

自然污秽成分 CaSO_4 对电力设备外绝缘沿面绝缘特性的影响综述

李恒真, 刘刚, 李立涅

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

A Review on Influence of Natural Contaminant CaSO_4 on Surface Insulation Characteristics of External Insulation of Power Equipment

LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: To research main components of contaminants on the surface of external insulation of power equipment in depth, the authors investigate and survey research results related to CaSO_4 home and abroad. The source and enrichment of CaSO_4 , its influences on the measurement of contaminants and pollution flashover voltage as well as the influences of the changes of CaSO_4 in contaminant contents on anti-contamination situation are discussed and analyzed, and the conclusions are as following: CaSO_4 originates from coal-smoke air pollution and is enriched on insulator surface a certain extent. The property of CaSO_4 that it is a kind of slightly soluble substance with higher flashover voltage leads to contrafactual high value of equivalent salt deposit density measured by traditional methods, and it makes artificial contamination flashover voltage unrealistically low; however artificial contamination flashover voltage is further decreased due to the difference of CaSO_4 content in natural contaminants and artificial contaminants. In the future, the status of CaSO_4 in the principal contaminant components of power equipment external insulation would be displaced by nitrate and it leads to a more serious antipollution condition.

KEY WORDS: CaSO_4 ; source; enrichment; contamination measurement; pollution flashover voltage; principal contamination component; external insulation

摘要: 为对电力外绝缘表面污秽主要成分进行深入研究, 调研了国内外关于 CaSO_4 成分的相关研究。从 CaSO_4 的来源、富集、其对污秽测量和污闪电压的影响, 以及其在污秽中含量的变化对防污形势的影响几个方面进行探讨。最终认为 CaSO_4 主要来源于煤烟型大气污染, 在绝缘子表面有一定

的富集作用。 CaSO_4 为微溶物且闪络电压较高, 会导致传统方法测量自然污秽的等值盐密虚高, 导致人工污秽闪络电压偏低; 而自然污秽和人工污秽的 CaSO_4 含量差异进一步降低了人工污秽闪络电压。将来, CaSO_4 作为电力外绝缘污秽中主要成分的地位可能被硝酸盐所取代, 并导致更为严峻的防污形势。

关键词: 硫酸钙; 来源; 富集; 污秽测量; 污闪电压; 主要污秽成分; 外绝缘

0 引言

防污工作通常以污秽度测量和污闪机制为基础。通过污秽度测量可确定污区等级, 从而指导外绝缘设计、改造、运行维护等工作; 通过研究污闪机制, 制定新的防污措施, 可提高防污能力。近年来, 随着外绝缘设计水平和运行维护水平的不断提高, 复合绝缘子和持久性就地成型防污闪复合涂料(permanent-room-temperature-vulcanized anti-contamination flashover composite coating, PRTV) 的被广泛采用, 我国输电线路的污闪事故得到有效遏制。然而, 大规模区域性污闪事故仍然时有发生, 特别是 110 kV 及以下电压等级的线路污闪还比较严重。污闪事故数在电网事故总数中已占第 2 位, 仅次于雷害事故, 但污闪事故造成的损失却是雷害事故的 10 倍^[1-7], 可见污闪研究极其重要, 需要在更高层面上开展工作。

国内外学者分别从污秽的来源与扩散、污闪机制及其影响因素、污秽度测量等方面进行研究^[7-12]; 发现因污秽成分差异, 使用等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)评估污秽度存在诸多不足, 人工污秽的污闪电压(U_f)比自然污秽偏低等^[9-16]。换

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB7-24507)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724507).

