

文章编号:1000-582X(2007)07-0037-05

XZP-210 绝缘子冰闪特性与串长和布置方式的关系

蒋兴良,王波,张志劲,胡建林,孙才新

(重庆大学电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:为了给高海拔覆冰地区超特高压直流输电线路外绝缘设计提供技术参考,在人工气候室模拟高海拔大气条件进行了大量覆冰试验研究,根据试验研究结果,分析了XZP-210直流绝缘子串冰闪闪络电压与串长和布置方式的关系。结果表明,在污秽度和气压较低条件下,覆冰绝缘子串的直流闪络电压与串长的线性关系较微弱,但随着海拔高度或污秽程度的增加,其闪络电压与串长基本呈线性关系。绝缘子串的布置方式对冰闪电压有明显影响:水平布置的覆冰绝缘子串具有最高的闪络电压,V型串次之,垂直串最低;不同布置方式下,气压对水平布置的覆冰绝缘子串的影响最为严重。

关键词:覆冰绝缘子;直流;高海拔;串长;布置方式;闪络电压

中图分类号:TM852

文献标志码:A

高海拔地区的低气压和覆冰使绝缘子的电气性能降低,严重影响输电线路的安全运行^[1-6]。目前中国已规划的特高压直流线路都要经过高海拔覆冰地区^[7],覆冰(雪)、低气压、污秽综合作用下输电线路外绝缘设计已成为特高压直流输电工程的关键技术之一。而绝缘子串长及布置方式与覆冰绝缘子串闪络电压的关系是特高压直流输电线路外绝缘设计中必须考虑的重要因素之一。因此,研究绝缘子串长及布置方式对高海拔地区覆冰绝缘子串直流冰闪的影响有重要的学术和工程应用意义。

覆冰绝缘子的闪络电压与绝缘子串长有关。覆冰绝缘子串最低闪络电压或耐受电压与串长是否呈线性关系与绝缘子表面覆冰状态有关^[8-12]。严重或饱和覆冰,即绝缘子串的2/3以上被冰凌桥接时,其闪络电压最低并与串长呈线性关系,且严重覆冰后绝缘子串的冰闪电压受绝缘子结构影响不明显^[3-5,12-14]。布置方式对覆冰绝缘子串闪络特性有明显影响。一般认为:覆冰绝缘子串的耐压值随水平度的增加而增加,即水平串优于V型串,V型串优于I型串^[2,15-16]。国内外对覆冰绝缘子交流闪络特性进行了大量研究,但对直流绝缘子(串)冰闪特性,特别是长串和高海拔下的研究则较少。为适应中国电力建设发展的要求,笔者在

人工气候室内模拟高海拔覆冰条件,研究了串长和布置方式对XZP-210直流绝缘子串闪络特性的影响,其目的是为高海拔覆冰地区超特高压直流输电线路外绝缘设计提供技术参考。

1 试验装置

1.1 试验装置及试品

模拟高海拔、覆冰条件的人工气候室见文献[17]。文中研究采用的直流电源为±600 kV可控硅双反馈倍压整流直流电源,其额定电压为±600 kV,额定电流为0.5 A;在泄漏电流为0.5 A时,其动态压降小于5%,闪络时电压的纹波系数小于3%,满足IEC标准和国家标准对污秽试验的直流试验电源的要求。试验原理接线图参见文献[5]。试品为XZP-210直流绝缘子,技术参数如表1示。

表1 试品绝缘子结构图及参数

型号	绝缘子外形	mm		
		盘径	高度	爬距
XZP-210		320	170	540

1.2 试验方法及过程

采用固体涂层法模拟覆冰前绝缘子表面染污,即

收稿日期:2007-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90210026)。

作者简介:蒋兴良(1961-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事高电压输变电技术、外绝缘技术及输电线路覆冰及防护研究,(E-mail)xjiang@cqu.edu.cn。

参照国标 GB/T16434-1996,由污秽程度 ρ_{ESDD} 和绝缘子表面积 S 算出所需 NaCl 和硅澡土量,将 NaCl 和硅澡土加入一定量的电导率小于 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C) 的去离子水中,充分搅拌后均匀刷涂在试品绝缘子表面,待污层自然干燥后,用电导率为 $100 \sim 120 \mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C) 的覆冰水喷雾覆冰。

