

基于分布电导的绝缘子直流电场和发热机理研究

李唐兵^{1,2}, 邹礼斌^{2*}, 况燕军³, 胡睿哲¹

(1. 南昌科晨电力试验研究有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘 要: 针对直流输电系统中绝缘子劣化引发的电场畸变与异常温升问题, 基于多导体系统理论构建了分布电导矩阵, 通过电场仿真研究了 U550BP/240T 型瓷绝缘子串在直流电压下的分布电导特性和电场分布; 通过热-电耦合模型及直流带电实验, 揭示了绝缘子串的发热机理。结果表明: 正常绝缘子间的分布电导基本相等, 约为 15×10^{-10} S/m, 零值绝缘子金具间的电导值骤增至约 108×10^{-10} S/m, 金具-导线、金具-地间的分布电导随空间距离的增大而减小, 绝缘子串电压呈“U”形分布, 零值绝缘子分压降至总电压的 1.4%~1.6%, 其轴向场强峰值衰减至正常值的 5.5%~7.1%, 导致其邻位绝缘子的场强与分压显著上升; 通过 120 kV 直流带电实验验证, 沿绝缘子串的发热曲线与电压的“U”形分布曲线趋势相近, 验证了电压对绝缘子发热起主导作用。零值绝缘子铁帽发热均匀, 正常绝缘子铁帽中下部温升显著, 仿真与试验所得绝缘子串的发热特征曲线相关系数大于 0.95, 最大误差为 12.38%, 验证了分布电导对绝缘子电场分布及发热的决定性作用, 可为直流系统绝缘子的状态监测提供理论依据。

关键词: 绝缘子; 零值; 分布电导; 直流电场; 发热

Research on DC electric field and heating mechanism of insulator based on distributed conductance

LI Tangbing^{1,2}, ZOU Libin^{2*}, KUANG Yanjun³, HU Ruizhe¹

(1. Nanchang Kechen Electric Power Test Research Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Aiming at the problem of electric field distortion and abnormal temperature rise caused by insulator degradation in DC transmission system, a distributed conductance matrix was constructed based on the multi-conductor system theory, and the distributed conductance characteristics and electric field distribution of U550BP/240T porcelain insulator string under DC voltage were studied by electric field simulation. The heating mechanism of insulator string was revealed by thermal-electric coupling model and DC live test. The results show that the distributed conductance between normal insulators is basically equal, about 15×10^{-10} S/m, while the conductance between the fittings of zero-value insulators increases sharply to about 108×10^{-10} S/m. The distributed conductance between fittings and conductors, as well as between fittings and ground, decreases with the increase of spatial distance. The voltage along the insulator string shows a U-shaped distribution. For the zero-value insulator, the partial voltage drops to 1.4%–1.6% of the total voltage, and the peak value of axial field strength attenuates to 5.5%–7.1% of the normal value, resulting in a significant rise in the field strength and partial voltage of the adjacent insulator. Through the 120 kV DC live test, it is verified that the heating curve along the string is similar to the U-shaped distribution curve of voltage, which verifies that the voltage plays a leading role in the heating of insulator. The iron caps of zero-value insulators exhibit uniform heat generation, while those of normal insulators show a significant temperature rise in the middle and lower parts. The correlation coefficient between the heat generation characteristic curves of the insulator string obtained from simulation and experiment is greater than 0.95%, with a maximum error of 12.38%, which verifies the decisive role of distributed conductance in the electric field distribution and heating of insulator, and can provide theoretical basis for the state monitoring of insulators in DC system.

Key words: insulators; zero-value; distributed conductance; DC electric field; heat generation

0 引言

直流输电凭借低成本、低损耗、大容量优势在我国快速发展,已成为新型电力系统建设的关键技术之一^[1-2]。作为输电线路的核心绝缘部件,绝缘子的性能直接关系着电力系统的运行安全^[3-4]。近几年,直流输电线路因绝缘子故障而停运的事故频发,绝缘子的年均劣化率呈上升趋势。研究表明,绝缘子因长期承受高电压及复杂环境应力易发生劣化^[5-6],导致局部电场畸变和异常温升问题,严重威胁电网稳定性^[7-8]。此外,绝缘子串会与周围空间导体建立电气量的耦合关系,在交流电场下该电气量由分布电容和分布电导共同作用,而在直流电场下分布电导占主导,且分布电导影响着绝缘子的电场分布及发热。由于绝缘子劣化后其分布电导有所不同,同时伴随着电场及发热的异常,通过分析绝缘子电场分布及温度变化来判别劣化位置成为一种可靠手段。