言之,因污秽成分差异,使用ESDD评估的污秽度与实际污秽度之间存在的巨大差异,致使外绝缘设计和日常运行维护工作的实际效果不理想,甚至造成大量人力物力浪费;对污闪机制的研究也受到人工污秽成分单一的影响,未能研究自然污秽中各种成分的不同污闪特征和机制。对污闪机制的研究不足,致使现有的防污产品不能满足实际运行的需求。目前,国内外学者认识到污秽成分相关研究在防污工作中的重要地位,并已将附灰密度(non-soluble material deposit density, NSDD)作为评估污秽等级的定量参数^[17]。

目前,国内外公认的电力外绝缘污秽成分中,可溶性污秽成分的比重由高到低依次为CaSO₄和CaCO₃(40%~90%)、NaCl(10%~40%)、NaNO₃和KNO₃(10%~40%);不可溶性污秽成分的比重由高到低依次为SiO₂(20%~60%)、C(10%~40%)、Al₂O₃(7%~15%)、Fe₂O₃(3%~8%)、CaO(2%~5%)^[6,14,18-21]。CaSO₄是电力外绝缘污秽成分中比重最大的成分,对CaSO₄的测量及其对污闪电压的影响等方面存在一些争议。本文将从电力外绝缘表面污秽中CaSO₄的来源、富集,其对污秽测量和污闪电压的影响,以及其在污秽中含量的变化对防污形势的影响几个方面做些探讨,以供参考。

1 污秽中CaSO₄的来源和富集

1.1 CaSO₄的来源

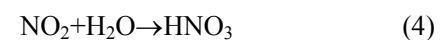
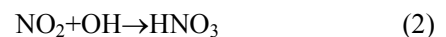
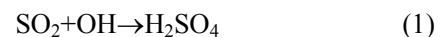
在我国能源构成中,燃烧化石燃料占到73%,致使大气污染属于煤烟型污染,其主要污染物包含SO₂、NO_x和粉煤灰。粉煤灰又称飞灰,主要含SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、α-石英、方解石(主要成分CaCO₃)、钙长石(主要成分CaAl₂Si₂O₈)、CaSiO₃^[15,22-23]。对比电力外绝缘污秽和煤烟污染物的主要成分可知,除NaCl以外,煤烟污染物直接含有或者可通过化学反应生成污秽中的所有主要成分,可见我国电力外绝缘污秽主要成分与我国煤烟型大气污染直接有关。

电力外绝缘污秽中的CaSO₄并非煤烟污染的直接产物,而是由煤烟污染物中的SO₂、CaCO₃以及少量地表扬尘中的CaCO₃,经过一系列复杂的物理化学反应生成。通常认为SO₂在一定条件下发生一系列氧化反应生成H₂SO₄,H₂SO₄再与CaCO₃反应生成CaSO₄。

大气中常见酸性气体有SO₂和NO_x。在气相条

件下,SO₂、NO_x可与OH自由基反应转化成H₂SO₄及HNO₃,如式(1)~(2)所示,转化速率取决于大气中SO₂、NO₂和OH自由基的浓度。有研究表明,SO₂的转化速率为每小时0.7%(夏季条件)~0.12%(冬季条件)之间;NO_x的转化率为每小时6.2%(夏季条件)~1.1%(冬季条件)之间,大气中SO₂的转化速率远小于NO_x的转化速率。在相同条件下,SO₂可远距离扩散,造成更大范围的污染;而NO_x无法远距离扩散,只能造成污染源附近的污染^[23]。

当大气中水汽丰富时,空气中可以产生大量的小液滴,为酸性气体的反应提供了液相条件。在此条件下,SO₂和NO_x通过式(3)~(4)所示的反应转化成H₂SO₄和HNO₃,转化速率很高。但是一次大气污染物中NO_x主要以NO的形态存在,NO₂通常只有5%左右。没有光化学作用时,NO转化为NO₂几乎无法完成^[23]。经过上述氧化反应生成的H₂SO₄,再与CaCO₃反应即可生成CaSO₄,如式(5)所示。