考虑到高海拔地区绝缘子染污和覆冰程度较低,试验时绝缘子表面污秽程度 ρ_{ESDD} 分别取 0.03 、 0.05 、 $0.10 \text{ mg}/\text{cm}^2$;实验中控制绝缘子上表面覆冰厚度为 5 mm ,下表面为 2 mm 。该研究主要求取其融冰期的

平均闪络电压,即 50% 闪络电压 U_{50} 。参照污秽绝缘子闪络电压的试验方法,为了得到覆冰绝缘子的 50% 闪络电压,试验中采用均匀升压法对覆冰绝缘子串进行闪络试验。

2 试验结果及分析

2.1 直流冰闪电压与串长的关系

图1为不同污秽度 ρ_{ESDD} 、气压 P 下 XZP-210 绝缘子串 50% 直流闪络电压与串长的关系。

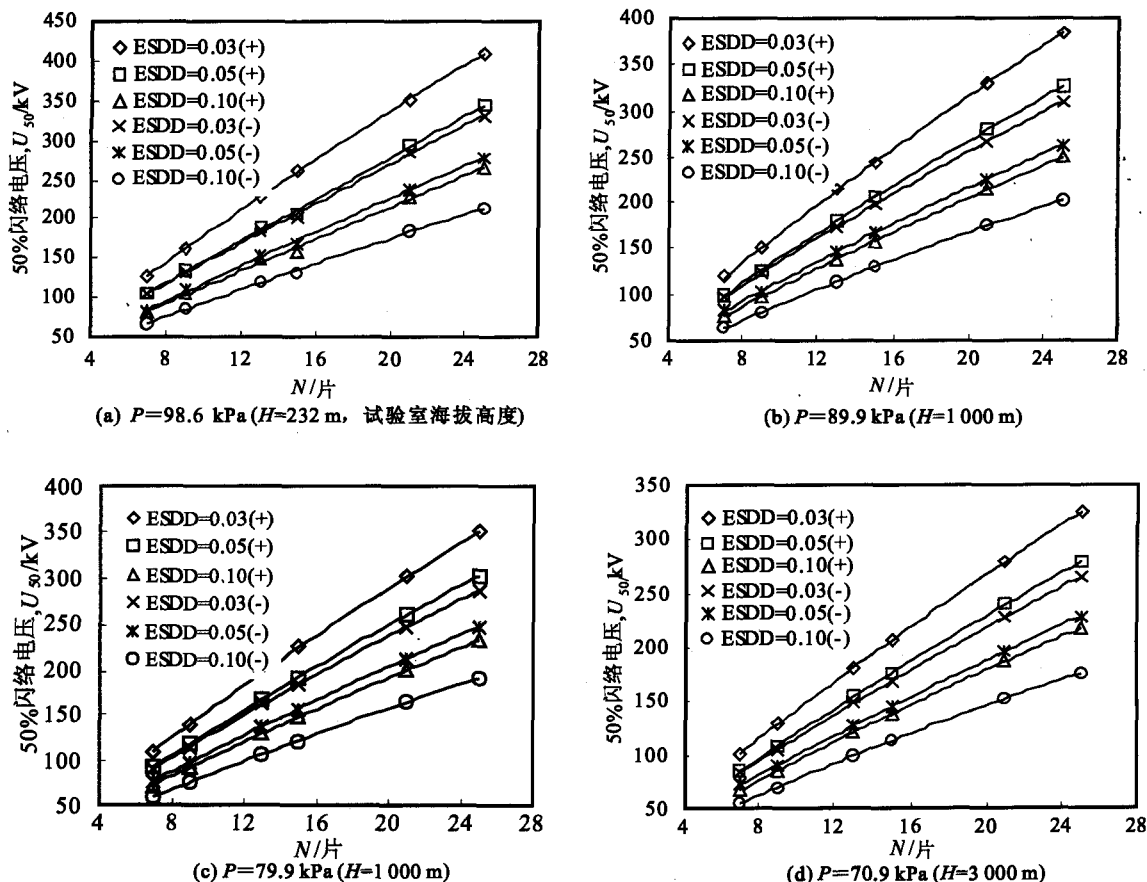


图1 XZP-210 直流绝缘子最低冰闪电压与串长的关系

根据试验结果, 50% 闪络电压 $U_{50\%}$ 和绝缘子片数 N 满足下式关系:

$$U_{50} = (A - \nabla u \cdot N)N \quad (1)$$

式中, ∇u 和 A 为常数,单位为 kV ,不同盐密和气压下的 ∇u 和 A 的数值如表2示。

通过对试验结果的分析,可知:

1) 随着 N 值的增加, XZP-210 直流绝缘子串的 50% 直流冰闪电压逐渐升高,其升高的变化趋势虽然呈一定线性关系,但在污秽度较轻时,其线性关系不明显。如 $P=98.6 \text{ kPa}$ 、 $\rho_{\text{ESDD}}=0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 时,其 50% 冰闪电压是串长 N 的 $(18.9 - 0.1N)$ 的倍数关系,当

$N=7$ 时,平均每片绝缘子的 50% 直流冰闪电压 $U_{50,1}$ ($N=7$) 为 18.2 kV ,而当 $N=20$ 时,平均每片绝缘子的 50% 直流冰闪电压 $U_{50,1}$ ($N=20$) 只有 16.6 kV ,即随着绝缘子串长增加,绝缘子串中的每片绝缘子的 50% 闪络电压 $U_{50,1}$ 逐渐降低。较轻的覆冰使得绝缘子串上桥接的冰凌较少,且由于冰层较薄(下表面冰厚仅为 2 mm),融冰期部分冰层由于泄露电流的作用,从绝缘子表面脱落,在绝缘子表面易形成冰层不连续的区域;加之污秽度轻,融冰水电导率小,这些因素使得整个绝缘子串融冰期的电阻比严重覆冰(冰凌有 $2/3$ 以上桥接)和污秽度较大时高的多,绝缘子串上的

电压分布受杂散电容影响较大,呈较明显的电容性分布,电压分布不均匀(两端高,中间低),随着串长的增长,绝缘子串上电压分布不均匀程度进一步增大,起弧电压降低,闪络电压随之降低,使得平均每片绝缘子的50%闪络电压降低,闪络电压与串长的线性关系不明显。但随着污秽度的增加,融冰水电导率增大,绝缘子串表面电阻减小,杂散电容对绝缘子串电压分布的影响减弱,冰闪电压的非线性度降低,每增加一片绝缘子时平均每片绝缘子的50%直流冰闪电压 $U_{50,1}$ 降低的趋势也逐渐减小。如:在 $P = 98.6$ kPa 的情况下,当 $\rho_{ESDD} = 0.03, 0.05, 0.1$ mg/cm² 时, ∇u 分别为 0.1、0.07、0.06 kV,即污秽度增大,XZP-210 直流绝缘子50%冰闪电压与串长的线性关系越明显。

表2 不同盐密和气压下的 ∇u 和 A 值

$\rho_{ESDD}/\text{mg} \cdot \text{cm}^2$	P/kPa	0.030		0.050		0.100	
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
98.6	A	18.90	15.40	15.50	12.70	12.10	9.90
	∇u	0.10	0.087	0.070	0.064	0.060	0.055
89.9	A	17.60	14.50	14.70	12.10	11.50	9.50
	∇u	0.090	0.084	0.066	0.063	0.062	0.056
79.9	A	16.20	13.40	13.60	11.20	10.60	8.80
	∇u	0.086	0.079	0.059	0.053	0.053	0.048
70.9	A	15.0	12.30	12.60	10.40	10.0	8.20
	∇u	0.080	0.068	0.057	0.050	0.053	0.046

2) 随着气压的降低,绝缘子串中每增加一片绝缘子时平均每片绝缘子的50%直流冰闪电压 $U_{50,1}$ 降低的趋势逐渐减小。如: $\rho_{ESDD} = 0.03$ mg/cm²、电压为正极性时,当 $P = 98.6, 89.9, 79.9, 70.9$ kPa 时, ∇u 分别为 0.1、0.09、0.086、0.80 kV,即气压越低,XZP-210 直流绝缘子50%直流冰闪电压与串长的线性关系越明显。

3) 不同极性下,当绝缘子串中每增加一片绝缘子,负极性平均每片绝缘子的50%直流冰闪电压 $U_{50,1}(-)$ 比正极性的 $U_{50,1}(+)$ 低。如: $P = 98.6$ kPa、 $\rho_{ESDD} = 0.03$ mg/cm² 的情况下, $\nabla u(-)$ 为 0.087 kV,而 $\nabla u(+)$ 则为 0.10 kV,即负极性时,XZP-210 直流绝缘子串50%直流冰闪电压与串长的线性关系比正极性下更接近。

