

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.012

湿污环境中零值绝缘子串发热特性的耦合场仿真及试验验证

王胜辉¹, 买佳敏¹, 李 博²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 呼和浩特 010000)

摘要: 为研究严重雾天气下污秽零值绝缘子串的发热特性, 文中建立了110 kV 悬式瓷绝缘子串的电热耦合模型, 分析了零值绝缘子在串中不同位置、不同污秽等级以及不同污秽分布对绝缘子串温度分布的影响特性, 试验验证了仿真结果的有效性。研究表明: 当盐密为 0.04 mg/cm^2 的零值绝缘子串发热达到稳定时, 串中零值绝缘子温度最低, 而正常绝缘子温度明显增加, 其增加的幅度受零值绝缘子的位置影响较大; 污秽等级越高零值绝缘子串发热越严重, 但串中零值绝缘子的温度随污秽等级提高其增加量最少, 高压侧绝缘子温度增加较多, 低压侧绝缘子温度增加最为明显。当绝缘子上、下表面有污秽层时, 下表面污秽层引起的温度升高现象更严重, 零值绝缘子温度分布曲线在两种污秽分布方式下趋势一致, 正常绝缘子的表面温度最大值出现在高电阻区, 温度最低值出现在低电阻区。污秽层在下盘面沿环带分布的不均匀度越大, 绝缘子串的整体温度越高, 盐密度增大时其影响减弱。

关键词: 零值绝缘子; 电热耦合; 湿污层; 发热特性

Coupling Field Simulation and Experimental Verification of Heating Characteristics of Zero-value Insulator Strings Under Humid and Contaminated Condition

WANG Shenghui¹, MAI Jiamin¹, LI Bo²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Inner Mongolia Eastern Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hohhot 010000, China)

Abstract: For studying the heating characteristics of contaminated zero-value insulator strings under severe foggy weather, an electro-thermal coupling model of 110 kV suspended porcelain insulator string is set up in this paper. The influence characteristics of zero-value insulators at different positions in the string, under different contamination grades and different contamination distributions on the temperature distribution of insulator strings, are analyzed. The effectiveness of the simulation results is verified by experiment. The results show that when the salt density of the zero-value insulator string reaches up to 0.04 mg/cm^2 , the zero-value temperature in the string is the lowest, while the temperature of the normal insulators is significantly increased, and the increase magnitude is greatly affected by different zero-value positions. The higher the contamination level, the more serious the heating of zero-value insulator strings. However, the increase of the temperature of the zero-value insulator in the string is minimum with the increase of contamination grade. The increase of the insulator temperature at the high voltage side is more and that at the low voltage side is the most significant. In case of contamination layer on the upper and lower surface of the insulator, the rise of temperature due to the latter is most serious, the temperature distribution curve of the zero-value insulator shows the same trend under the two contamination distribution modes. The maximum surface temperature of normal insulator is in the high resistance zone and the minimum value is at the low resistance zone. The greater the contamination non-uniformity along the disc on the lower surfaced, the higher the overall temperature of insulator strings, and its impact diminishes as the salt density increases.

Key words: zero-value insulator; electro-thermal coupling; wet contamination; heating characteristic

收稿日期: 2025-09-10; 修回日期: 2025-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01011903); 河北省重点研发计划项目(19212109D)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2018YFF01011903), Key R & D Proect of Hebei Province (19212109D).

0 引言

瓷绝缘子是电网中广泛使用的电气元件之一,在持续的机械应力、冷热交替和外界雷击等因素作用下,其绝缘性能会逐渐丧失最终发展为零值绝缘子^[1-3],如2021年宁夏220 kV某线路的瓷绝缘子串发生整串击穿故障,其中15片绝缘子钢帽炸裂或伞裙完全破损^[4],分析该案例的起因是瓷绝缘子串中存在多片零值绝缘子,为减少此类事故发生需要对零值绝缘子进行检测并及时更换。红外成像是工程中检测零值绝缘子的常用方法,但现场运行中,绝缘子表面可能形成湿润污秽层,会表现出异常发热^[5-8],导致含零值的绝缘子串发热及温度分布规律产生明显变化,为指导现场红外检测,有必要对污湿情况下的零值绝缘子串发热特性开展研究。

湿润环境中污秽零值绝缘子串的发热及温度分布变化,与湿润污秽层状态直接相关,目前的研究基于红外测温技术,主要关注污秽等级、相对湿度等因素对零值绝缘子红外热成像检测的准确率的影响^[9-16]。如文[11]通过试验研究了某变电站在线运行的污秽绝缘子串其红外热像检测受环境湿度的影响,结果表明湿度增加有利于零值绝缘子的红外检测,但湿度过大时也会引起误判,建议湿度保持在80%左右可提升零值绝缘子红外检测的准确率。该研究将在役污秽绝缘子作为研究对象,未能分析污秽等级对红外检测零值的影响。进一步,文[12-14]采用有限元仿真及试验方法分析了不同污秽条件对红外检测零值的影响,结果表明随着等值盐密增大,零值绝缘子较相邻绝缘子的“负温升”特征更加明显,并提出在环境湿度较大的傍晚进行红外热像检测更容易识别出该特征,但是已有的研究多考虑绝缘子上下表面的均匀污秽层,而现场绝缘子的自然积污特性表明其表面污秽分布往往是不均匀的^[17-19]。

基于上述研究现状可知,目前对存在零值绝缘子以及不同湿润污秽分布下绝缘子串的发热规律的研究较少。因此,文中以110 kV悬式瓷绝缘子为研究对象,建立了零值绝缘子串的有限元仿真模型,对湿污环境中零值绝缘子串的发热特性进行了数值模拟,获得了不同零值绝缘子位置和污秽等级下,湿污绝缘子串的温度分布结果;进一步考虑污秽层在绝缘子瓷盘表面的不同分布情况,研究了污秽层分别在上、下表面均匀分布和污秽层在下表面不均匀分布时的绝缘子串发热规律,并对比分析了正常和零值绝缘子的温度分布特性。在人工气候室

中开展试验研究,试验结果与仿真结果基本一致。

1 零值绝缘子串的有限元仿真模型

1.1 电热耦合模型及材料设置

文中在Comsol软件中建立由7片XP-100型瓷绝缘子构成的绝缘子串电热耦合模型,按照从高压端至接地端依次编号为1-7号,瓷绝缘子由钢帽、瓷件、水泥胶合剂和铁脚等结构组成,单片绝缘子的二维轴对称模型见图1,相关材料属性见表1。