发生上述反应的媒介有2种:1)在大气中发生一系列物理化学反应,生成CaSO₄沉积在电力外绝缘表面;2)H₂SO₄以酸雨、酸雾等酸性降水的形式沉降到电力外绝缘表面,与污秽中的CaO、CaCO₃发生反应生成CaSO₄^[22]。有研究发现,相同条件下,外伞型绝缘子表面污秽中,CaO的比重高于防污型绝缘子;而CaSO₄的比重低于防污型绝缘子^[24]。分析认为,外伞型绝缘子表面暴露面积较大,较容易受到酸性降水的湿润,有利于CaSO₄的生成;而防污型绝缘子下表面的深沟槽,较难受到酸性降水的湿润,不利于CaSO₄的生成。通常将上述硫化物经过一系列氧化反应,生成硫酸和硫酸盐的过程称为硫酸盐化速率v_{SR}。在一定条件下,可用v_{SR}表征电力外绝缘表面硫酸盐的积累速率。

1.2 CaSO₄的富集

通常认为,电力外绝缘表面污秽主要还是来自大气自然沉降物,因此可认为CaSO₄和CaCO₃在两者之中的比重应大致相当。然而电力外绝缘表面污秽中CaSO₄和CaCO₃的比重分布在40%~90%之间,分析认为大气自然沉降物中,CaSO₄和CaCO₃的比重应该在40%左右,即电力外绝缘污秽中CaSO₄

和 CaCO_3 比重的最低值。有研究表明，大气总悬浮颗粒物中 CaSO_4 的含量不高，除易溶性盐以外，其他所有盐之和仅占污秽总量的 38%~50%^[25]。因此，电力外绝缘污秽中的 CaSO_4 和 CaCO_3 的比重是通过一定的富集作用才高达 90%，可能存在的富集作用有如下 3 个方面。

1) 通常化学反应向着溶液中离子浓度降低的方向发展，而 CaSO_4 和 CaCO_3 都是溶解度非常低的难溶性盐。在电力外绝缘表面溶液的化学反应中，最终也会生成 CaSO_4 和 CaCO_3 。 CaSO_4 和 CaCO_3 之间的比重与当地的硫酸盐化速率有关，当地的硫酸盐化速率越高， CaSO_4 的比重也就越高。

2) 在电力外绝缘表面可溶性盐中，只有 CaSO_4 和 CaCO_3 是溶解度非常低的难溶性盐，其他盐 (NaCl 、 NaNO_3 、 KNO_3 等) 都是溶解度非常高的易溶性盐。在自然降水时，少量降水即可将易溶性盐溶解冲刷掉，而 CaSO_4 和 CaCO_3 只能被溶解冲刷掉极小的一部分。

3) 硫酸盐化速率的条件。硫酸盐化速率不仅与 SO_2 污染物的浓度有关，还与太阳辐射的强度和有关。分析认为硫酸盐化速率不仅需要 SO_2 污染物作为氧化反应的材料，还需要一定的能量推动氧化反应的进行。在电力系统中，常见电晕放电、滑闪放电、局部放电等形式的放电现象，可以释放出大量的热能、光能等形式的能量，同样可以促进硫酸盐化速率，反应生成更多的硫酸和硫酸盐。

上述关于 CaSO_4 和 CaCO_3 富集的相关理论尚属推论，还需要相关试验的验证。

2 硫酸钙对污秽测量和污闪电压的影响

2.1 硫酸钙对污秽测量的影响

在电力外绝缘污秽评估中，评估可溶性污秽，普遍使用的方法是测量污秽的等值盐密。具体方法为测量污秽溶液电导率，换算成相同电导率时电力外绝缘表面附着 NaCl 的密度。研究普遍发现，单片标准盘式电力外绝缘表面饱和附水量为 10~20 mL，仅能溶解少量难溶性盐。而测量 ESDD 时单片盘式绝缘子的用水量通常不少于 300 mL，可使污秽中难溶性盐(主要为 CaSO_4)大量溶解电离，致使测量所得的 ESDD 偏高^[13-16]。因此，有研究提出使用污秽中 CaSO_4 的质量分数，即 CaSO_4 在 10 mL 左右 ESDD 溶液中的实际贡献量、污秽中 CaSO_4 与 NaCl 的比值等参数修正 ESDD，以得到电力外

