

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.026

棒形悬式瓷绝缘子的覆冰交流闪络特性研究

贾会东¹, 郭海山², 贾瑞卿³, 吴磊¹

(1. 国网郑州市供电公司, 郑州 450000; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;
3. 河南国网宝泉抽水蓄能有限公司, 河南 新乡 453636)

摘要: 绝缘子覆冰闪络事故严重危害着输电线路的运行安全。为了研究影响棒形悬式瓷绝缘子覆冰交流闪络特性的因素,文中在人工气候室内对棒形悬式瓷绝缘子进行了带电和不带电的人工覆冰试验以及交流闪络试验,研究了表面覆冰程度、盐密污秽度和覆冰水电导率对绝缘子闪络特性的影响,试验中使用高速摄影机对放电电弧的发展过程进行检测,并用示波器记录泄露电流和闪络电压。结果表明:带电覆冰和不带电覆冰导致绝缘子表面覆冰程度不同,对其冰闪特性具有显著的影响;局部放电的初始位置和电弧的发展过程具有不同的特点而且在电弧发展到完全贯穿绝缘子表面前,在相同的试验电压下带电覆冰绝缘子的泄露电流比不带电覆冰绝缘子的泄漏电流大;棒形悬式瓷绝缘子覆冰闪络电压随盐密污秽度和覆冰水电导率的增大而降低,且相同盐密污秽度下带电覆冰绝缘子的闪络电压高于不带电覆冰绝缘子的闪络电压。研究结果可为输电线路绝缘子选型以及防冰减灾等,提供试验依据和技术参考。

关键词: 棒形悬式瓷绝缘子; 带电覆冰; 不带电覆冰; 交流闪络; 盐密污秽度; 覆冰水电导率

Study on AC Flashover Characteristics of Icing Long-rod Porcelain Insulators

JIA Huidong¹, GUO Haishan², JIA Ruiqing³, WU Lei¹

(1. State Grid Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China;
2. State Key Labor of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Grid Henan Baoguan Pumped Storage Company Limited, Henan Xinxiang 453636, China)

Abstract: The flashover of icing insulator string is one of the severe problems for transmission lines. To study the factors that influence the flashover characteristics of icing porcelain long rod insulator, the artificial icing and AC flashover tests are carried out on long-rod porcelain Insulator de-energized and energized in artificial climate chamber. And the influence of the flashover characteristics on the icing morphology, the equivalent salt deposit density (ESDD), and the icing water conductivity are also explored. The process of flashover is recorded by a high-speed digital camera and the leakage current and flashover voltage are recorded by the Oscilloscope. The test results indicate that the icing morphology makes the initial position and development of the arc different. And at the same voltage the leakage current of the energized icing insulator is higher than that of de-energized icing insulator. The flashover voltages almost decrease with the increase of ESDD and the icing water conductivity. In the meantime, the flashover voltage of the energized icing insulator is higher than that of icing de-energized energized icing insulator. The research results can provide foundation of examination and technical reference for the selection of insulators for transmission lines and anti-icing and disaster reduction.

Key words: long rod porcelain insulator; energized icing; de-energized icing; AC flashover; ESDD; icing water conductivity

0 引言

近年来,输电线路覆冰闪络事故频发,特别是

2008年中国南方雪灾,大范围低温、雨雪、冰冻等自然灾害导致了电网多处发生严重的覆冰事故,如:倒塔、断线、绝缘子闪络,严重威胁电力系统的安全运行,也给国民的生产、生活带来巨大的损失^[1-4]。据统计,在覆冰事故类型中,绝缘子冰闪占到了整

个事故总数的58%^[5],所以对绝缘子覆冰引起的闪络事故应给予足够的重视。

自20世纪30年代起,很多学者就开始对输电线路覆冰进行试验研究,并在输电线路覆冰的机理、形成的条件、覆冰绝缘子串的闪络特性等^[6-17]方面取得大量成果。结果表明:不同类型绝缘子的覆冰闪络电压与各自的特殊结构,以及覆冰程度等因素相关^[18-20],且绝缘子覆冰闪络模型均是建立在污秽闪络模型的基础上。其中大部分的研究是在绝缘子不带电的情况下进行人工覆冰的,但是实际上绝缘子的覆冰程度不但受环境条件影响,而且与绝缘子的工作状态有关,绝缘子带电覆冰与不带电覆冰将导致绝缘子表面覆冰程度的差异,对其冰闪特性具有显著的影响,亟待研究。