近年来,针对绝缘子在运行时的发热状况已有许多研究。有学者针对复合绝缘子芯棒劣化时的异常发热进行了仿真和人工缺陷实验,并对复合绝缘子的电场及发热特征进行相关研究^[9-11]。对于瓷绝缘子方面,文献[12]通过仿真获得沿串的马鞍形电压分布曲线来解释实验中不同劣化程度和湿度下瓷绝缘子串的发热特征,还针对单片绝缘子铁帽的发热特征进行了深入研究。文献[13]研究发现零值瓷绝缘子位于不同位置时,绝缘子串的温度分布规律不同。针对铁帽温升识别劣化方法存在的漏检现象,文献[14]提出了结合铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子红外识别方法,具有较高的实际工程应用价值。文献[15-17]也对复合绝缘子及瓷绝缘子的发热状况进行了仿真及实验研究。

目前,关于绝缘子的电场分布和发热特征已有广泛的研究,然而通过分布电导研究直流电压下绝缘子的电场分布,进而研究其发热特征的方法仍缺乏足够的技术性探讨。为此,本文通过建立直流绝缘子串的热-电耦合模型,计算绝缘子串的分布电导,揭示其电场分布和发热机理,最后开展绝缘子串的直流带电实验,验证直流电压下绝缘子串的电场分布及发热机理,以期为直流绝缘子的状态监测提供理论依据。

1 基本原理

1.1 分布电导计算原理

在直流输电线路中,绝缘子串的金具与周围杆塔、导线、大地、均压环在空间上存在电气量耦合关系,即绝缘子金具与周围导体存在分布电导。为计算这一分布电导,将由绝缘子、绝缘子金具与周围杆塔、导线、大地、均压环组成的系统抽象成多导体系统(如图1所示),来说明多导体系统中的分布电导耦合关系。系统中假设绝缘子表面洁净,即不考虑盐、粉尘等在潮湿环境中电解出的自由离子在恒定电场作用下定向移动形成表面泄漏电流的影响。

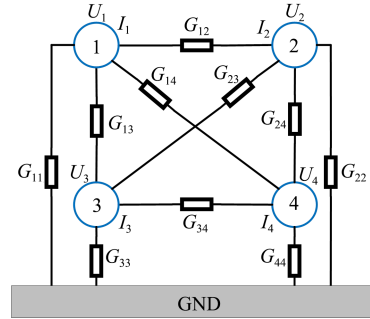


图1 多导体系统示意图

Fig.1 Multi-conductor system diagram

以图1中导体1和导体2之间的分布电导为例建立分布电导矩阵,其节点电压方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_1 = G_{11}U_1 + G_{12}(U_1 - U_2) \\ I_2 = G_{22}U_2 + G_{12}(U_2 - U_1) \end{cases} \quad (1)$$

整理方程组为矩阵形式,得到式(2)。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} + G_{12} & -G_{12} \\ -G_{12} & G_{12} + G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵式(2)可简写为 $\mathbf{I}=\mathbf{G}\mathbf{U}$,其中列向量 $\mathbf{I}$ 各元素为流入导体1、2的电流,矩阵 $\mathbf{G}$ 为导体1、2的集总电导参数,列向量 $\mathbf{U}$ 为导体1、导体2的对地电压。

令 $\mathbf{G}=\mathbf{G}'$,其中 $\mathbf{G}'$ 可表示为式(3)。

$$\mathbf{G}' = \begin{bmatrix} G'_{11} & G'_{12} \\ G'_{21} & G'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} + G_{12} & -G_{12} \\ -G_{12} & G_{12} + G_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: $\mathbf{G}$ 为导体1、导体2的集总电导矩阵,为多导体系统中的一个局部子矩阵。 $\mathbf{G}$ 中各元素简写为 $\mathbf{G}'$ 各元素,其中 $G'_{11}=G_{11}+G_{12}$, $G'_{21}=G'_{12}=-G_{12}$, $G'_{22}=G_{12}+G_{22}$ 。

若令 I_1 作为激励(不为零), $U_2=0$,则 $G'_{11}=I_1/U_1$,在有限元仿真中, U_1 的值可在后处理时获取;再令 I_1 作为激励(不为零), $U_1=0$,则 $G'_{12}=I_1/U_2$,同样 U_2 的值

为已知,即可得到导体1和导体2之间的电导矩阵。若模型中需要求解 n 对导体之间的分布电导,则需 $2n$ 次仿真计算;导体1、导体2可以是多导体系统中的任意两段导体,实际系统中导体数应远大于图1中的导体数。

1.2 直流绝缘子发热原理

在图2(a)所示交流电路中,绝缘子发热形式有3种:电介质损耗发热、传导电流发热和表面泄漏电流发热^[18-19]。交流工况下绝缘子各类型发热产生的热量满足式(4)所示关系。

$$\begin{cases} P_j = \frac{U_n^2}{R_j} = U_n^2 \omega C_0 \tan \delta \\ P_i = \frac{U_n^2}{R_i} \\ P_w = \frac{U_n^2}{R_w} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: P_j 、 P_i 、 P_w 分别为电介质损耗发热量、传导电流发热量、表面泄漏电流发热量; U_n 为第 n 片绝缘子承受的电压; R_j 、 R_i 、 R_w 分别为介质损耗电阻、体电阻、表面电阻; C_0 为绝缘子等效电容; $\tan \delta$ 为介质损耗因数; ω 为交流输电系统的角频率。