绝缘表面的实际污秽度^[14,18,26]。

通常认为在 ESDD 的测量过程中，使用大量水可将污染中的可溶性盐(简称盐)完全溶解，然后以测量电导率的方式测量污秽中盐的总量。即认为盐的溶解和电离是一个过程，而实际上盐的溶解和电离是 2 个不同的过程。通常将溶解电离平衡后的盐溶液中，电离成离子的分子数 n 与溶解的分子总数 N 之比定义为电离度 α ， α 接近于 1 的物质是强电解质， α 小于 1 是弱电解质。溶液中的弱电解质不能完全电离，部分以分子形式存在。从溶解电离的角度分析，即使使用大量水来测量 ESDD，也无法有效测量污秽中盐的总量。现场运行时，因电力外绝缘表面附水量的限制，只有高溶解性盐和部分 CaSO_4 能够溶解导电。当污秽中 CaSO_4 的比重过大时，未能溶解导电的 CaSO_4 只能表现出不溶物(NSDD)的吸水保水作用。因此，为更为合理地表述 CaSO_4 等难溶性盐对 ESDD 和 NSDD 的贡献率，建议使用电力外绝缘表面的饱和附水量测量 ESDD。

通常认为溶液的总电导率，等于各种盐产生电导率的线性叠加，实际上并非如此。从离子平衡的角度分析，弱电解质的溶解电离是一个可逆的过程。离子间的一些相互作用可消耗部分离子，促进电离反应的发展。 Ca^{2+} 或者 SO_4^{2-} 的消耗可以促进溶解的 CaSO_4 分子电离成离子，进而促使未溶解的 CaSO_4 溶解；反之亦然^[27]。从离子活性系数的角度分析，溶解电离受到共存离子的影响。溶解度与离子的平均活性系数呈负相关特性；外加离子可显著降低离子的平均活性系数。换言之，随着溶液中外加离子量的增加，盐的溶解度将随之增加。以 CaSO_4 和 NaCl 为例，如图 1 所示， CaSO_4 的溶解度随着 NaCl 浓度的升高而增加^[16]。因此，由于弱电解质溶解电离的复杂过程和离子间的相互作用，溶液的总电导率通常大于各种盐各自产生电导率的线性的贡献量计算有效 ESDD 的方法存在一定问题，有叠加。即因 CaSO_4 的存在，使用各种盐各自对 ESDD

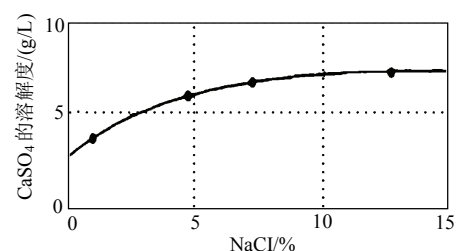


图 1 共存离子对溶解度的影响^[16]

Fig. 1 Influence of co-existing ion on solubility^[16]

效的 ESDD 还应基于实际测量。

2.2 硫酸钙对污闪电压的影响

在人工污秽闪络试验中,使用易溶性 NaCl 和难溶性 CaSO₄ 组成的污秽。在相同 ESDD 时(水量充足时电导率相同),50%闪络电压 $U_{150\%}$ 随着 CaSO₄ 比例的增加而升高^[28-29],如图 2 所示。分析认为难溶性 CaSO₄,在污秽层少量水分的条件下未能完全溶解电离产生水量充足条件下才能产生的电导率。人工污秽层电导率主要由易溶性 NaCl 溶解电离提供,当污秽中 NaCl 比例降低时,污秽层电导率降低,闪络电压 U_f 升高。