现国内输电线路绝缘子主要以盘形悬式绝缘子串和合成硅橡胶棒形悬式绝缘子为主。输电线路覆冰闪络特性的研究试验试品大多也是盘形悬式绝缘子和复合绝缘子,部分以支柱绝缘子为试品,而对具有特殊结构的棒形悬式瓷绝缘子进行的研究较少,但是近年来,由于棒形悬式瓷绝缘子具有不可击穿、自洁性好、机械强度高优点^[6],部分地区也逐渐开始使用。

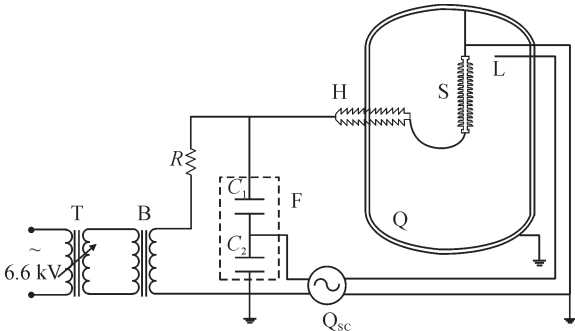
结合以上研究现状,文中选取棒形悬式瓷绝缘子为研究对象,在人工气候室内对带电绝缘子和不带电绝缘子进行了人工覆冰试验和交流闪络试验,模拟绝缘子在线路停运和正常运行时发生交流闪络的情况,通过高速摄影机对绝缘子的闪络过程进行检测,用示波器记录下泄漏电流的波形变化,以研究不同工作状态下棒形悬式瓷绝缘子覆冰程度对其闪络特性的影响。同时,以污秽闪络模型为基础,开展了人工覆冰条件下不同盐密污秽度、覆冰水导电率的绝缘子交流闪络特性研究,为输电线路绝缘子选型以及防冰减灾等,提供试验依据和技术参考。

1 试品及试验装置

1.1 试验装置

试验在高5.2 m、直径4.0 m的人工气候室内进行,室内温度最低可降至 $(-40\pm1)^\circ\text{C}$,满足人工覆冰的试验要求。试验回路见图1。

试验电源由一台150 kV/600 kVA试验变压器提供,经套管引入气候室内部。试品由称重传感器悬挂在气候室顶部中间位置,由绝缘杆连接。试验过程中施加电压和泄漏电流数值分别由电容分压器和罗氏线圈测量。



T—调压器; B—试验变; Q—人工气候室; H—套管
O_{sc}—示波器; S—试品; F—分压器; L—罗氏线圈。

图1 覆冰试验原理接线图

Fig. 1 Schematic circuit of icing experiment

1.2 试品及试验方法

试验选用LP60/23/1022棒形悬式瓷绝缘子为试品,其技术参数见表1。表1中: H 为结构高度; L 为爬电距离; N 为伞裙个数; S 为伞裙间距; d 为内柱直径; D 为伞盘直径。