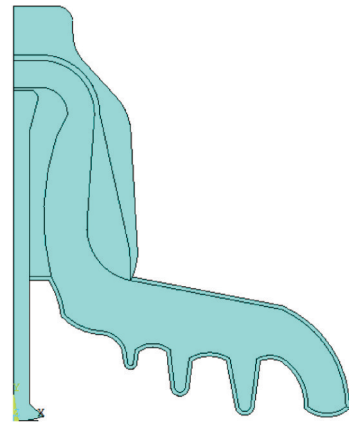


图1 绝缘子二维轴对称截面图

Fig. 1 2-D axisymmetric section of one insulator

表1 各部分材料属性表

Table 1 Material properties of each part

参数	空气	金属	瓷件	水泥
电导率/(S·m ⁻¹)	1.00×10 ⁻¹²	4.03×10 ⁶	2.00×10 ⁻¹⁵	1.67×10 ⁻¹³
相对介电常数	1.0	1.0×10 ¹⁰	6.0	4.5
导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	$k(T)$	76.2	20.0	5.0
恒压热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]	$C_p(T)$	440	730	880
密度/(kg·m ⁻³)	$\rho(p_A, T)$	7 870	2 540	2 250

表1中,导热系数 $k(T)$ 、恒压热容 $C_p(T)$ 和密度 $\rho(p_A, T)$ 是软件的内置参数,其中变量 k 和 C_p 随温度的变化而变化,变量 ρ 随气压及温度的变化而变化。

对零值绝缘子建模时,将钢帽内瓷件上端和水泥胶合剂部位的电导率设为导体电导率,以模拟贯穿性缺陷,进一步构造零值绝缘子串时,将1片零值绝缘子依次置于1-7号,得到含1片零值的绝缘子串模型,模型所处的湿污环境通过改变污秽层的电导率参数来设置。

仿真时,采用软件中的电流场模块和固体传热模块,进行模型电场和热场的求解,同时引入焦耳热多物理场接口,将电场中传导电流和介电损耗产生的热量耦合到热场中作为热源,实现了电热耦

合。模型的边界条件为:在高压端绝缘子铁脚处施加70 kV电压,低压端绝缘子钢帽处施加0 kV电压;空气域为圆柱形,半径3 m,高度10 m;电场边界采用人工截断法设置无限元域,边界处电位为0 kV。模型的环境温度和初始温度为20 ℃,绝缘子串外表面与空气存在自然对流。

1.2 污秽层电导率参数设置

从现场可知,XP-100型瓷绝缘子下盘面凹槽内的污秽物积累可能会比上盘面更严重^[17-19],且由于凹槽深度不一,下盘面的污秽多呈现不均匀分布。基于此,在仿真中设置3种污秽分布方式:瓷件上表面有均匀湿污层,下表面清洁干燥;瓷件下表面有均匀湿污层,上表面清洁干燥;瓷件下表面污秽沿环带分布不均匀,上表面清洁干燥。文中假设各片绝缘子染污受潮程度一致,将瓷件表面污秽层厚度设置为(0.5±0.02) mm,根据文[20-22]设置不同湿污等级下污秽层均匀分布时的电导率参数,具体参数见表2。

表2 湿污层电导率参数

Table 2 Conductivity parameters of wet contamination

污秽等级	盐密/(mg·cm ⁻²)	表面局部电导率/(μS·cm ⁻¹)
I	0.04	31.1
II	0.10	82.9
III	0.20	162.2
IV	0.30	229.9

当污秽层沿环带分布不均匀时,文中将绝缘子下盘面划分为4个环带,见图2,确定各环带内局部电导率的方法为:根据一定污秽等级对应的盐密度和绝缘子下盘面表面积确定总盐密度,按照比例在环带内分配盐密度,计算出各环带内的盐密度后按照式(1)^[23-25]计算局部电导率,结果见表3,环带内灰密度均取1 mg/cm²。

$$\sigma = 230 \times \rho_{\text{ESDD}} \times \rho_{\text{NSDD}}^{0.575} \quad (1)$$

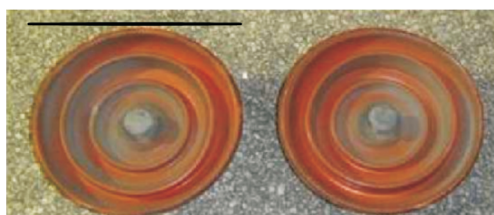


图2 绝缘子下盘面划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lower plate division of the insulator

2 零值绝缘子串的发热特性仿真分析

2.1 零值绝缘子位置对发热特性的影响

为分析零值绝缘子位置对绝缘子串发热特性

表3 污秽不均匀分布的电导率参数

Table 3 Conductivity parameters of unevenly distributed wet contamination

环带内盐密比值	盐密/(mg·cm ⁻²)	局部电导率/(×10 ⁻⁴ S·m ⁻¹)			
		环带1 (r≤37)	环带2 (r≤61)	环带3 (r≤88)	环带4 (r > 88)
均匀度1, 1:2:2:3	0.04	21.18	21.79	7.22	6.61
	0.10	52.95	54.47	18.06	16.53
	0.20	105.90	108.94	36.12	33.06
均匀度2, 1:2:3:4	0.04	16.94	17.43	9.08	7.05
	0.10	42.36	43.58	21.67	17.63
	0.20	84.72	87.15	43.34	35.27
均匀度3, 1:2:4:5	0.04	14.12	14.53	9.63	7.35
	0.10	35.30	36.31	24.08	18.37
	0.20	70.60	72.63	48.16	36.74

注:r为距中心轴的回转半径,mm。

的影响,按照盐密为0.04 mg/cm²时的表面局部电导率参数,在各片绝缘子上表面均匀设置湿污层,绝缘子下表面清洁干燥。通过仿真得到不同零值绝缘子串在I级湿污环境下的电压分布情况和温度分布情况,仿真结果见图3-6。

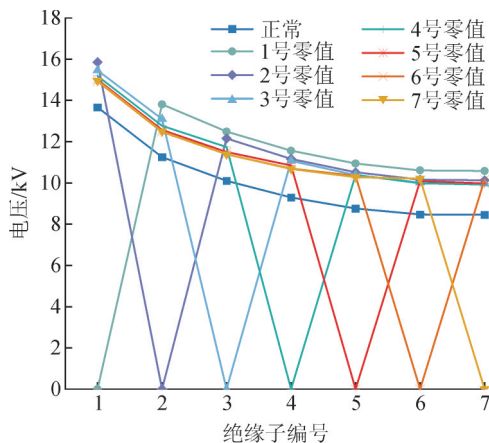


图3 含1片零值的电压分布曲线

Fig. 3 Voltage distribution curves of insulator strings with one zero-value insulator