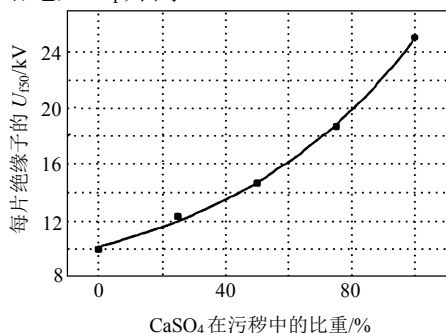
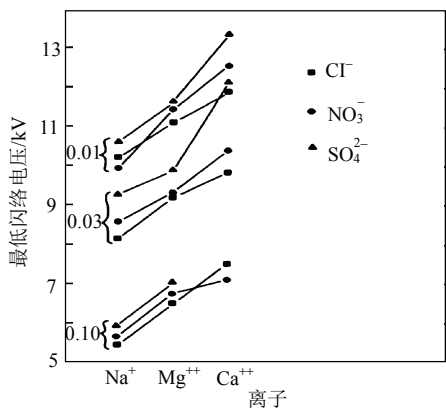


图 2 CaSO₄+NaCl 涂污盘式绝缘子的 $U_{150\%}$ ^[28]

Fig. 2 $U_{150\%}$ of disc insulator with contamination of CaSO₄+NaCl^[28]

CaSO₄ 对污闪电压的影响既表现在 CaSO₄ 的溶解电离特性方面,还表现在 CaSO₄ 溶解电离产生的载流子 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的质量和体积方面。

通常离子质量越大,相同电场力作用下离子的运动速度越慢,电导率越小;离子体积越大,相同浓度时离子碰撞的概率越高,碰撞会造成离子的平均运动速度变慢,电导率也变小。离子的分子量越大质量越大;离子的原子数越多体积越大;离子的原子数量相同时,分子量越大体积越大。无论质量还是体积,阴离子 $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$; 阳离子 $Ca^{2+} >$



图中“0.01、0.03、0.10”表示等值盐密, mg/cm²。

图 3 阴阳离子对最低污秽闪络电压的影响^[20,30]

Fig. 3 Influence of ion on lowest flashover overvoltage^[20,30]

$Mg^{2+} > Na^+$ 。由图 3 所示试验可知,最低闪络电压是 $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$, $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$, 对应的导电率是 $SO_4^{2-} < NO_3^- < Cl^-$, $Ca^{2+} < Mg^{2+} < Na^+$, 完全符合离子质量越大体积越大,导电率越低的理论。换言之,因 CaSO₄ 溶解电离产生的载流子 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的质量和体积与其他载流子的相比较较大, CaSO₄ 的最低闪络电压较高。

3 硫酸钙含量的变化对防污形势的影响

如果电力外绝缘的污秽成分与我国煤烟型大气污染直接相关,随着时间变迁和地点转移,大气污染成分变化时,电力外绝缘污秽的主要成分也将随之变化。为验证以上推论,调研了多个国家和地区电力外绝缘污秽的主要成分,发现美国某地区污秽中硝酸盐的比重超过 50%,已成为主要成分^[31],分析认为与当地的工业污染排放物有关;沙特阿拉伯某沙漠地区污秽中 CaCO₃ 为主要成分^[32],分析认为与沙漠的风沙扬尘有关。因此,可认为电力外绝缘污秽的主要成分可随大气污染成分的变化而变化。随着我国水能、风能、核能等清洁能源在能源结构中比例的增加,燃煤脱硫,全社会节能减排等工作的实现,SO₂ 排放量将逐渐减少,电力外绝缘表面污秽中 CaSO₄ 的比重也将随之减少。随着汽车工业的不断发展,汽车尾气(主要污染物为 NO_x)排放量将逐年增加,电力外绝缘表面污秽中硝酸盐的比重也将随之增加。