交流线路绝缘子的容性特征对电介质损耗发热起着重要作用,但直流线路绝缘子在直流稳态电场下的容性效应为零($C_0 \rightarrow 0$),则其发热机制可简化为纯阻性模型(图2(b)),发热形式为传导电流发热和表面泄漏电流发热。

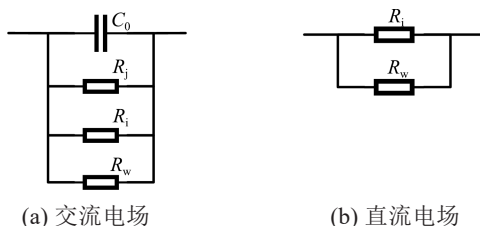


图2 交、直流电场下绝缘子阻抗电路模型

Fig.2 Impedance circuit model of insulators under AC and DC electric fields

1.3 有限元仿真计算原理

有限元仿真软件中电流场计算的广义基本控制方程为式(5)。

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = Q_j \\ J = \sigma E + J_e \\ E = -\nabla \cdot V \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: σ 为电导率,单位为S/m; E 为电场强度,单位为V/m; V 为电势,单位为V; J 为电流密度,单位

为A/m²; Q_j 为电流源,单位为A/m³,无外部源时其值为0; J_e 为外部电流密度,如施加的是激励电流,则单位为A/m²。

在稳态无电流源的情况下,即恒定电场下模型中导体、电介质自身不产生电荷时, $Q_j=0$, $J_e=0$,则式(5)可简化为式(6)。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (6)$$

有限元仿真软件中热-电耦合基本控制方程为式(7)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = -\rho C_p \mu \cdot \nabla T + Q_e \quad (7)$$

式(7)中: ρ 为材料密度,单位为kg/m³; C_p 为比热容,单位为J/(kg·K); k 为导热系数,单位为W/(m·K); μ 为周围流体的速度矩阵,单位为m/s; Q_e 为电流场产生的热源,单位为W/m³,其计算公式如式(8)所示。

$$Q_e = J \cdot E \quad (8)$$

2 直流绝缘子串分布电导研究

2.1 分布电导计算模型

本文以9片U550BP/240T型大吨位悬式瓷绝缘子串为研究对象构建三维有限元仿真模型,考虑相对介电常数和电导率的影响,对模型进行电流场仿真^[20-22]。单片绝缘子模型的结构如图3所示,其中公称直径 D 为400 mm,公称结构高度 H 为240 mm,爬电距离 L 为650 mm。

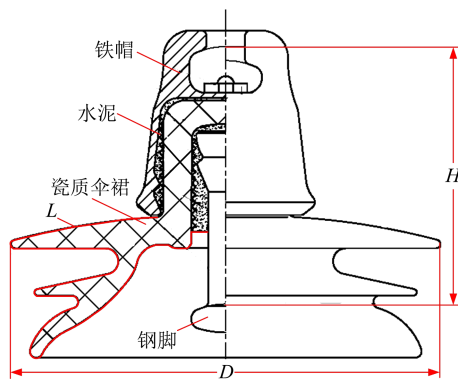


图3 单片绝缘子模型结构

Fig.3 Single insulator model structure

绝缘子串的几何模型如图4所示,模型置于15 m×15 m×15 m的空气域中,绝缘子钢脚端连接5 m导线施加直流高压,上方绝缘子铁帽经短导体接地。

采用图1所示多节点等效导体系统表征金属部件间的电场耦合关系,对导体网络进行拓扑化处

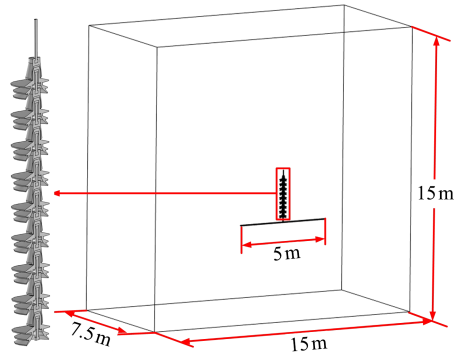


图4 绝缘子串仿真几何模型
Fig.4 Simulation geometric model of insulator string

理,节点间通过分布电导 $G_{ij}(i,j=1\sim4)$ 形成泄漏电流通路, G_{ii} 表征节点的对地导纳。值得注意的是,实际导体数量应超出图中所示的导体数量,分布电导存在于金具间、金具-导线间和金具-接地导体间等区域。仿真模型中各材料的电气参数见表1。

表1 各材料的电气参数

Table 1 Electric parameters of each material

材料	相对介电常数	电导率/(S/m)
金属导体	1×10^{10}	1×10^7
水泥胶合剂	14	1.7×10^{-7}
瓷件	5.6	1×10^{-12}
空气	1	1×10^{-10}