表1 试品绝缘子参数

Table 1 Configuration of the tested insulator

参数	H/mm	L/mm	$N/\text{个}$	S/mm	d/mm	D/mm
数值	1 022	2 750	23	35	60	140

试验过程见图2。其中 U_0 为试品运行线路额定相电压63.5 kV。带电绝缘子和不带电绝缘子在覆冰过程中环境条件完全相同。

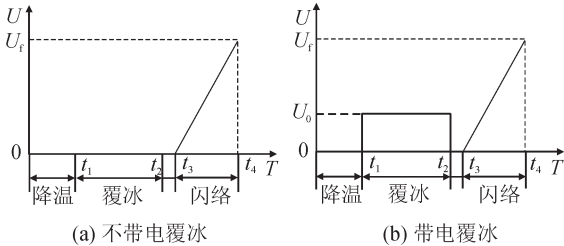


图2 覆冰闪络试验流程

Fig. 2 Process of experiment

具体覆冰过程如下:首先将气候室温度设定为 -5°C ,经过一段时间后 $(0\sim t_1)$,试品充分冷却, t_1 时刻开始喷水覆冰,冷却水的雾化直径约 $40\mu\text{m}$,待到覆冰重量增长至6.5~7.0 kg时,即 t_2 时刻停止喷水,控制气候室内温度基本不变,保持15 min $(t_2\sim t_3)$ 段使绝缘子覆冰表面不再存有液态水。此时,2种条件下试品表面覆冰状态有所不同,不带电绝缘子覆冰完成后,试品整体被上下连通的冰柱桥接,冰柱数大约为12~15根,见图3(a)。而带电绝缘子覆冰完成后,靠近高压端的第11~14个伞群间没有覆冰,见图3(b)。这是由于带电绝缘子串杂散电容的存在导致流过每个绝缘子的电流分布不均,导致各个绝缘子

发热情况不一致,覆冰情况不一样,覆冰较少甚至没有覆冰的绝缘子流过的电流最多,承受电压降最大。

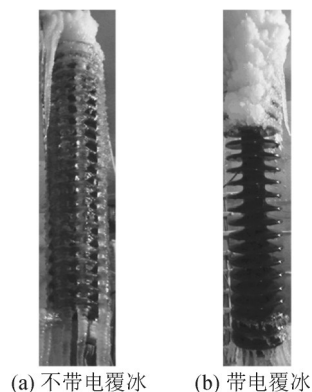


图3 覆冰完成后的绝缘子

Fig. 3 Icing on the insulator

绝缘子的闪络试验在人工气候室内完成,以约5 kV/s的速度均匀升高覆冰绝缘子两端的电压直至发生闪络($t_3 \sim t_4$),视绝缘子表面覆冰情况进行1~2次闪络试验,同时记录闪络电压与泄漏电流。在相同条件试验重复6次,将得到的闪络电压取平均值后即为绝缘子覆冰闪络电压 $U_f^{[15]}$ 。

$$U_f = (U_1 + U_2 + \dots + U_n) / n \quad (1)$$

2 覆冰绝缘子闪络过程

2.1 闪络过程

使用高速摄影机拍摄的不带电绝缘子覆冰后发生闪络时电弧的发展过程见图4。拍摄速度为800 帧/s,拍摄区域为绝缘子整体。由于图片较多,且电弧发展具有周期性,故选取其发展过程中具有代表性的8帧图片进行分析。

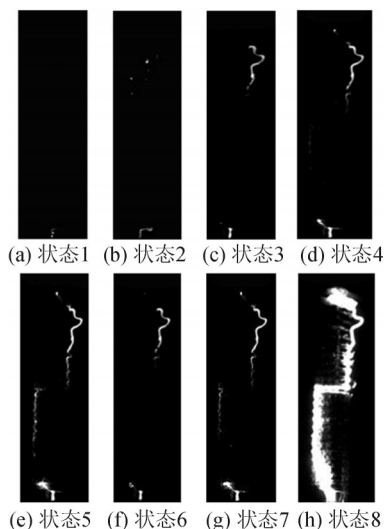


图4 不带电绝缘子覆冰后闪络电弧发展过程

Fig. 4 AC flashover process of insulator iced without voltage

其闪络过程如下:随着绝缘子两端电压的升高,放电首先在高压端出现,见图4(a)。随后接地端也出现局部电弧,见图4(b)。此时两端电弧还没贯穿绝缘子串,处于不稳定状态,电压过零时熄灭,见图4(c)、(d)。但是随着电压的升高,局部电弧重燃后,电弧发展更剧烈,不断由两端沿覆冰表面迅速向中间延伸,发展到图4(e)所示状态,上、下两端电弧长度相加几乎与绝缘子等长,却没有连接形成闪络。此时由于电弧的热稳定性,电压过零时电弧减弱但并不熄灭,见图4(f)。直至电压过零后上升,电弧快速发展至图4(g)所示状态,上下两端电弧连接在一起,贯穿整个绝缘子表面,形成闪络如图4(h)所示。