如前文所述,因 NO_x 的转化速率远大于 SO₂ 的转化速率,在相同条件下,NO_x 无法远距离扩散,只能造成污染源附近的污染,而 SO₂ 可以远距离扩散,造成更大范围的污染。且硝酸盐通常都是溶解度非常高的易溶性盐,在电力外绝缘表面的富集特性远没有 CaSO₄ 显著,单位数量硝酸盐的重量也仅为 CaSO₄ 的 50%左右。全国范围内电力外绝缘表面的污秽总重量将普遍显著减少,而 ESDD 未必减少;在公路沿线工业区等局部 NO_x 直接污染区域,电力外绝缘表面的污秽总重量将略有减少,而 ESDD 将显著增加。随着 CaSO₄ 在电力外绝缘表面污秽中比重的减少,ESDD 将更能有效地表征电力外绝缘表面的实际污秽度,ESDD 与污秽闪络电压 U_f 将有更好的相关性。

有研究发现,硝酸盐不仅易溶解易导电,产生比 CaSO₄ 低的污秽闪络电压 U_f ; 还会对绝缘子产生较强的机械破坏。在相同 ESDD 的平板模型

上, NaCl 局部电弧通常持续 0.5 s, 有时持续 1 s; CaCl_2 通常持续 50~100 ms; 硝酸盐比较极端, 有些能够持续 0.5 min, 并在玻璃绝缘子和瓷绝缘子表面产生电树裂痕^[33]。因此, 公路沿线工业区等局部 NO_x 直接污染区域, 将来可能面临更为严峻的防污形势。

4 结论

1) 我国电力外绝缘污秽主要成分与我国煤烟型大气污染直接有关。

2) 电力外绝缘污秽中的 CaSO_4 是由煤烟污染物中的 SO_2 、 CaCO_3 , 在大气提供的气相和液相条件下经过一系列氧化反应生成 H_2SO_4 , 再进一步在大气中或者绝缘子表面反应生成。

3) 电力外绝缘污秽中的 CaSO_4 和 CaCO_3 的比重可以高达 90%, 必然需要一定的富集作用。分析认为可能存在 3 种富集作用: ① CaSO_4 为难溶性盐, 有利于化学反应向生成 CaSO_4 的方向发展; ② CaSO_4 为难溶性盐, 相对于其他易溶性盐而言, CaSO_4 的自然降雨冲刷效果差; ③硫酸盐化速率需要一定的能量, 而电力系统的放电现象可通过上述能量, 促进硫酸盐化速率。

4) CaSO_4 为难溶性盐, 即使使用大量水也无法将其全部溶解, 无法使用测量 ESDD 的方法测量污秽中的全部 CaSO_4 。在运行实际中, 在电力外绝缘表面有限水分的条件下, 未能溶解的 CaSO_4 担当了不溶物的作用。因此, 为能够更为有效地测量 ESDD 和 NSDD, 建议使用外绝缘表面的饱和附水量进行污秽度测量。

5) CaSO_4 对污闪电压的影响既表现在 CaSO_4 的溶解电离特性方面, 还表现在 CaSO_4 溶解电离产生的载流子 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的质量和体积方面。由于载流子的质量越大体积越大, 导电率越低, 而 CaSO_4 溶解电离产生的载流子 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的质量和体积相对于其他载流子都比较大, 使 CaSO_4 的最低闪络电压较高。

6) 随着清洁能源的广泛应用, 汽车尾气排放量增加, 未来硝酸盐可能代替 CaSO_4 成为绝缘子表面自然污秽的重要成分。届时由于 NO_x 的扩散性差和硝酸盐的特殊性质, 公路沿线工业区等局部 NO_x 直接污染区域, 将来可能面临更为严峻的防污形势。

参考文献

[1] 宿志一, 李庆峰. 我国电网防污闪措施的回顾和总结[J]. 电网技

术, 2010, 34(12): 124-130.

Su Zhiyi, Li Qingfeng. Historical review and summary on measures against pollution flashover occurred in power grids in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 124-130(in Chinese).