对图4模型进行网格剖分,如图5所示。对主要研究对象绝缘子串、导线及接地导体采用自由四面体网格“极细”剖分策略,对于空气域采用自由四面体网格“常规”剖分策略。根据网格数据统计,网格单元数共计约198万个,对网格单元进行质量偏度检测,得到平均单元质量为0.656 1,单元质量直方图符合正态分布,说明网格剖分结果较为精细且合理。

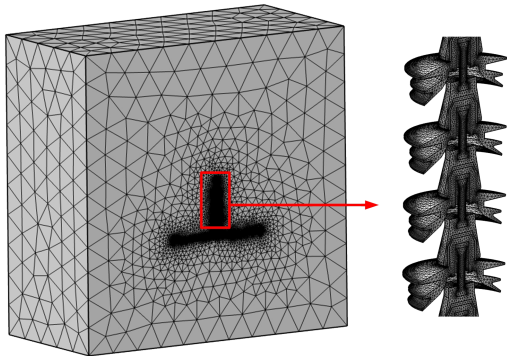


图5 模型网格剖分结果
Fig.5 Model mesh subdivision results

2.2 分布电导仿真结果

从高压侧到接地侧依次将绝缘子编号为1~9,得到与接地侧间隔绝缘子片数对绝缘子串金具间分布电导的影响规律如图6所示。从图6可以看出,间隔1~4片,绝缘子串的分布电导曲线呈现准稳态特征。结合图4分析,由于接地侧绝缘子金具由铁帽与接地导体相连,其有效表面积相较于其他绝缘子金具(由铁帽与钢脚相连)更大,导致其他绝缘子金具与接地侧绝缘子金具之间的分布电导增大,因此图6中各曲线末端呈现轻微上升趋势。

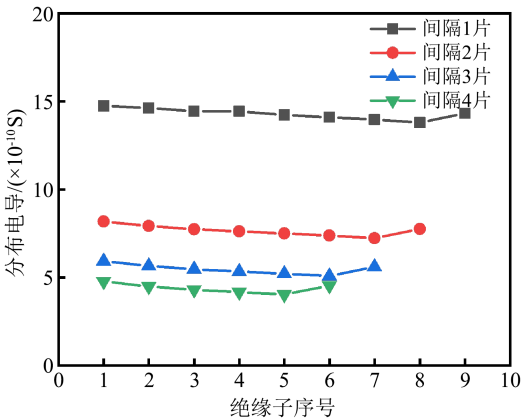


图6 绝缘子串金具间分布电导
Fig.6 Distributed conductance between insulator string fittings

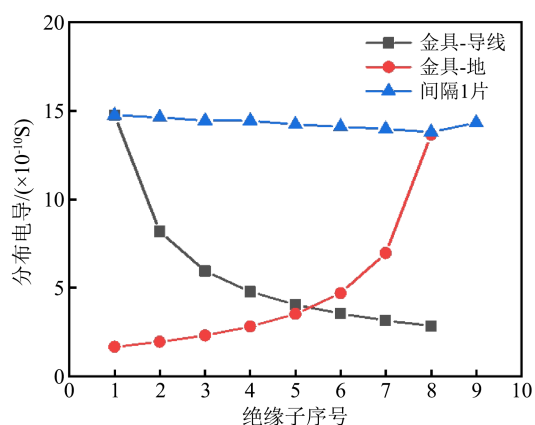
表2为间隔1~4片时绝缘子金具间的电导倍率。从表2可知,间隔2~4片绝缘子金具间实际的电导倍率比串联电路大,这说明直流绝缘子之间并不是简单的串联关系,每个金具都与周围导体存在分布电导,由于分布电导的存在,电流不完全沿着绝缘子串流动,而是随电导支路在空间中泄漏。

表2 绝缘子金具间电导倍率

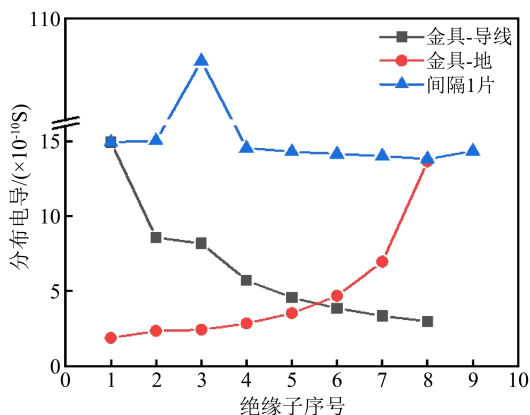
Table 2 Conductance multiplier between insulator fittings

间隔片数	1	2	3	4
电导值/($\times10^{-10}$ S)	14.238	7.656	5.448	4.355
实际倍率	1.000	0.536	0.381	0.305
串联电路倍率	1.000	0.500	0.333	0.250