带电绝缘子覆冰后发生闪络时电弧的发展过程见图5。

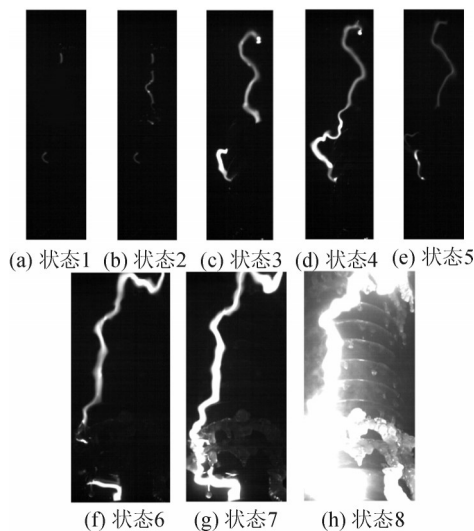


图5 带电绝缘子覆冰后闪络电弧发展过程

Fig. 5 AC flashover process of insulator iced energized

拍摄速度为1 000 帧/s,拍摄区域为靠近高压端没有覆冰的伞裙,同样选取具有代表性的8帧图片来进行分析。其闪络过程如下:随着绝缘子两端施加电压的升高,首先出现局部电弧的位置为没有覆冰的伞裙区域两端,见图5(a)。电弧产生后向中间发展见图5(b)。此时两端电弧都不稳定,电压过零时熄灭。电压上升后两端电弧得到加强,更为明亮如图5(c)所示。此时电压过零电弧减弱但并不熄灭。两端电弧发展至足够长以后连接成为一条电弧并以极快的速度沿覆冰表面向上爬升,见图5(d)。但未发生绝缘子串的贯穿闪络。电压再次过零时电弧重新减弱为上、下2部分,见图(e)。过零后电压再次升高,两端电弧重复上述发展、连接、迅速爬升、过零减弱的过程。当电压上升到足够大以后,

电弧经过图 5(f)、(g)、(h)所示发展过程, 迅速爬升至接地端形成闪络。

2.2 对比分析

不带电绝缘子与带电绝缘子覆冰后的闪络过程都经过了局部电弧产生、发展、熄弧以及重燃以后继续延伸的过程, 但二者在电弧发展过程以及泄漏电流等方面有明显的不同:

2.2.1 电弧发展过程

首先, 二者起弧的位置不同。如图 4、5 所示, 不带电绝缘子覆冰后发生闪络时局部电弧的起始位置为高压端和接地端, 而带电绝缘子覆冰后发生闪络时局部电弧的起始位置为无覆冰区域的两端。

其次, 二者电弧的发展方向不同。如图 4、5 所示, 不带电覆冰的绝缘子的电弧随电压升高由两端向中间发展, 连接后形成闪络。而带电覆冰的绝缘子的电弧随电压的升高, 先在无覆冰伞裙区域向中间发展连接为一条电弧后, 沿覆冰区域向上发展直至高压端与接地端形成闪络。

2.2.2 泄漏电流

覆冰试品闪络前后的典型泄漏电流波形见图 6。从图 6 可以看出, 绝缘子发生闪络前, 相同试验电压下不带电覆冰试品的泄漏电流值明显大于带电覆冰试品的泄漏电流值, 当电弧贯穿试品高压端和接地端后, 相同试验电压下带电覆冰的绝缘子和不带电覆冰的绝缘子的闪络电流相同。