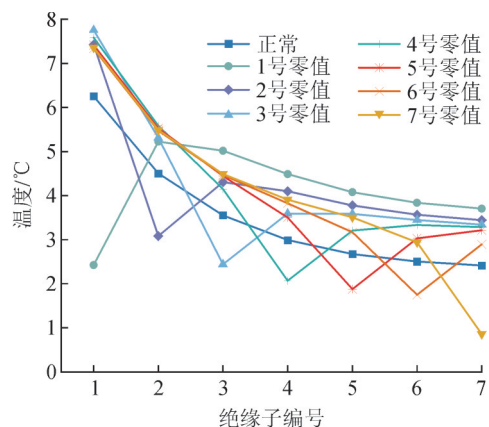


图4 含1片零值的温度分布曲线

Fig. 4 Temperature distribution curves of strings with one zero-value insulator

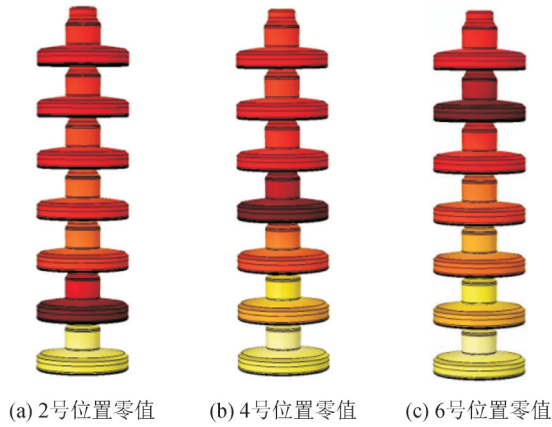


图5 绝缘子串外表面观测图

Fig. 5 Observation diagrams of external surface of insulator strings

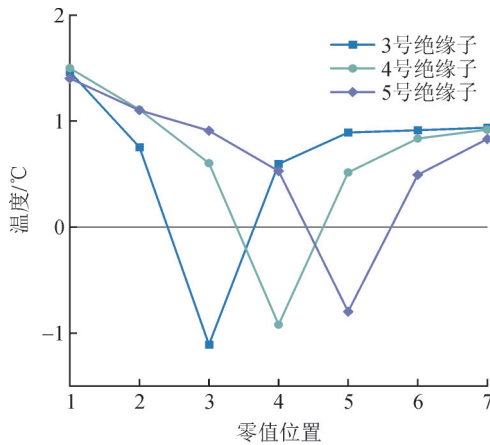


图6 较正常运行时绝缘子温度提升情况

Fig. 6 Temperature rising of insulators compared with normal operation

图3是含1片零值的零值绝缘子串电压分布曲线,可以看出,在不同的零值位置,电压曲线呈现逐渐下降的趋势;串中零值绝缘子的电压为0 kV,其他正常绝缘子的电压较正常运行时明显增加,计算得到正常绝缘子的平均电压增加幅度为1.67 kV。

在I级湿污环境下,含1片零值的零值绝缘子串外表面最高温度和最低温度分布情况具有一致性,各片绝缘子外表面最高温度的相对环境温升见图4。从图4中可以看出:零值绝缘子的温度在整串中最低,且其温度明显低于正常发热时的温度值,这两点“零值特征”目前常用于零值绝缘子的红外热成像检测,具体检测效果见图5,在图5所示红外图像中,零值绝缘子外表面较暗,其他绝缘子外表面较明亮。

分析图4、5可知,零值绝缘子串中正常绝缘子温度较正常运行时有明显增加,不同零值位置的影响较大,因此进一步处理图4中的数据:将不含零值时的绝缘子串温度作为基准温度,含零值时的绝缘

子温度与基准值作差,得到的结果见图6。

在图6中,以固定4号绝缘子为例,其高压侧出现零值时,越靠近高压侧对4号的温度提升作用越明显;其低压侧出现零值时,越靠近低压侧对4号的温度提升作用越明显;其相邻绝缘子出现零值时,对其温度提升幅度最小,因此图6中各曲线大致呈现“V”形。

2.2 污秽等级对绝缘子串发热特性的影响

在仿真中,通过设置污秽层的表面局部电导率参数,对盐密度为0.04、0.1、0.2、0.3 mg/cm²的I-IV级湿污环境进行模拟,分析不同污秽等级对零值绝缘子串发热特性的影响,绝缘子上表面均匀设置湿污层,下表面清洁干燥;固定零值位置在3号位置,零值绝缘子串在不同湿污等级下的电压分布和温度分布的仿真结果见图7-9。

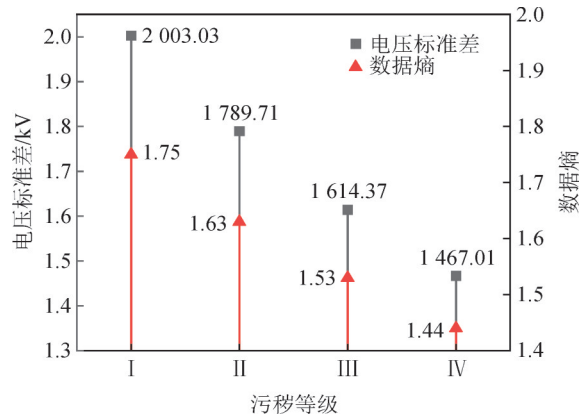


图7 不同污秽等级下绝缘子串的电压

Fig. 7 Voltage of strings under different pollution levels

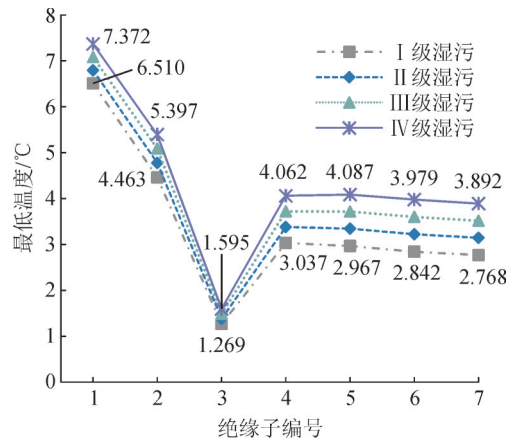


图8 不同湿污等级下绝缘子串温度分布曲线

Fig. 8 Temperature distribution curves of strings under different pollution levels

为衡量绝缘子串中电压分布的均匀性,可引入电压数据标准差的计算,同时引入式(2)、(3)计算电压数据的信息熵,结果见图7。标准差反映7片绝缘子电压的离散性,数据熵反映各片绝缘子电压与第一片绝缘子电压的相似性,从图7中可以看出,污秽