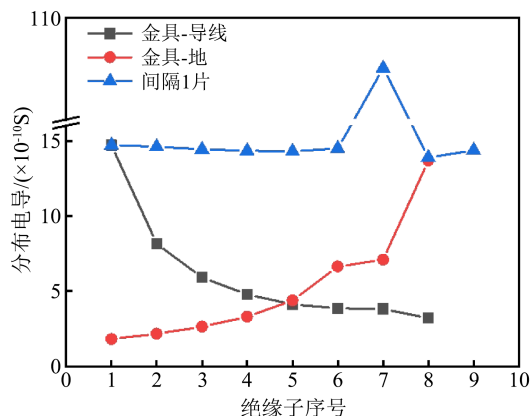
间隔1~4片绝缘子金具间电导值变化规律在图6及相关说明中已有论述,现取间隔1片绝缘子金具间的电导值来探究模型中不同导体间分布电导的变化规律,计算正常,第3、7片绝缘子零值工况时绝缘子串分布电导的分布情况,结果如图7所示。其中零值绝缘子的阻值设定为2 M Ω ,正常绝缘子的阻值约为10 G Ω 。



(a) 正常工况



(b) 第3片零值



(c) 第7片零值

图7 绝缘子串分布电导的分布曲线

Fig.7 Distribution curves of distributed conductance of insulator string

从图7(a)可以看出,正常工况下,绝缘子串金具-地之间的分布电导随绝缘子序号的增大而增大,绝缘子金具-导线之间的分布电导随绝缘子序号的增大而减小,即绝缘子金具-地、绝缘子金具-导线之间的分布电导均随空间距离增大而减小,与文献[23]的研究结论相符合。

对比图7(a)与图7(b)~(c)可知,间隔1片正常绝

缘子金具间的分布电导约为 15×10^{-10} S/m,而间隔1片零值绝缘子金具间的电导骤增至约 108×10^{-10} S/m,对应图7(b)~(c)曲线中零值绝缘子位置出现的明显“平台”阶段。

基于上述求解的分布电导数值构建电导电路模型,如图8所示。图8中 $R_{g1} \sim R_{g8}$ 表示绝缘子金具的对地电导, $R_{L1} \sim R_{L8}$ 表示金具-导线间的电导, $R_1 \sim R_9$ 为相邻绝缘子片间电导,由于间隔 ≥ 2 片绝缘子时金具间的分布电导数值较低(如图6所示),在建立电导电路模型中可忽略。模型设定 $R_1 \sim R_8$ 为等值参数,但实际上会受到生产工艺公差、绝缘材料老化等的影响。

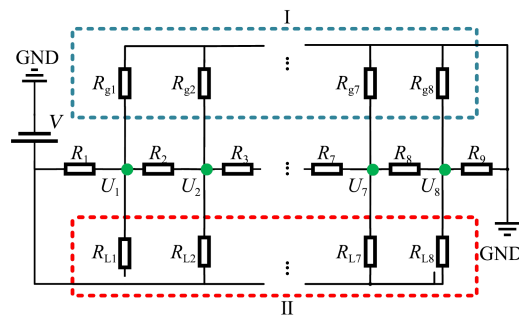


图8 电导电路模型

Fig.8 Conductance circuit model

2.3 分布电导对直流绝缘子电压的影响

为研究正常、劣化绝缘子串的电场特性,利用图4仿真模型在导线上施加120 kV的直流稳态电压,第9片绝缘子铁帽接地,通过参数化调整瓷件与水泥层的电导率和相对介电常数模拟零值绝缘子^[24],得到绝缘子串电压分布如图9所示。在绝缘子纵向轴线处设置观测线,获得绝缘子串的轴向场强分布曲线,如图10所示。

