.
TIAN Jie, YU Kaikun, ZHENG Nan et al. The influence of surface roughness treatment on the impulse characteristic of machinable insulation material[J]. Insulating Materials, 2009(6): 61-63.
- [6] SUNDARA R J, DWARAKANATH K, MOORCHING S N. Investigations on correlation between surface flashover and surface roughness of insulating spacers[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1998: 472-475.
- [7] YAMAMOTO O, TAKUMA T, FUKUDA M, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 550-556.
- [8] SMITH J D, HATFIELD L L. Measurement of the effects of surface roughness on flashover[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1988: 47-52.
- [9] KAWAI H, MATSUURA H, MICHIZONO S, et al. Effect of surface processing on the secondary electron yield of alumina ceramic[J]. Vacuum, 1993(36): 257-259.
- [10] GRAY E W, HARRINGTON D J. Surface topography of printed wiring boards and its effect on flashover[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1982, CHMT-5(1): 142-146.
- [11] 郑楠,于开坤,刘国清,等. 表面粗糙度对绝缘材料真空闪络特性的影响[J]. 电工电能新技术, 2009(2): 33-36.
ZHENG Nan, YU Kaikun, LIU Guoqing, et al. The influence of surface roughness on flashover characteristics of insulating materials in vacuum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009(2): 33-36.
- [12] BOMMAKANTI R G, SUDARSHAN T S. Influence of mechanical grinding and polishing operations of brittle polycrystalline on the pulsed surface flashover performance[J]. J. Appl. Phys., 1990(67): 6991-6007.
- [13] HAMA A. Streamer to leader transition of surface discharge under impulse voltage in SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2394-2395.
- [14] OKABE S, YOROZUYA T, ENDO F, et al. Voltage-time characteristics for steep-front impulse voltages of particle-

- contaminated spacers in SF₆ gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3):1232-1238.
- [15] RAO M V G, KUMAR G V N, AMARNATH J, et al. Simulation of particle trajectories in a three phase common enclosure gas insulated busduct with monte carlo technique[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]: IEEE, 2008:594-597.
- [16] WATANABE K, YOSHIDA M, KON H, 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.
- [17] PILLAI A S, HACKAM R. Optimal electrode-solid insulator geometry with accumulated surface charges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984(4):321-331.
- [18] 陈 济. 导电颗粒对绝缘子表面电场和电荷积聚影响的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2006.
CHEN Ji. Study on the influences of conducting particles on surface electric fields and surface charge accumulation of insulator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [19] MAZUREK B, CROSS J D, HEESWIJK R G, et al. The effect of a metallic particle near a spacer on flashover phenomena in SF₆[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(2):219-229.
- [20] 李岩松, 李世延, 仇仔来, 等. 绝缘子表面固定金属颗粒放电特性研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(15):33-36.
LI Yansong, LI Shiyan, QIU Zilai, et al. Study on discharge characteristics of fixed metal particles on GIS insulator surface[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(15):33-36.
- [21] QI B, LI CR, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3):792-800.
- [22] 汪 枫, 邱毓昌, 张乔根, 等. 气—固交界面绝缘子表面电荷的观测与分析[J]. 绝缘材料, 2002(4):37-40.
WANG Feng, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. Observation and analysis of surface charge accumulation at the gas-solid interface of insulator[J]. Insulating Materials, 2002(4):37-40.
- 马径坦(1993—), 男, 西安交通大学电气工程学院博士研究生在读, 主要从事高电压绝缘技术研究工作。
-
- (上接第 62 页)
- transient enclosure voltage in GIS [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [18] 张志远. GIS 开关操作对电子式互感器的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Zhiyuan. Research on the influence of GIS switching operation on electric transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] DICK E P, FUJIMOTO N. Transient ground potential rise in gas-insulated substations-problem identification and mitigation[J]. IEEE Transactions on PA& S, 1982, 101(10):3610-3615.
- [20] 冯利民, 王晓波, 姜 欣, 等. 超高压变电站 GIS 电磁兼容建模研究[J]. 高压电器, 2014, 50(4):97-102.
FENG Limin, WANG Xiaobo, JIANG Xin, et al. Research on the EMC modeling within the GIS in the EHV substations[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4):97-102.
- [21] 钟连宏, 贺景亮. GIS 暂态地电位升高的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 26(6):43-45.
ZHONG Lianhong, HE Jingliang. The calculation and analysis of transient grounding potential rise in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2009, 26(6):43-45.
- [22] 徐 迪, 苏 光. GIS 中快速暂态过程对罗氏线圈型有源电子式互感器影响的分析[J]. 电力电气, 2011, 30(21):48-55.
XU Di, SU Guang. The analysis of the effect of the fast transient process in the GIS on the active electronic transformer of the Rogowski[J]. Electric Power, 2011, 30(21):48-55.
- 白世军(1981—), 男, 西安交通大学电气工程学院在职博士研究生, 获得中国机械工业科学技术奖二等奖 1 项、中国专利优秀奖 1 项、出版专著 1 部(副主编)。主要研究方向为智能变电站电磁兼容、电子式互感器及电力设备故障诊断与状态评估。
- 荣命哲(1963—), 男, 担任西安交通大学委员会委员, 常委, 副校长, 电气工程学院教授, 博士生导师。国家自然科学基金委创新群体带头人, 973 首席科学家, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 国务院电气工程学科评议组成员。1984、1987、1990 年于西安交通大学电气工程学科分获工学学士、硕士和博士学位。主要围绕电力开关设备基础理论、优化设计和运行状态监测与寿命评估三个层次展开研究工作。