对试验结果的分析可知:不同盐密 ρ_{ESDD} (0.03、0.05、0.1 mg/cm²) 和气压 P (98.6、89.9、79.9、70.9 kPa) 下, ∇u 最大值为 0.10,即,绝缘子每增加1片,每片绝缘子的50%闪络电压最多降低 0.1 kV,每片绝缘子闪络电压降低的趋势微弱;且随着气压的降低、污秽度的增大和电压极性的变化 ∇u 都有明显的降低趋势,XZP-210 直流绝缘子50%直流冰闪电压与串长的

关系越接近线性。因此,在工程容许的误差范围内,认为绝缘子串的不同电压极性50%直流冰闪电压与串长基本呈线性关系。

2.2 不同气压下布置方式对冰闪电压的影响

根据国内外试验研究结果^[2],绝缘子串的50%直流冰闪电压与气压之间的关系可用下式拟和,即:

$$U_{50} = U_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (2)$$

式中: U_0 为标准大气压下覆冰绝缘子的50%直流闪络电压,kV; P, P_0 分别为高海拔的气压和标准大气压,kPa; n 为气压影响特征指数,表示气压对覆冰 XZP-210 绝缘子(串)50%闪络电压的影响程度。不同布置方式下回归分析得到的 n 和 U_0 如表3示。

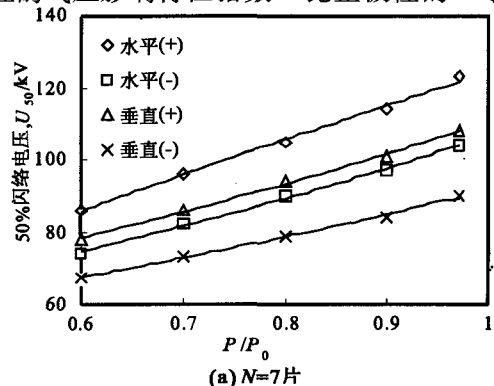
表3 不同布置方式下 XZP-210 绝缘子 n 值

布置方式	水平		V型		垂直	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
N						
7	U_0	123.0	103.7	—	107.5	89.8
	n	0.688	0.654	—	0.616	0.586
9	U_0	156.5	128.7	147.7	121.5	137.1
	n	0.70	0.67	0.66	0.63	0.62
13	U_0	217.2	172.8	205.1	163.3	191.1
	n	0.69	0.66	0.66	0.62	0.62
15	U_0	—	233.7	183.7	217.5	171.4
	n	—	0.67	0.63	0.62	0.59

图2为7~15片串 XZP-210 直流绝缘子串在 $\rho_{ESDD} = 0.05$ mg/cm²,气压比 P/P_0 分别为 0.97、0.89; 0.79、0.70 和 0.61 时,水平、垂直和 V 型3种布置方式下的50%直流闪络电压试验结果以及回归分析的拟合曲线。

通过对以上试验结果的分析,可知:

1) 不同布置方式和电压极性下,XZP-210 绝缘子50%直流冰闪电压的气压影响特征指数 n 有差异,即负极性的气压影响特征指数 n 比正极性的 n 小,V 型