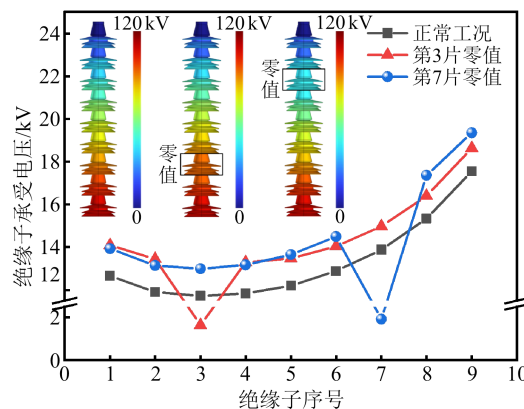


图9 绝缘子串电压分布曲线

Fig.9 Voltage distribution curves of insulator strings

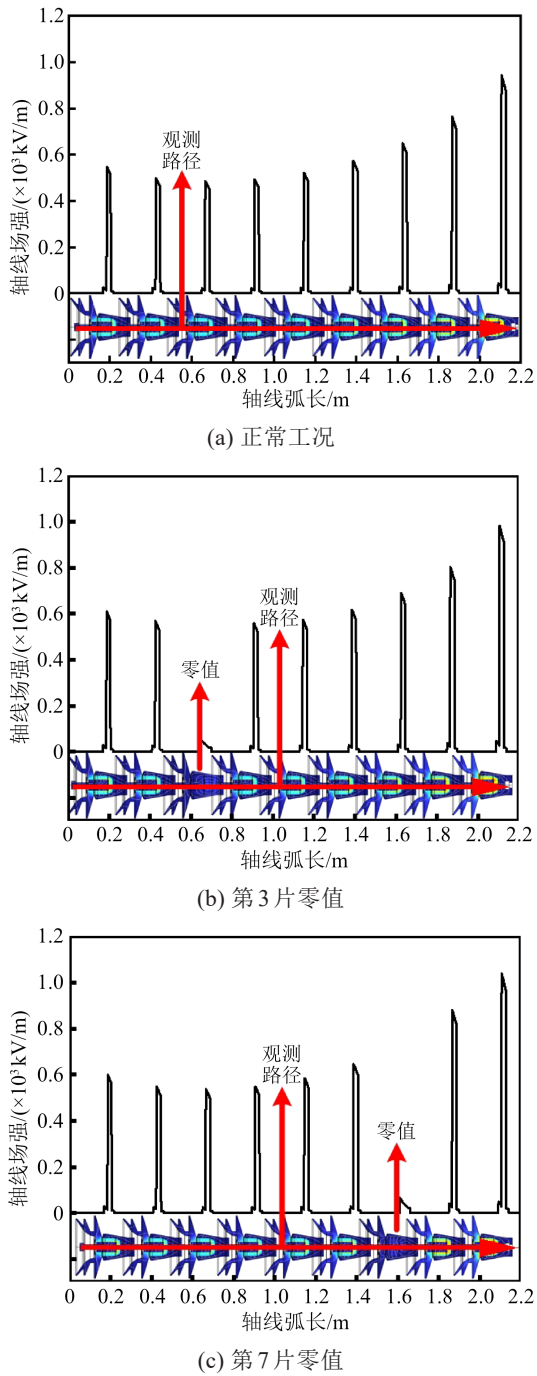


图10 绝缘子串的电场强度分布云图

Fig.10 Distribution cloud maps of electric field strength of insulator strings

分析图9~10测试结果可知：

(1)图9中正常,第3、7片零值绝缘子的电压分布特征与图10的绝缘子串场强分布高度对应,如图9中正常工况绝缘子串电压曲线和图10(a)各绝缘子轴向场强的峰值变化均呈“U”形分布特征。

(2)零值绝缘子分压和轴向场强峰值降低。图9中第3、7片零值绝缘子承受电压占比分别下降了

约1.4%和1.6%,导致其余绝缘子承受电压增大,其中第9片绝缘子承受电压分别上升了约18.0%和19.0%;零值绝缘子处的场强远低于正常绝缘子,这与文献[14]的研究结论相符。图10(b)和10(c)中第3、7片零值绝缘子的轴向场强峰值分别骤降至约 0.52×10^2 kV/m和 0.67×10^2 kV/m,为正常值的5.5%~7.1%。

(3)绝缘子所处位置轴向场强峰值越大,分压越大。在正常工况时,第9片绝缘子的分压最大,占比约为17.2%,轴向场强峰值约为 9.44×10^2 kV/m;绝缘子劣化后承受的电压和轴向场强峰值减小,使得其他绝缘子的轴向场强峰值增大,承受电压升高。

利用基于仿真获取的分布电导构建等效电路模型来求解120 kV稳态直流电压下绝缘子串电压分布,将等效电路及有限元仿真模型各自计算得到的绝缘子串电压绘制成曲线,结果如图11所示。从图11可以看出,等效电路与有限元仿真模型计算得到的电压分布结果具有良好的一致性,采用相对误差 δ 、相关系数 R 及决定系数 R^2 评估两条曲线吻合度,计算公式如式(9)所示,相关统计参数如表3所示。

$$\begin{cases} \delta = \frac{|V_1 - V_2|}{V_1} \times 100\% \\ R = \frac{\sum (V_1 - \bar{V}_1)(V_2 - \bar{V}_2)}{\sqrt{\sum (V_1 - \bar{V}_1)^2 \sum (V_2 - \bar{V}_2)^2}} \\ R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_1 - V_2)^2}{\sum_{i=1}^n (V_2 - \bar{V}_2)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: V_1 和 V_2 分别为电导电路与仿真模型的电压; $\bar{V}_1$ 和 $\bar{V}_2$ 分别为电导电路与仿真模型的电压平均值。

从表3可以看出,3种工况下 R 和 R^2 的值均大于0.95,最大相对误差出现在零值工况下第3片零值绝缘子位置,其他工况下的相对误差都在10%以内。由于有限元仿真中将绝缘子串中各材料的相对介电常数也计算在内,即考虑了各元件分布电容的影响,使得有限元仿真模型和电导电路计算的电压曲线不可避免地存在误差。强统计相关性说明了分布电导模型的合理性,分布电导决定了绝缘子串的电位分布,这与文献[2]的结论相符合,验证了模型的有效性。