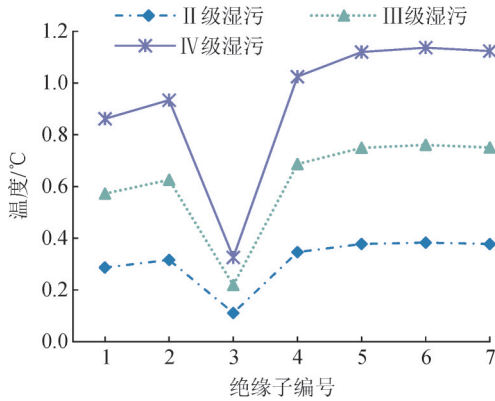


图9 湿污等级提高对各片绝缘子温度的影响

Fig. 9 Influence of increasing pollution level on insulator temperature

等级增大时,一串绝缘子电压数据的标准差逐渐减小,数据熵逐渐减小,表明绝缘子片上的电压分布更加均匀。

$$u_i = \frac{U_i}{U_1} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 7 \quad (2)$$

$$p = -\sum u_i \log_2(u_i) \quad (3)$$

图8是不同湿污等级下零值绝缘子串外表面的最低温度分布曲线,从图8可看出,随着污秽等级增大,绝缘子串整体温度增加,从I级污秽到IV级污秽,整体温度范围从1.269~6.510 °C提高到1.595~7.372 °C;进一步分析时,以I级污秽时的绝缘子串温度分布曲线为基准曲线,所有绝缘子的温度数据与对应的基准值作差,处理后的温度结果见图9。

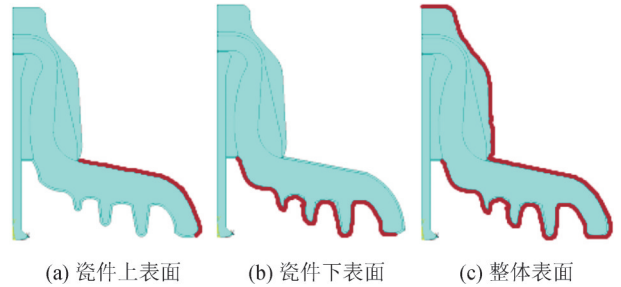
从图9可看出,随着污秽等级不断提高,零值绝缘子温度增加幅度最小,高压侧正常绝缘子温度增加幅度较大,低压侧正常绝缘子温度增加最为明显,这使得污秽等级增大时零值绝缘子与串中其他绝缘子的温差增大,如从I级污秽发展到IV级污秽,3号零值与6号绝缘子的温差会提高0.272、0.542、0.811 °C,这有利于零值绝缘子的红外热成像检测。

2.3 污秽分布方式对绝缘子串发热特性的影响

为研究不同污秽分布方式下零值绝缘子串的发热特性,当绝缘子串中3号绝缘子为零值时,通过分别在绝缘子瓷件上表面和下表面均匀设置湿污层,见图10(a)、(b),对不同盐密度下绝缘子串的发热特性进行对比分析;进一步在瓷件下表面沿环带不均匀设置湿污层,见图10(b),分析污秽分布均匀度对零值绝缘子串发热特性的影响。

仿真计算中从绝缘子整体表面的外边缘获取温度,见图10(c),得到均匀污秽层设置在上、下表面

时,不同盐密度下绝缘子串的外边缘温度分布图,见图11、12,可以看出在同一幅图中,曲线表明随着污秽等级不断增大,绝缘子串整体温度提高;在两幅图中,对比绝缘子污秽等级相同时的曲线,可以发现下表面污秽层使绝缘子串温度上升更严重,以盐密度为0.3 mg/cm²为例,上表面染污绝缘子串的温度范围在21.7~30.2 °C之间,而下表面染污绝缘子串的温度范围在23.5~36.4 °C之间。



(a) 瓷件上表面 (b) 瓷件下表面 (c) 整体表面

图10 绝缘子表面划分二维示意图

Fig. 10 2-D schematic diagram of the surface division of the insulator

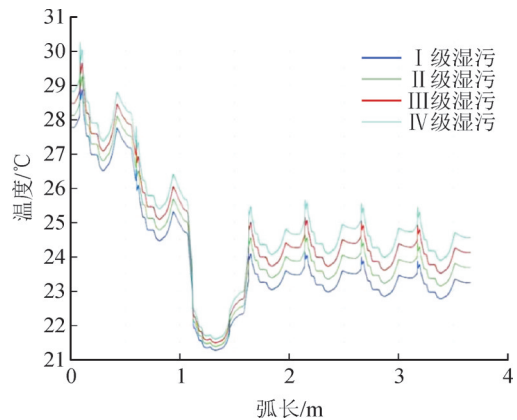


图11 上表面湿污时绝缘子串温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of insulator strings with upper wet contamination

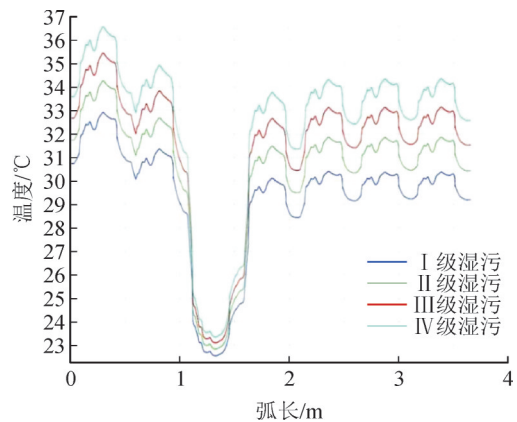


图12 下表面湿污时绝缘子串温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of insulator strings with lower wet contamination

对比图11、12中零值绝缘子与相邻绝缘子的温度分布情况,可以发现,当温度都取自绝缘子盘面

上的最小值时, 两者的温度差值最大, 因此将两幅图中3号和4号绝缘子的盘面最低温升数据进行对比, 见图13。从图13中可知, 较污秽层分布在上表面, 下表面污秽层使3号和4号绝缘子的温度差值更大; 随着污秽等级提高, 两片绝缘子的温度差值也越大。

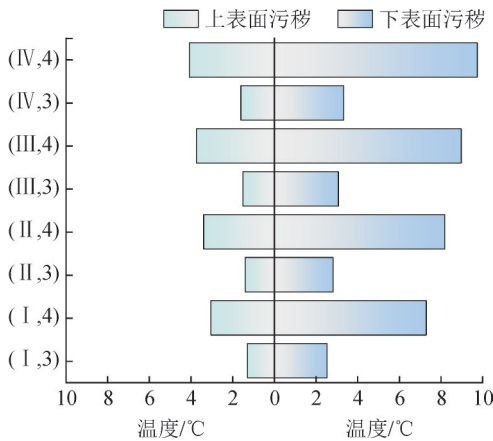
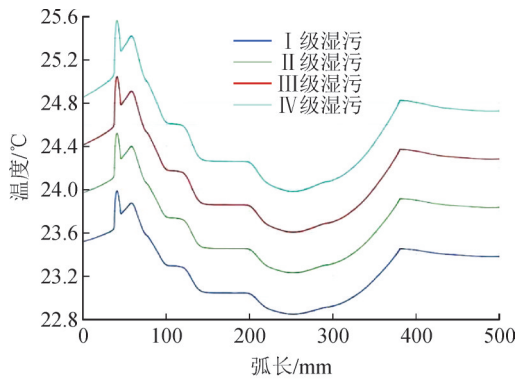