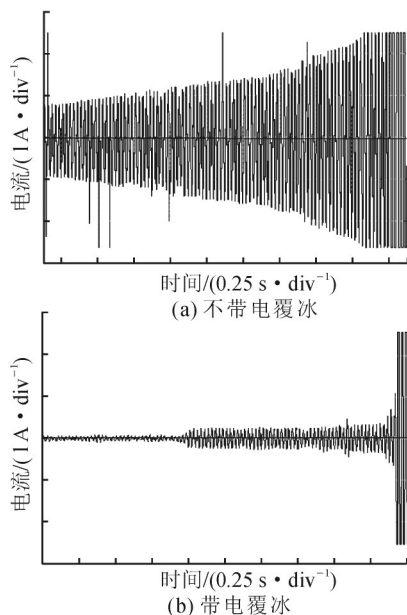


图 6 绝缘子闪络前后的泄漏电流

Fig. 6 Leakage current of iced insulator

上述 2 种施加电压条件下覆冰绝缘子闪络过程不同特点主要是由绝缘子表面覆冰状态的差异引起的。

不带电覆冰后绝缘子伞裙均被连贯的冰柱桥接, 见图 7(a)。电压分布主要与绝缘子的杂散电容有关。绝缘子的对地电容 C_E 使得靠近高压端的绝缘子电压降最大, 离高压端远的绝缘子电压降逐渐减小, 而绝缘子的对导线电容 C_L 对绝缘子电压降的影响刚好相反, 二者作用下, 绝缘子的电压降呈“U”型分布, 两端大, 中间小, 绝缘子串的 A 端与 C 端电场强度大, 当场强超过一定数值后, 则此处将产生放电, 故局部电弧首先出现在 A 与 C 处, 并向中间延伸, 当局部电弧伸展到一定长度后(此长度由外施电压和弧道电流大小决定), 若外施电压和电流不足以维持电弧燃烧, 则在交流电流过零时电弧熄灭, 经过一些时间后, 局部电弧重燃, 这样周期循环, 直至形成贯穿高压端与接地端的闪络, 同时泄漏电流不断变大。

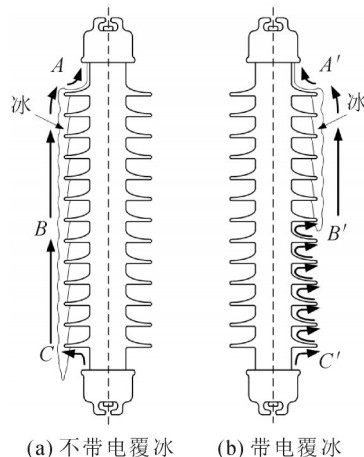


图 7 泄漏电流路径简化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of path of leakage current

而带电绝缘子覆冰后表面表现为低阻覆冰区域 $A'B'$ 和高阻无覆冰区域 $B'C'$, 见图 7(b)。施加电压后 $B'C'$ 承担几乎全部的压降, 当其场强超过一定数值, 则发生放电, 故局部电弧首先出现在 B' 与 C' 处, 按照类似的方式, 电弧的熄灭和重燃不断发生。直到 B' 与 C' 之间形成闪络, 此时 $B'C'$ 区域由于闪络阻值急剧降低为电弧电阻, 远小于 $A'B'$ 表面电阻, 电压分布随即发生改变, 电弧熄灭, $A'B'$ 压降增大表面电场增强, 电弧迅速发展至 $A'B'$ 区域, 若外施电压足够, 则绝缘子发生整体闪络。闪络过程中电压分布的改变对电弧的发展起到了很大的促进作用, 与不带电覆冰绝缘子的闪络过程相比, 带电覆冰绝缘子的闪络电弧发展所用时间更短; 且由于 $B'C'$ 伞裙没有覆冰使泄漏距离 $L_{B'C'}$ 和表面电阻 $R_{B'C'}$ 大均大于 L_{BC} 、 R_{BC} , 带电覆冰试品闪络前泄漏电流值明显小于不带电覆冰的试品。

3 覆冰绝缘子的闪络电压

文中除了研究带电覆冰与不带电覆冰对闪络电压的影响外,还研究了覆冰前绝缘子表面污秽度和覆冰水电导率对覆冰闪络电压的影响。

3.1 污秽度

大量关于绝缘子表面污秽对覆冰闪络电压影响的研究^[11,15]表明,覆冰可视为一种特殊的污秽,各种类型绝缘子的冰闪电压 U_f 与表面盐密污秽度 ρ_{ESDD} 的关系类似于污闪,可由式(2)表示。

$$U_f = A\rho_{\text{ESDD}}^{-a} \quad (2)$$

式(2)中: A 是与绝缘子串长、结构相关的固定系数; a 为表征盐密度对覆冰闪络电压影响程度的影响因子,其大小与绝缘子类型、材料相关, a 越大则覆冰闪络电压随盐密度增大的下降速度越快。

试验中人工污秽由NaCl、硅藻土组成,用去离子水调和后均匀刷涂在绝缘子表面。试验中保持灰密度 1 mg/cm^2 不变,盐密度分别选取0、0.05、0.10、0.20、0.50 mg/cm^2 进行试验,使用的覆冰水电导率约为 $180 \mu\text{S/cm}$ (20°C),对不带电覆冰的试品和带电覆冰的试品分别进行闪络试验,得到覆冰闪络电压随盐密度变化的关系曲线,见图8。