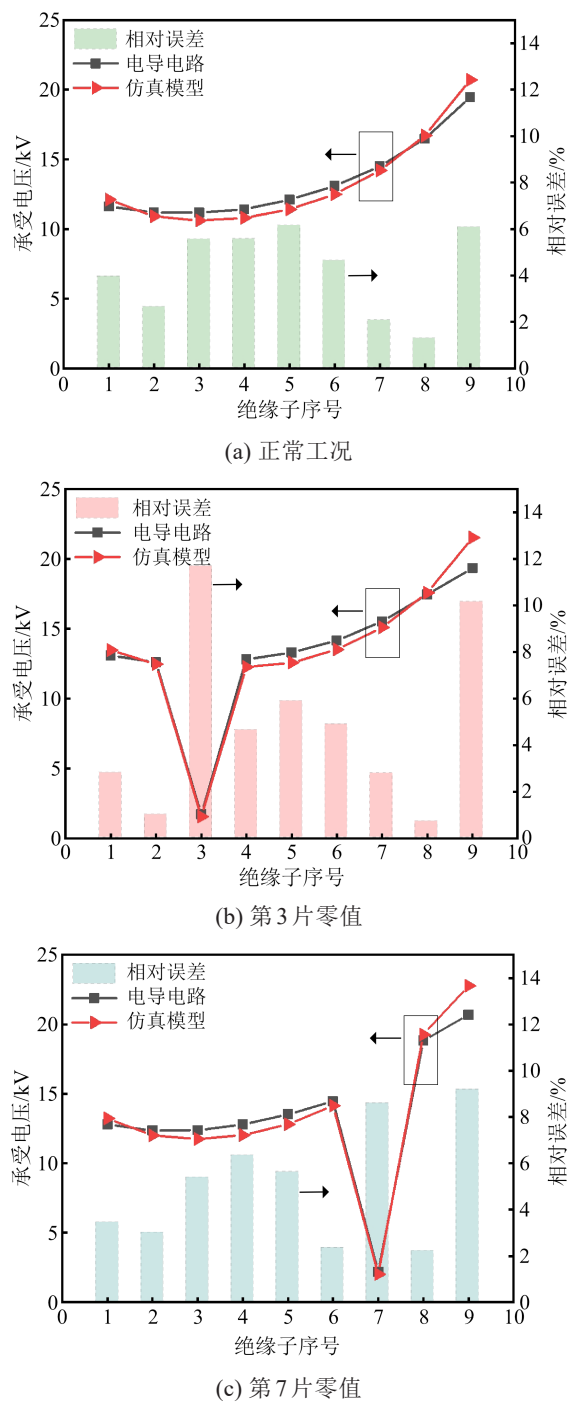


图 11 电导电路与仿真模型的电压分布对比

Fig.11 Comparison of voltage distribution for conductance circuit and simulation models

表 3 电压分布的一致性统计参数

Table 3 Consistency statistical parameters of voltage distribution

参数	$\delta_{\max}/\%$	R	R^2
正常工况	6.13	0.991	0.975
第3片零值	11.70	0.988	0.971
第7片零值	9.18	0.991	0.974

3 直流绝缘子发热特征

3.1 直流绝缘子带电实验

试验在国网江西省电力有限公司电力科学研究院的高压实验室开展,试验设备连接如图 12 所示。采用 U550BP/240T 型瓷绝缘子构建 9 片绝缘子串样品,表面清洗干净并作干燥处理。正常绝缘子的电阻为 $(20\pm 5)\text{ G}\Omega$,零值绝缘子的电阻约为 $2\text{ M}\Omega$ 。复合绝缘子起悬挂及绝缘作用。FLIR T1040 型红外热像仪的热灵敏度 $\leq 0.03^\circ\text{C}$ 。瓷绝缘子串底端距离地面不小于 5 m 并串联保护电阻以确保安全,环境温度为 $(33.1\pm 0.5)^\circ\text{C}$,湿度约为 71%。直流高压发生器对最下面的绝缘子施加 120 kV 直流电压,并在复合绝缘子串与瓷绝缘子串中间部位连接金具接地,施压 2 h 后达到热平衡。试验内容主要是获取正常绝缘子串和第 3、7 片绝缘子零值工况下绝缘子串达到热平衡后的红外热成像。