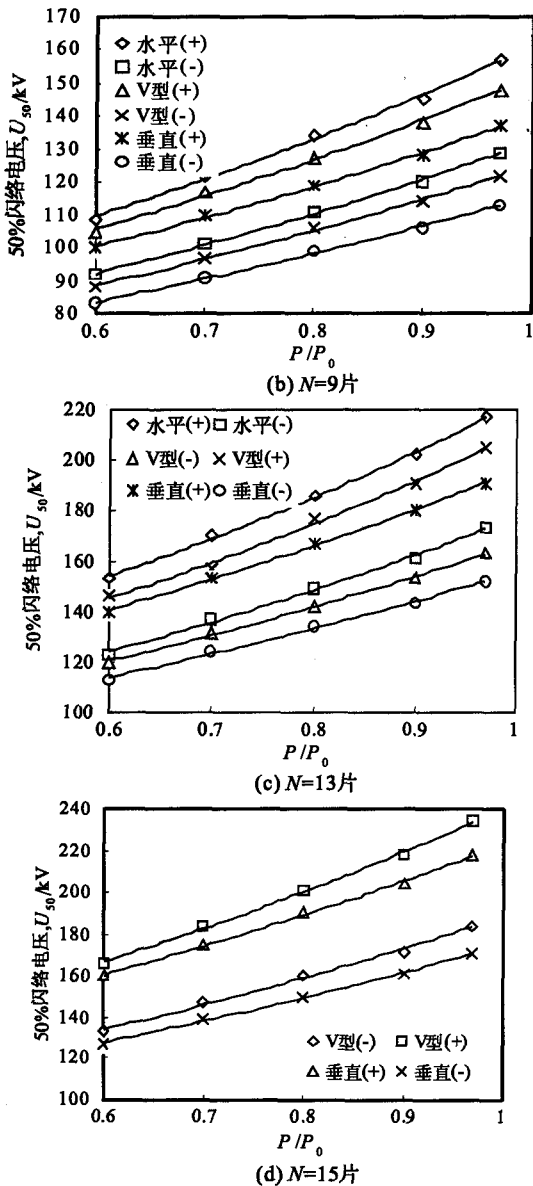


图2 XZP-210 绝缘子不同布置方式时 U_{50} 与 P/P_0 的关系
布置的 n 比水平布置的 n 小, 垂直布置的 n 比 V 型布置的 n 小。以 9 片串为例, 正极性时, 水平布置的 n 比垂直布置的 n 高约 12.7%, V 型布置的 n 比垂直布置的 n 高约 6.0%; 而负极性时, 水平布置的 n 比垂直布置的 n 高约 13.2%, V 型布置的 n 比垂直布置的 n 高约 6.5%, 如表 3 所示。

2) 3 种布置方式下, XZP-210 直流绝缘子串的 50% 直流冰闪电压 U_{50} 存在明显的差异, 其中, 水平布置的绝缘子串冰闪电压最高, V 型次之, 垂直布置的绝缘子串冰闪电压最低。以 9 片串为例, 在 98.6、89.9、79.9、70.9、61.9 kPa 这 5 个气压下, 水平布置 XZP-210 绝缘子串的正极性 U_{50} 比垂直布置的高 14.1%、13.1%、11.9%、10.5%、10.0%, 而水平布置 XZP-210 绝缘子串的负极性 U_{50} 比垂直布置的高 14.0%、

13.3%、12.2%、11.0%、9.9%; V 型布置的正极性 U_{50} 比垂直布置的高 7.8%、7.2%、6.8%、5.9%、6.0%, 而 V 型布置 XZP-210 直流绝缘子串的负极性 U_{50} 比垂直布置的则高 7.7%、7.6%、6.6%、6.6%、5.7%, 如表 4 示。由此可知, 水平布置 XZP-210 绝缘子串的直流冰闪电压比垂直布置的高 9.9% ~ 14.1%, V 型布置的直流冰闪电压比垂直布置高 5.7% ~ 7.8%, 这与污秽情况下有一定的差异。

表 4 9 片串 XZP-210 绝缘子 3 种布置方式 U_{50} 的差别 %

P/kPa	$\Delta U_1(+)$	$\Delta U_2(+)$	$\Delta U_1(-)$	$\Delta U_2(-)$
98.6	14.1	7.8	14.0	7.7
89.9	13.1	7.2	13.3	7.6
79.9	11.9	6.8	12.2	6.6
70.9	10.5	5.9	11.0	6.6
61.9	10.0	6.0	9.9	5.7

3) 垂直、水平、V 型 3 种布置方式下, XZP-210 绝缘子的 50% 直流冰闪电压 $U_{50}(+)$ 比 $U_{50}(-)$ 高 15% ~ 20%, 因此, 我们认为不同布置方式的 XZP-210 直流绝缘子的 U_{50} 存在明显的极性效应。

由上可知, XZP-210 绝缘子串在不同布置方式下, 50% 直流冰闪电压存在明显极性效应; 水平布置的 XZP-210 绝缘子串具有较高冰闪电压, 其 50% 直流冰闪电压比垂直布置时高 9.9% ~ 14.1%, 而 V 型布置时 U_{50} 比垂直布置高 5.7% ~ 7.8%; 但水平布置的 XZP-210 绝缘子串 U_{50} 受气压的影响最大。