[2] 苑吉河, 蒋兴良, 张志劲, 等. 高海拔现场标准悬式绝缘子的交流污闪特性[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 54-57.

Yuan Jihe, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. AC pollution flashover performance of standard suspension insulators at high altitude sites[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 54-57(in Chinese).

[3] 范建斌, 黄志秋, 谢荣坤, 等. 直流输电线路 Y 型绝缘子串污闪特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 28-31.

Fan Jianbin, Huang Zhiqiu, Xie Rongkun, et al. Research on pollution flashover performance of Y-type of insulator strings used in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 28-31(in Chinese).

[4] 殷琼, 陈原. 高导电性降水降雪型快速积污导致的输变电设备污闪机理与防治措施[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 1-6.

Yin Qiong, Chen Yuan. Mechanism of pollution-flashover in power transmission and transformation equipments caused by rainfall or snowfall type high conductivity rapid contamination accumulation and its prevention measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 1-6(in Chinese).

[5] 苑吉河, 蒋兴良, 张志劲, 等. 高海拔现场标准悬式绝缘子的交流污闪特性[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 54-57.

Yuan Jihe, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. AC pollution flashover performance of standard suspension insulators at high altitude sites[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 54-57(in Chinese).

[6] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 35-40.

Zhang Zhijin, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Present situation and prospect of research on flashover characteristics of polluted insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 35-40(in Chinese).

[7] Li Hengzhen, Liu Gang, Liu Xiaodong. Discussion on the application of leakage current and optical sensor online monitoring equipments [C]/2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. IEEE, 2008: 85-88.

[8] 吉开俊. 大气质量指数在防污闪工作中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.

[9] Jolly D C, Poole C D. Flashover of contaminated insulators with cylindrical symmetry under DC conditions[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1979, 14(2): 77-84.

[10] Cheng T C, Wu C T, Kim Y B, et al. EPRI-HVDC insulator studies part ii laboratory simulation studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 200(2): 910-920.

[11] 陈宇强, 吴光亚, 田强, 等. 光谱法检测输变电设备盐密的实验室研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 57-58.

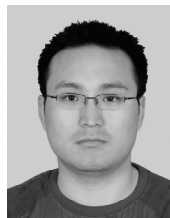
Chen Yuqiang, Wu Yaguang, Tian Qiang, et al. Investigation of salt density in substation and transmission line by optic spectrum in laboratory[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(5): 57-58(in Chinese).

[12] 万德春, 蔡炜, 宋伟, 等. 光技术盐密在线监测系统的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 33-35.

Wan Dechun, Cai Wei, Song Wei, et al. Investigation on ESDD on-line measurement system using optical technology[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 33-35(in Chinese).

[13] 钱茂华, 崔国顺, 关志成. 用局部表面电导率划分污秽等级[J]. 电瓷避雷器, 1994(6): 12-14.