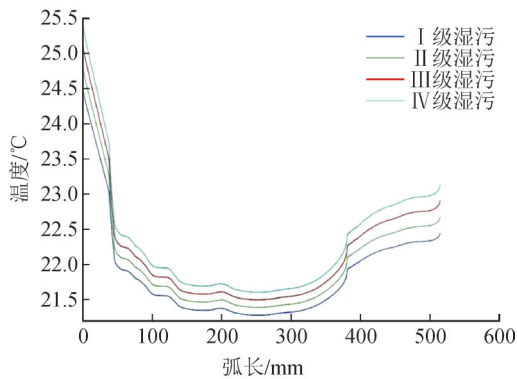
图13 3号和4号绝缘子的盘面最低温度对比

Fig. 13 Comparison of the minimum temperature on the plate of insulator No. 3 and No. 4

观察图11、12发现, 零值绝缘子和正常绝缘子的曲线形状具有明显差异, 故分别将两幅图中3号零值绝缘子和6号正常绝缘子的温度曲线单独取出, 见图14、15。



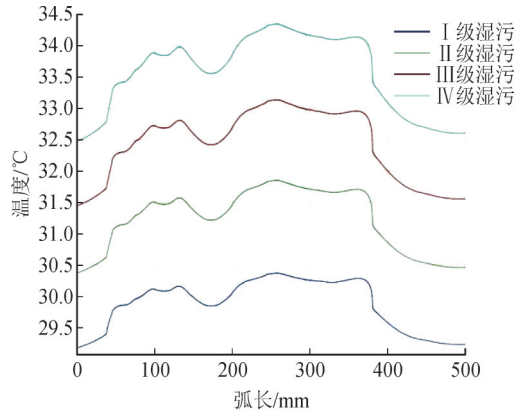
(a) 6号正常绝缘子



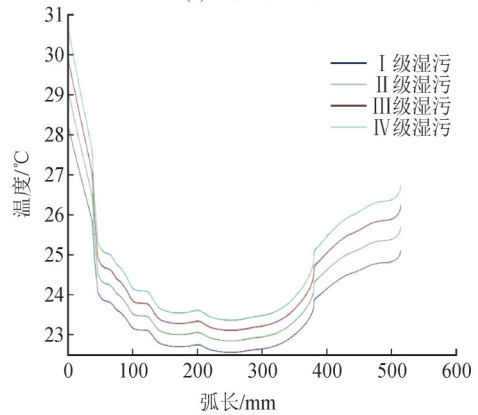
(b) 3号零值绝缘子

图14 上表面湿污时正常与零值绝缘子温度对比

Fig. 14 Temperature comparison of normal and zero-value insulators with upper wet contamination



(a) 6号正常绝缘子



(b) 3号零值绝缘子

图15 下表面湿污时正常与零值绝缘子的温度对比

Fig. 15 Temperature comparison of normal and zero-value insulators with lower wet contamination

图14中, 当均匀湿污层在上表面时, 6号正常绝缘子温度曲线从铁脚到钢帽的趋势为: 在铁脚部位温度逐渐上升, 在铁脚和盘面的连接位置出现温度最大值; 沿着绝缘子下盘面温度逐渐下降, 沿着绝缘子上盘面温度逐渐上升; 在钢帽部位温度又有较小下降, 以I级湿污为例, 6号绝缘子片的温度最大值和最小值差值达到1.2℃。

图14中3号零值绝缘子的温度曲线趋势为: 从铁脚沿着绝缘子下盘面温度逐渐下降, 到伞裙边缘出现温度最小值, 沿着绝缘子上盘面到钢帽顶端温度持续上升。与正常绝缘子相比, 零值绝缘子在铁脚和钢帽处的温度趋势发生改变, 反映了零值绝缘子与相邻绝缘子之间的热传导作用是导致零值绝缘子温升的主要热源; 零值绝缘子片的瓷件部位距离热源较远, 在空气自然对流下, 导致片内温度最大值和最小值的差值比正常绝缘子更大, 以I级湿污为例, 3号绝缘子片的温度最大值和最小值差值可达3.3℃。

图15中, 当均匀湿污层在下表面时, 6号正常绝缘子温度曲线从铁脚到钢帽的趋势为: 从铁脚沿着绝缘子下盘面温度逐渐上升, 在靠近伞裙边缘的

第2个凹槽处温度出现下降,达到一个极小值后又升高,在最外侧凹槽处即伞裙边缘达到温度最大值;后沿着上盘面至钢帽顶端温度逐渐降低。以 I 级湿污为例,6号绝缘子片的温度最大值和最小值差值为1.1℃。图15中3号零值绝缘子的温度曲线变化趋势与图14中相同,这表明污秽层设置在上、下表面不影响零值绝缘子表面的温度分布趋势。

当污秽层分布在上、下表面时,正常绝缘子盘面的温度变化趋势在图14、15中明显不同,表现为:污秽层在上盘面时,温度最大值位于绝缘子下盘面距中心轴回转半径19.96mm处;污秽层在下盘面时,上盘面整体发热大于下盘面,温度最大值位于上表面的伞裙边缘处。分析该现象的原因是:在串联电路中,当一个大电阻和小电阻串联时,根据 I^2R 可知,电阻值越大发热量越多,电阻值越小发热量越少,在材料导热性一致时,高电阻区温度提升较大,低电阻区温度提升较小,所以污秽层所在盘面是低电阻区,盘面剩余部分是高电阻区,在高电阻区会出现温度最高值。

为分析污秽层沿环面不均匀分布对零值绝缘子串发热特性的影响,文中计算不同环带内局部电导率的离散程度来衡量污秽分布均匀度的大小,在3种环带盐密度分配比例下,认为均匀度3>均匀度2>均匀度1,3种均匀度下绝缘子串外表面最高温度分布的仿真结果见图16。

在图16中,从均匀度1到均匀度3,不同环带内污秽分布得更加均匀,使得各绝缘子温度呈现下降趋势,图中温度与均匀度之间拟合曲线的斜率越大,表明温度降低越多,斜率越小表明温度降低越少;其中3号零值绝缘子的温度下降最少,其他正常绝缘子的温度下降较多,这会使得零值绝缘子与邻近绝缘子的温差略有减小;当污秽等级提高时,环面污秽均匀度的变化引起的温度变化幅度减小。