3 结论

1) 覆冰绝缘子串的直流 50% 闪络电压与串长之间有一定的非线性关系, 但在工程容许的误差范围内, 可认为绝缘子串的不同电压极性 50% 冰闪电压与串长基本呈线性关系, 在进行外绝缘配置时, 可平均取 7 ~ 25 片串的试验结果的每片绝缘子的 50% 闪络电压作为基础依据;

2) XZP-21 绝缘子每增加一片, 每片绝缘子最低闪络电压降低值 ∇u 随着气压 P 的降低和盐密 ρ_{ESDD} 的增大都有明显的降低趋势, 即在相同的覆冰程度下, 海拔越高或污秽越重, 绝缘子串的平均冰闪电压线性度越好;

3) 绝缘子串水平布置时冰闪电压最高, V 型布置方式次之, 垂直布置时冰闪电压最低。因此, 在高海拔覆冰地区超/特高压直流线路外绝缘设计中, 若以水平布置确定绝缘子片数时, 同样条件下的垂直布置的绝缘子串长应提高 16%。而 V 型布置绝缘子串长则在以水平布置所确定的绝缘子片数基础上提高 8% 才可满足绝缘配合要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 蒋兴良,武利会,司马文霞,等. 低气压下XZP/XZWP4-160 直流绝缘子覆冰闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 111-115
- [4] 蒋兴良,谢述教,舒立春,等. 低气压下三种直流绝缘子覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 158-162
- [5] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120
- [6] 粟福珩,贾逸梅,王均谭,等. 500 kV 绝缘子串的人工雾凇覆冰和放电试验[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 75-78
- [7] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
- [8] SU F, JIA, Y. Icing on Insulator String of HV Transmission Lines and Its Harmfulness[C]//Proceedings of 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore, 1993:655-658.
- [9] FARZANEH M, KIERNICKI, J. Flashover performance of IEEE standard insulators under ice conditions [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1997, 16(2): 1602-1613.
- [10] FARZANEH M, DRAPEAU J - F. AC flashover performance of insulators covered with artificial ice [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1995, 10(2): 1038-1051
- [11] FARZANEH M, KIERNICKI J. Flashover problems caused by ice build-up on insulators [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(2): 5-17.
- [12] XINGLIANG, JIANG, CAIXIN SUN, LICHUN SHU, et al. AC flashover performance and voltage of long polluted and iced XP-70 suspension insulator string [C]//International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nogaya, Japan, 2003:158-161.
- [13] SUN AIXIN, JIANG XINGLIANG, SHU LICHUN, et al. AC flashover performance and mechanism of polluted and iced IEC standard suspension insulator string [C]//International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, 2003:409-415.
- [14] 谢述教. 直流绝缘子(长)串覆冰闪络特性的研究[D], 重庆: 重庆大学, 2004.
- [15] KANNUS KARI, VERKKONEN VESA. Effect of ice coating on the dielectric strength of high-voltage insulators [C]//4th IWAIS 1988 Paris.
- [16] BUL H T, PHAN L C, HURAUX C, et al. HVDC Flashover on the Surface of Conductive Ice [C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Paper 84CH1964-6, Montreal, 1984:85-88.
- [17] 蒋兴良,孙才新. 10 kV 合成绝缘子覆冰闪络特性和冰闪过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 58-61.

Influence of Units and Assemble on DC Flashover Voltage of Iced Insulator Strings at High Altitude Districts

JIANG Xing-liang, WANG Bo, ZHANG Zhi-jin, HU Jian-lin, SUN Cai-xin

(Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Based on artificial tests of iced DC XZP-210 insulator strings carried out in the artificial climate chamber, the authors analyze the effects of units and assemble on the DC flashover voltage of iced insulator strings at high altitude districts. The test results show that the relationship between the DC icing flashover voltage and the insulator units is seemingly linear with the increase of altitude or pollution level, although the linear relation is not obvious at the low altitude or pollution level. There is influence of the assembled form on icing flashover voltages, the flashover voltage of the horizontal string of iced insulators is highest while that of the vertical string is lowest. For various assembled forms, the effects of the air pressure on the flashover voltage of the horizontal string are most obvious.

Key words: iced insulator; DC; high altitude; string length; flashover voltage; assembled form