- Qian Maohua, Cui Guoshun, Guan Zhicheng. Study on using the partial surface conductivity to evaluate contamination level [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 1994(6): 12-14(in Chinese).
- [14] 刘煜, 王少俊, 范立群. 硫酸钙对 ESDD 贡献的定量分析与验证 [J]. *高电压技术*, 2005, 31(2): 9-12.
- Liu Yu, Wang Shaojun, Fan Liqun. Quantitative analysis and verification on the contribution of CaSO_4 to equivalent salt deposit density [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(2): 9-12(in Chinese).
- [15] 张慧媛, 丁扬. 电网电瓷外绝缘子秽等级的确定 [J]. *华北电力大学学报*, 1997, 24(4): 24-29.
- Zhang Huiyuan, Ding Yang. Study on determining contamination levels of grid electric porcelain external insulation [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 1997, 24(4): 24-29(in Chinese).
- [16] Ramos N G, Campillo R M T, Naito K. A study on the characteristics of various conductive contaminants accumulated on high voltage insulators [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1993, 8(4): 1842-1850.
- [17] IEC60815-1—2002, Selection and dimensioning of high voltage for polluted conditions, part 1: definitions, information and general principles [S].
- [18] 宿志一. 换流站直流绝缘子自然积污特性与直交积污比 [C]//中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国电机工程学会, 2007: 281-290.
- [19] 阎东, 卢明, 张亚鹏. 500 kV 获仓线污闪故障分析 [J]. *高电压技术*, 2006, 32(10): 138-140.
- Yan Dong, Lu Ming, Zhang Yapeng. Analysis of pollution flashover fault on 500 kV Huochang transmission line [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(10): 138-140(in Chinese).
- [20] 关志成, 张仁豫, 薛家麒. 自然污秽可溶盐构成及其对污闪电压值的影响 [J]. *电瓷避雷器*, 1989(6): 13-18.
- Guan Zhicheng, Zhang Renyu, Xue Jialin. Study on the influence of soluble natural contamination on the voltage of contamination flashover [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 1989(6): 13-18(in Chinese).
- [21] 宿志一, 刘燕生. 我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较 [J]. *电网技术*, 2004, 28(10): 13-17.
- Su Zhiyi, Liu Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with dc and ac stress in northern China's inland areas [J]. *Power System Technology*, 2004, 28(10): 13-17(in Chinese).
- [22] Chrzan K. Conductivity of aqueous dust solutions [J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1987, 22(3): 241-244.
- [23] Seinfeld, John H. *Atmospheric chemistry and physics of air pollution* [M]. St.Louis: John Wiley&sons Inc, 1986: 49-62.
- [24] Zhou J G, Dong G, Imakoma T. Contamination performance of outer-rib type suspension insulators [C]//Asia Pacific, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Shanghai: IEEE/PES, 2002: 2185-2190.
- [25] 吉开俊. 大气质量指数在防污闪工作中的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [26] 张鹏, 贺智, 高锡明. 直流换流站隔离开关支柱绝缘子人工污秽试验 [J]. *高电压技术*, 2008, 34(8): 1774-1777.
- Zhang Peng, He Zhi, Gao Xinming. Study on the artificial pollution test of isolating switch insulator of DC converter station [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(8): 1774-1777(in Chinese).
- [27] 曹婉真, 夏又新. *电解质* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 71-75.
- [28] Zhang Fuzeng, Wang Liming, Guan Zhicheng. Investigation on DC flashover performance of porcelain insulators in high altitude areas [C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Shenzhen: IEEE, 2008: 72-376.
- [29] 张福增, 王黎明, 关志成. 高海拔地区大吨位绝缘子直流污闪特性研究 [J]. *高电压技术*, 2008, 34(6): 1089-1094.
- Zhang Fuzeng, Wang Liming, Guan Zhicheng. External insulation characteristic of ultra high voltage transmission line in high altitude area [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(6): 1089-1094(in Chinese).
- [30] Williams L J, Kim J H, Kim Y B. Contaminated insulators-chemical dependence of flashover voltages and salt migration [J]. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1974, 93(5): 1572-1580.
- [31] Cheng T C, Wu C T, Zedan F. EPRI-HVDC insulator studies part i field test at the sylmar HVDC converter station [J]. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1981, 100(2): 902-909.
- [32] Sulaiman A E, Iqbal Qureshi M. Effect of contamination on the leakage current of inland desert insulators [J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1984, 19(4): 332-339.
- [33] Cheng T C, Wu C T. Communications on the deleterious effects of nitrates on insulating surfaces under HVDC conditions [J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1979, 14(3): 171-174.



李恒真

收稿日期: 2010-11-15。

作者简介:

李恒真(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为电力设备外绝缘, E-mail: zidian_2008@foxmail.com;

刘刚(1969), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为基于物联网的高压智能电网、过电压及其防护、电力设备外绝缘;

李立涅(1941), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为直流输电关键技术、高压输电线路在线监测与故障诊断、电力系统过电压及其防护。

(责任编辑 马晓华)