3 零值绝缘子串发热特性试验验证

3.1 试验装置及方法

绝缘子串长期暴露在大气中,经过一段时间的积污后,当连续大雾天气使得绝缘子表面污秽层饱和受潮时,绝缘子表面污秽的局部电导率发生变化使得绝缘子串的发热特性变化,前文利用仿真对此环境中污秽零值绝缘子串的发热特性进行了模拟计算,为检验仿真模型的正确性,文中开展红外成像试验对不同污秽度下饱和受潮的零值绝缘子串的发热特性进行测量验证。

相关试验在高压大厅中开展,试验平台的接线

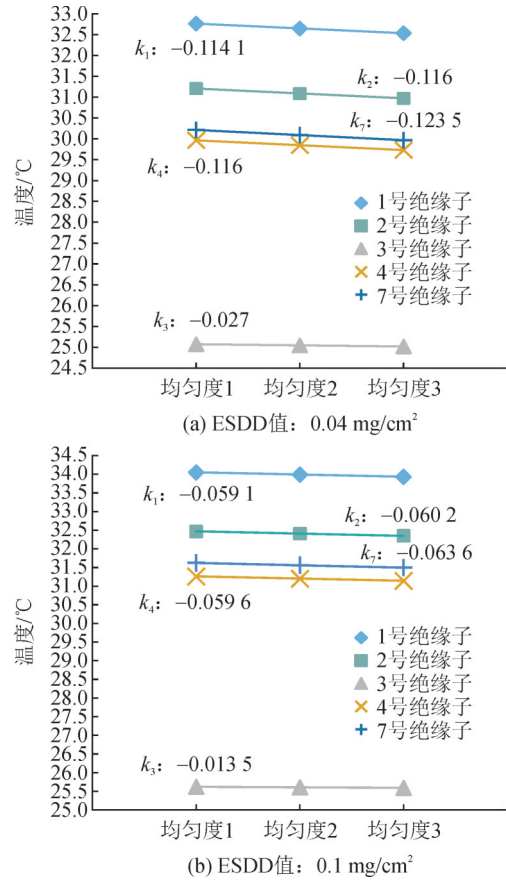


图16 环面不均匀湿污时绝缘子串最高温度曲线

Fig. 16 Maximum temperature curves of insulator string with unevenly distributed wet contamination

图见图17。图17的工作原理为:由调压器和工频变压器相结合产生高电压,经保护电阻和穿墙套管将高电压施加在人工气候室内的绝缘子串上,图17中利用分压器和电压测量回路对绝缘子串的运行电压进行监测。

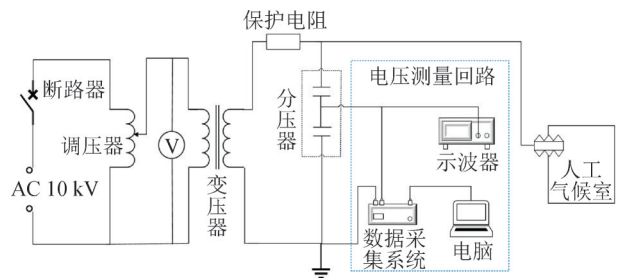


图17 试验接线图

Fig. 17 Experiment wiring diagram

试验中搭建了环境湿温度可控调节的小型人工气候室,其组成见图18。图18中采用AZ8901型湿温度监测仪测量气候室内的环境温度和湿度;超声波冷雾发生器用于改变室内湿度,室内放置的小型电暖风机用于加热空气。超声波加湿器的型号是工业MCH-09型,最大出雾量可达到9L/h;电暖风机的型号是HP20-K6-3,机身尺寸为350mm×135mm×

260 mm, 被放置在气候室地面的两处墙角以及悬挂在室内顶部。

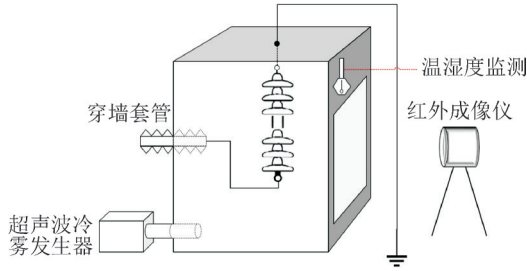


图 18 人工气候室

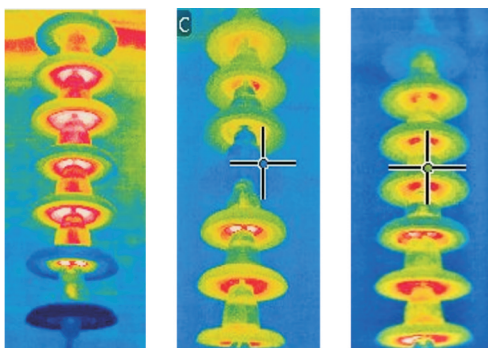
Fig. 18 Artificial climate chamber

试验样品为 XP-100 型瓷绝缘子, 采用人工固体涂污法在绝缘子瓷件上表面均匀涂污, 污秽层的等值附盐密度为 0.04、0.1、0.2 mg/cm² 三个等级, 灰密统一为 1 mg/cm²。

试验前先采用电暖风机加热空气, 使得室内检测温度维持在 20 °C 左右, 同时增大超声波加湿器的出雾量提高室内湿度到 92% 以上, 使绝缘子表面充分湿润; 当室内湿温度满足条件时开始加压, 采用均匀加压法, 对 7 片绝缘子构成的绝缘子串施加 70 kV 电压, 加压过程中控制气候室内的环境温度变化不超过 ±1 °C, 室内湿度变化不超过 ±2%。通过试验研究零值绝缘子分别位于 1、4、7 号位置时, 3 种盐密条件下零值绝缘子串的发热情况。

3.2 试验结果分析

利用红外成像仪拍摄绝缘子串表面的稳定温度分布, 以盐密为 0.1 mg/cm² 为例, 不同零值位置的绝缘子串红外热像图见图 19, 从图 19 中可以看出, 在污秽湿润且盐密适中时, 零值绝缘子表面温升明显低于正常绝缘子表面温升; 图 19(a)-(c) 的绝缘子串中最大相对环境温升分别达到 8.8、9.2、8.1 °C, 基本符合文中的仿真结果。



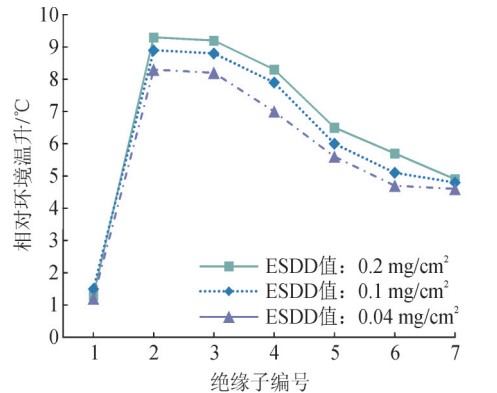
(a) 1号零值 (b) 4号零值 (c) 7号零值

图 19 绝缘子串的红外热像图

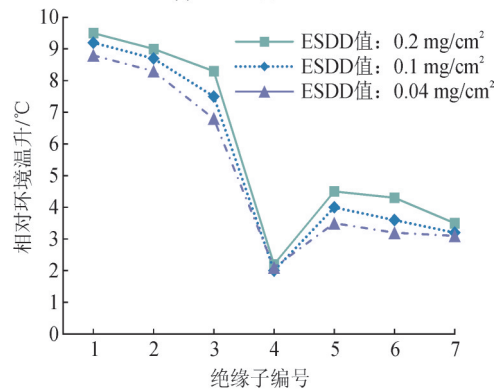
Fig. 19 Infrared images of insulator strings