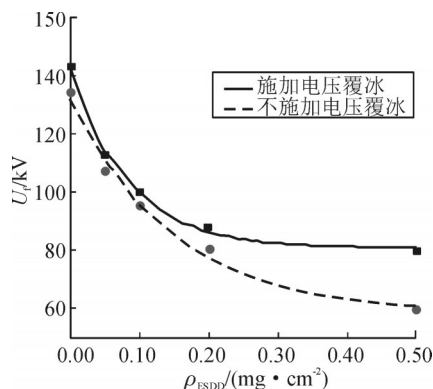


图8 闪络电压与盐密度的关系

Fig. 8 Flashover voltage vs. contamination degree

由图8可知:试品不带电和带电覆冰后的闪络电压 U_f 与随表面盐密污秽度 ρ_{ESDD} 的增加而下降,当盐密度大于 0.20 mg/cm^2 以后,下降速度变缓且逐渐趋于饱和,特别是带电覆冰后的试品闪络电压,饱和现象明显;相同盐密度下的试品,带电覆冰绝缘子的闪络电压高于不带电覆冰绝缘子的闪络电压。

闪络电压降低是由于表面可溶污秽在覆冰过程中析入冰层,表面冰层融化后形成一层具有很高电导率的水膜,大大降低了绝缘电阻,随污秽盐密度的增大,水膜电导率不断上升,故闪络电压下降;带电覆冰绝缘子的闪络电压高于不带电覆冰绝缘子

是因为前者覆冰完成后绝缘子部分伞裙没有覆冰,相同污秽条件下的泄漏距离更大,绝缘电阻更高。

将试验结果用式(2)进行拟合,得到不带电覆冰后盐密度对覆冰闪络电压的影响因子为0.24,带电覆冰后盐密度对覆冰闪络电压的影响因子为0.16。试品绝缘子的大小受到表面覆冰状态的影响,带电覆冰试品的闪络电压受盐密度的影响小于不带电覆冰试品的闪络电压。

3.2 覆冰水电导率

保持绝缘子表面污秽灰密度 0.10 mg/cm^2 ,盐密度 0.20 mg/cm^2 不变,分别使用电导率为7、20、50、100、150、 $180 \mu\text{S/cm}$ (20°C)的覆冰水,对不带电覆冰的试品进行闪络试验,得到覆冰水电导率 C 与覆冰闪络电压 U_f 的关系,见图9。

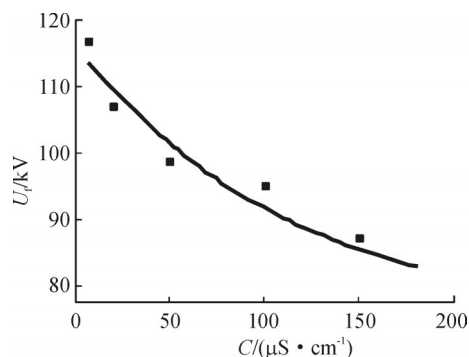


图9 闪络电压与覆冰水电导率的关系

Fig. 9 Flashover voltage vs. icing water conductivity

从图9可知,试品不带电覆冰后闪络电压随覆冰水电导率的升高而下降。与增大盐密度的作用相同,覆冰水电导率增大使融冰产生的水膜电导率增大,绝缘电阻减小而导致闪络电压的下降,但其影响程度要远小于盐密度。

4 结论

文中以LP60/23/1022为试品对棒形悬式瓷绝缘子的覆冰闪络特性进行试验研究,得到如下结论:

1)棒形悬式瓷绝缘子不带电覆冰与带电覆冰后由于表面覆冰状态的差异,其闪络特性具有不同的特点:不带电覆冰后闪络时局部电弧起始位置为高压端和接地端;带电覆冰后局部电弧起始位置为无覆冰区域的两端即高压端及覆冰与不覆冰伞裙交界处;而且闪络前,相同试验电压下不带电覆冰绝缘子泄漏电流值大于带电覆冰绝缘子的泄漏电流值;相同污秽条件下,试品带电覆冰后的闪络电压高于不带电覆冰后的闪络电压。

2)棒形悬式瓷绝缘子覆冰闪络电压随绝缘子表面盐密度与覆冰水电导率的增大而降低。LP60/23/

1022 不带电覆冰后盐密度对其闪络电压的影响因子为 0.24, 带电覆冰后的影响因子为 0.16; 且覆冰水电导率对闪络电压的影响小于盐密度的影响。

参考文献:

- [1] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
JIANG Xingliang, SHU Lichun, SUN Caixin. Power system pollution and icing insulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] YU Li. Study of the influence of altitude on the characteristics of the electrical arc on the polluted ice surface[D]. Quebec: University Quebec of Chicoutimi, 2002.
- [3] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
JIANG Xingliang, YI Hui. Transmission line icing and its protection[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2001.
- [4] 郭炳信. 电网污闪和雪闪故障原因分析及预防措施[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 24(4): 10-12.
GUO Bingxin. Faults analysis and preventive measurement for electrical network pollution and snow flash[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006, 24(4): 10-12.
- [5] 李庆峰, 范峥, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.
LI Qingfeng, FAN Zheng, WU Qiong et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
- [6] 袁兆祥, 吴建宏, 吴锁平. 长棒形瓷绝缘子的特性及其应用前景[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(1): 25-26.
YUAN Zhaoxiang, WU Jianhong, WU Suoping. Analysis of the characteristics and application perspective for porcelain long rod insulators[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(1): 25-26.
- [7] POHIMAN J C, DAVIS C R. Cracked insulators create hazardous working conditions during restoration after extreme ice storm[C]//Proceedings of IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. Columbus, USA: IEEE, 1995: 143-149.
- [8] HUNEAULT M, LANGHEIT C, CARON J. Combined models for glaze ice accretion and de-icing of current-carrying electrical conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1611-1616.
- [9] FARZANCH M, DRAPEAU J F. AC flashover performance of insulators covered with artificial ice[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1038-1051.
- [10] FARZANEH M, BAKER T, BERNSTORF A, et al. Insulator icing test methods and procedures: a position paper prepared by the IEEE task force on insulator icing test methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 18(4): 1503-1515.
- [11] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
SUN Caixin, SIMA Wenxia, SHU Lichun. Atmospheric environment and electrical insulation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [12] 蒋兴良, 舒立春, 张志劲, 等. 覆冰绝缘子长串交流闪络特性和放电过程研究[J]. 电机工程学报, 2005, 25(14): 158-163.
JIANG Xingliang, SHU Lichun, ZHANG Zhijiang, et al. Study on AC flashover performance and process of long iced insulator strings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 158-163.
- [13] 贾志东, 李智宁, 苏华锋, 等. 110 kV 玻璃绝缘子串交流覆冰的闪络特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1074-1081.
JIA Zhidong, LI Zhiming, SU Huafeng, et al. AC electric characteristics of the ice-covered 110 kV glass insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1074-1081.
- [14] 刘云鹏, 许佐明, 胡毅, 等. 500 kV 交流支柱绝缘子的冰闪特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1638-1643.
LIU Yunpeng, XU Zuoming, HU Yi, et al. Icing flashover characteristics of 500 kV AC post insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1638-1643.
- [15] JIANG X, DONG B, HU Q, et al. Effect of ultrasonic fog on AC flashover voltage of polluted porcelain and glass insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 429-434.
- [16] 张楚岩, 孟晓波, 张福增, 等. 支柱绝缘子直流污雨闪放电机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1481-1489.
ZHANG Chuyan, MENG Xiaobo, ZHANG Fuzhen, et al. research on the DC rain flashover mechanism of polluted post insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1481-1489.
- [17] MEGHNEFI F, FARZANEH M, VOLAT C. Measurement of the evolution of dripping water conductivity of an ice-covered insulator during a melting period[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec, Canada: [s.n.], 2008: 236-239.
- [18] RAMOS N G, CAMPILLO R M, NAITO K. A study on the characteristics of various conductive contaminants accumulated on high voltage insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1842-1850.
- [19] JIANG X L, WANG S H, ZHANG Z J, et al. Study on AC flashover performance and discharge process of polluted and iced IEC standard suspension insulator string[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 472-480.
- [20] MEGHNEFI F, VOLAT C, FARZANEH M. Temporal and frequency analysis of the leakage current of a station post insulator during ice accretion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1381-1389.

贾会东(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统外绝缘。

郭海山(1993—), 男, 硕士, 研究方向为脉冲功率技术。