在不同盐密下, 零值绝缘子在 1、4、7 号位置时的绝缘子串表面最大温升情况见图 20, 从图 20 可以

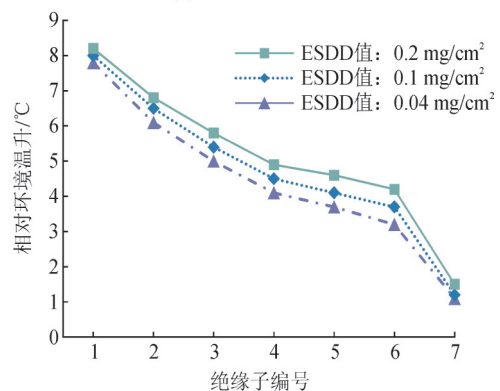
看出盐密度越大, 绝缘子串整体发热越严重; 当盐密从 0.04 mg/cm² 增大到 0.2 mg/cm², 图 20(a)-(c) 的绝缘子串中最高温度值分别提升了 1、0.7、0.5 °C, 基本符合文中仿真结果。



(a) 1号为零值绝缘子



(b) 4号为零值绝缘子



(c) 7号为零值绝缘子

图 20 不同零值位置的绝缘子串温升图

Fig. 20 Temperature rising diagrams of insulator strings at different zero-value positions

4 结论

文中对湿污环境中零值绝缘子串的发热特性进行了仿真和试验分析, 结论如下:

- 1) 在盐密为 0.04 mg/cm² 且湿污层饱和受潮的零值绝缘子串中, 零值绝缘子的温度低于串中正常绝缘子; 串中正常绝缘子的温度较正常运行时有明显

提升,提升幅度受零值位置影响较大。

2)零值绝缘子串的整体温度随污秽等级增加而提高,不同位置绝缘子的温度提高程度不同,当绝缘子串中3号为零值时,其低压侧绝缘子温度提高最多,高压侧次之,3号零值的温度提高最少。

3)对比绝缘子上、下表面污秽分布对温度的影响,下表面有污秽层的零值绝缘子串发热更为严重,使串中正常绝缘子和零值绝缘子的温差更大;两种污秽分布方式下,正常绝缘子的温度最大值和最小值分别出现在盘面高电阻区和盘面低电阻区,而零值绝缘子的温度分布趋势基本一致。

4)模拟绝缘子下表面污秽沿环面分布不均匀,当不均匀度提高时,零值绝缘子串发热更严重;污秽不均匀度对温度幅值的影响随着污秽等级提高而减弱。

参考文献:

- [1] 郭锐,田兵,张磊,等.适于机器人的输电线路盘形瓷绝缘子检测技术研究[J].电瓷避雷器,2017,276(2):141-147.
GUO Rui, TIAN Bing, ZHANG Lei, et al. Study on cap and pin porcelain insulator detecting technology suitable for robots on transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017, 276(2): 141-147.
- [2] 陈圣,徐博文,庚振新,等.基于几何形状及表面介电分布的GIL三支柱绝缘子优化设计[J].南方电网技术,2024,18(12):27-34.
CHEN Sheng, XU Bowen, GENG Zhenxin, et al. Optimization design of GIL three-pillar insulators based on geometric shape and surface dielectric distribution[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 27-34.
- [3] 刘悦,黄新波,刘天娇.基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(3):167-177.
LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2024, 45(3): 167-177.
- [4] 常彬,吴旭涛,闫振华,等.一起220 kV瓷绝缘子钢帽炸裂故障分析[J].电工材料,2021(3):28-29.
CHANG Bin, WU Xutao, YAN Zhenhua, et al. Analysis on the cracking failure of a steel cap of 220 kV porcelain insulator[J]. Electrical Engineering Materials, 2021(3): 28-29.
- [5] 苑利,赵锐,谭孝元,等.基于红外成像技术的零值绝缘子检测[J].高压电器,2018,54(2):97-102.
YUAN Li, ZHAO Rui, TAN Xiaoyuan, et al. Zero insulator detection based on the infrared imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 97-102.
- [6] 陈勇,郭俊峰,邹小均.基于红外测温的零值和污秽绝缘子快速检测试验研究[J].高压电器,2015,51(6):191-194.
CHEN Yong, GUO Junfeng, WU Xiaojun. Fast detection of zero insulator and polluted insulator based on infrared temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 191-194.
- [7] 周立玮,叶昊亮,李特,等.可见光干扰下复合绝缘子红外测试温度分布特征研究[J].智慧电力,2025,53(1):31-37.
ZHOU Liwei, YE Haoliang, LI Te, et al. Temperature distribution characteristics of composite insulator infrared test under visible light interference[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 31-37.
- [8] 张东东,常泽中,万武艺,等.基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究[J].电力工程技术,2024,43(4):193-201.
ZHANG Dongdong, CHANG Zezhong, WAN Wuyi, et al. Zero-value insulator detection technology based on local electric field[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 193-201.
- [9] 常波,张启哲,王胜辉,等.动车组车顶隔离开关用支柱绝缘子污秽状态下的电场分布特性研究[J].电测与仪表,2024,61(4):81-85.
CHANG Bo, ZHANG Qizhe, WANG Shenghui, et al. Research on the electric field distribution characteristics under polluted conditions of EMU roof isolation switch post insulators[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 81-85.
- [10] 刘嵘,辜超,周超,等.基于红外热像的瓷绝缘子劣化诊断技术研究[J].浙江电力,2025,44(1):116-123.
LIU Rong, GU Chao, ZHOU Chao, et al. Research on a degradation diagnosis technology for porcelain insulators using infrared thermography[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 116-123.
- [11] 张也,彭子健,付强,等.环境湿度对瓷质绝缘子串电压分布及红外热像检测的影响分析[J].电网技术,2018,42(4):1342-1349.
ZHANG Ye, PENG Zijian, FU Qiang, et al. Analysis of environment humidity influence on voltage distribution and infrared thermal image detection of porcelain insulator strings[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1342-1349.
- [12] 王欣,李凯迪,陈凡辉,等.污秽对红外成像法测零值绝缘子影响的有限元分析[J].绝缘材料,2019,52(1):84-90.
WANG Xin, LI Kaidi, CHEN Fanhui, et al. Finite element analysis on influence of pollution on detecting faulty insulators by infrared imaging method[J]. Insulating Materials, 2019, 52(1): 84-90.
- [13] 万亚玲,李娜,李唐兵,等.应用盘面特征识别红外检测盲区的零值绝缘子[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(3):89-95.
WAN Yaling, LI Na, LI Tangbing, et al. Identification of zero-value insulators in infrared detection blind zone using disk characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 89-95.
- [14] 程洋,夏令志,李志飞,等.基于红外成像法的零值瓷绝缘子检测[J].绝缘材料,2019,52(3):74-79.
CHENG Yang, XIA Lingzhi, LI Zhifei, et al. Detection of faulty porcelain insulator based on infrared imaging method[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 74-79.
- [15] 徐德智,崔俊杰,袁冬,等.基于高光谱技术的绝缘子污秽等级检测[J].电网与清洁能源,2025,41(8):40-45.
XU Dezhi, CUI Junjie, YUAN Dong, et al. Insulation contamination grade detection based on hyperspectral technology[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(8): 40-45.
- [16] 唐捷,黄志都,朱登杰,等.交叉跨越段输电线路绝缘子发热检测方法研究[J].电网与清洁能源,2024,40(6):115-120.
TANG Jie, HUANG Zhidu, ZHU Dengjie, et al. A study on the heat detection method of insulators in the cross section of transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 115-120.
- [17] 李特,王少华,梅冰笑,等.浙江地区复合绝缘子与标准型盘形悬式绝缘子自然积污特性差异及其环境影响因素[J].电瓷避雷器,2019(6):221-229.
LI Te, WANG Shaohua, MEI Bingxiao, et al. Natural contamination

- WANG Jiao. Simulation analysis of the influence of main parameters of CVT on harmonic transmission characteristics[J]. Guangxi Electric Power, 2023, 46(1): 81-86.
- [17] 吴茂林, 崔翔. 电压互感器宽频特性的建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 1-5.
- WU Maolin, CUI Xiang. Modeling of wide frequency characteristic of potential transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 1-5.
- [18] 陈少伟, 崔翔, 由建, 等. 互感器宽频传递特性的散射参数测量法[J]. 电气应用, 2006(2): 22-24.
- CHEN Shaowei, CUI Xiang, YOU Jian, et al. Scattering parameter measurement for broadband transfer characteristics of transformers[J]. Electrical Applications, 2006(2): 22-24.
- [19] 张广勇. 1 000 kV 电容式电压互感器宽频等效电路建模和应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG Guangyong. Research on wideband equivalent circuit modeling and application of 1 000 kV capacitive voltage transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [20] 梁贵书, 杜欣宇, 谢宇廷, 等. 电容式电压互感器的宽频无源电路模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 179-185.
- LIANG Guishu, DU Xinyu, XIE Yuting, et al. Broadband passive circuit model of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 179-185.
- [21] 司马文霞, 王惠, 杨鸣, 等. 考虑中间变压器饱和特性的电容式电压互感器宽频非线性模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 5034-5043.
- SIMA Wenxia, WANG Hui, YANG Ming, et al. Wideband and nonlinear model of capacitive voltage transformer considering the saturation of intermediate transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5034-5043.
- [22] 陈一惊, 赵壮民, 李军浩. 冲击电压下 CVT 传递特性及其缺陷故障检测研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 89-94.
- CHEN Yicong, ZHAO Zhuangmin, LI Junhao. CVT voltage transfer characteristics under impulse voltage & its fault detection[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 89-94.
- [23] STUMBERGER G, POLAJZER B, STUMBERGER B, et al. Evaluation of experimental methods for determining the magnetically nonlinear characteristics of electromagnetic devices[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 4030-4032.
- [24] 王惠. 考虑中间变压器饱和特性的电容式电压互感器宽频非线性模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- WANG Hui. Wideband nonlinear model of capacitive voltage transformer considering the saturation characteristics of the intermediate transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- 刘坤雄(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事互感器在电能质量测量中的应用研究(E-mail: liukunxiong123@163.com)。
- 曾翔君(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气工程(通信作者)(E-mail: zengxj@xjtu.edu.cn)。

~~~~~

(上接第 112 页)

- tion comparison between composite insulators and standard disc suspension insulators in Zhejiang province and environmental factor effects on the contamination differences[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 221-229.
- [18] 卢明, 刘泽辉, 向玲, 等. 不同电压等级下绝缘子积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 186-191.
- LU Ming, LIU Zehui, XIANG Ling, et al. Study on contamination depositing characteristics of insulators under different voltage degrees[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 186-191.
- [19] 万小东, 南敬, 徐涛, 等. 人工积污试验系统及绝缘子积污特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1861-1869.
- WAN Xiaodong, NAN Jing, XU Tao, et al. Artificial contamination test system and contamination characteristics of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1861-1869.
- [20] 宋云海. 基于表面电导的绝缘子积污在线监测系统[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- SONG Yunhai. The study based on the insulator pollution deposit on-line monitoring of surface conductance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [21] 刘刚, 胡倩楠, 陈锡阳. 由表面电导实现绝缘子污秽程度监测的可行性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1321-1326.
- LIU Gang, HU Qiannan, CHEN Xiyang. Feasibility analysis of monitoring the insulator surface contamination based on surface conductivity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1321-1326.
- [22] 刘宇, 李光茂, 朱晨, 等. 湿热环境异常发热复合绝缘子电
- 热耦合仿真分析[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 31-39.
- LIU Yu, LI Guangmao, ZHU Chen, et al. Electrothermal coupling simulation analysis of composite insulators with abnormal heat in humid and hot environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 31-39.
- [23] 刘云鹏, 张凯元, 付炜平, 等. 不同湿度下低值瓷质绝缘子的发热特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1741-1749.
- LIU Yunpeng, ZHANG Kaiyuan, FU Weiping, et al. Heating characteristics of deteriorated porcelain insulator under different humidities[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1741-1749.
- [24] 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验: GB/T 4585—2024[S]. 2025.
- Artificial pollution tests for high-voltage insulators to be used on AC systems: GB/T 4585—2024[S]. 2025.
- [25] 张志劲, 张东东, 袁超, 等. 污秽成分对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1970-1976.
- ZHANG Zhijin, ZHANG Dongdong, YUAN Chao, et al. Effect of contamination component on AC flashover performance of insulator string XP-160[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1970-1976.
- 王胜辉(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断方面的研究工作(E-mail: hdwsh@ncepu.edu.cn)。
- 买佳敏(1999—), 女, 硕士, 主要从事瓷绝缘子劣化机理及检测方法研究(通信作者)(E-mail: 960080540@qq.com)。