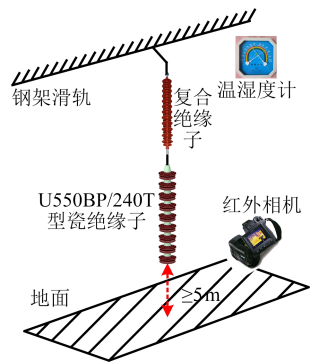


图 12 试验设备连接示意图

Fig.12 Schematic diagram of experimental equipment connections

绝缘子串的热分布特征如图 13 所示。从图 13 可以看出,加压 2 h 后绝缘子串的发热集中于铁帽区(铸铁具有高导电导热性),瓷件因低导热性及高热容而没有出现明显温升。零值工况试验中,第 3、7 片零值绝缘子出现铁帽低温暗色特征,这是由于零值绝缘子的阻值极低,发热功率显著降低,其出现的微弱温升是因相邻正常绝缘子的热传导作用。值得关注的是,第 9 片绝缘子因承担最高电压梯度,其铁帽全域呈现显著温升特征。正常绝缘子串和第 3、7 片零值工况绝缘子串的绝缘子最高温度分别达 35.9°C 、 36.1°C 、 36.3°C ,较相邻绝缘子高约 0.6°C 、 0.7°C 、 0.8°C ,这是由于从导线侧到接地侧,绝缘子内流通的传导电流因分布电导分流作用而越来越小,根据焦耳热(Q)计算公式 $Q=I^2R$ (I 为电流, R 为电阻),在

接地侧绝缘子的焦耳热效应最高。

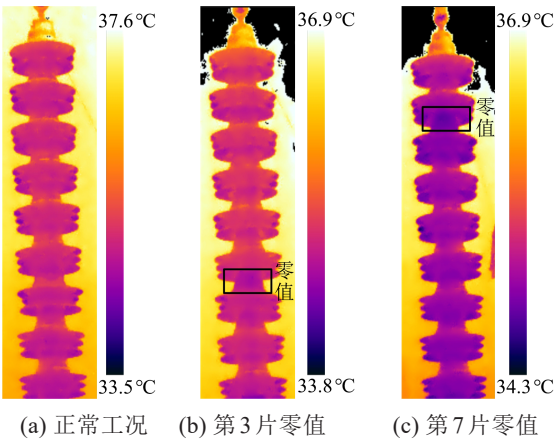


图13 绝缘子串的红外热成像

Fig.13 Infrared thermography of insulator strings

3.2 有限元仿真绝缘子发热分析

为揭示3.1节所述绝缘子串的发热机理，建立绝缘子串的热-电单向耦合仿真模型。绝缘子发热是由于绝缘子的阻性分量在电流通过时产生了热量，考虑到仿真的计算效率，以及绝缘子串本身为回转对称几何体，热-电单向耦合仿真模型采用二维轴对称仿真模型。环境初始温度设定为33℃以适配试验条件^[25]。各材料的电、热场参数按表1、表4数据赋值。

表4 各材料热场参数

Table 4 Thermal field parameters of each material

材料	导热系数 /(W/(m·K))	恒压热容 /(J/(kg·K))	密度 /(kg/m ³)
金具/导线	80	450	7 680
水泥胶合剂	5	800	3 600
瓷件	2	825	2 300

将三维电场仿真后获得的各绝缘子电位分布数值作为有限元模型边界条件^[26-27]，具体是将电场仿真得到的各个绝缘子金具的电位作为边界条件施加在二维轴对称热-电耦合仿真模型中各绝缘子金具上，模型中绝缘子发热也是由施加的电场边界条件产生。

绝缘子串的温度仿真结果如图14所示。绝缘子金具与周围导体存在分布电导耦合关系，绝缘子的电流沿着绝缘子串从金具处泄漏，该泄漏电流与金具耦合周围导体的分布电导大小有关，因此每一片绝缘子的传导电流并不相同，从而导致图14中各绝缘子发热量不同。

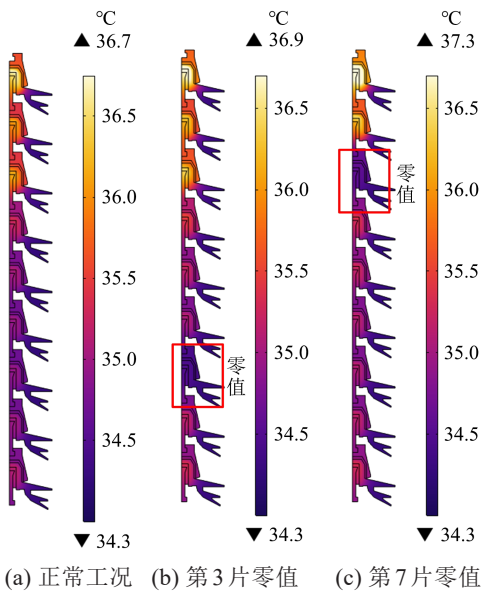


图14 仿真温度分布云图

Fig.14 Simulated temperature distribution cloud maps

(1)单片绝缘子发热分析

仿真得到第3片绝缘子在正常、零值工况下的温度分布云图如图15所示。在正常工况(图15(a))下，绝缘子铁帽中下方有明显的亮斑，最高温度为35.1℃；绝缘子为零值(图15(b))时，其铁帽发热均匀，最高温度为34.7℃，仅依靠相邻绝缘子的热传导作用，温升相较更低，盘面几乎无温升。图15结果与图13中正常绝缘子铁帽下部有温升亮斑，而零值绝缘子铁帽几乎无温升亮斑现象相符，且与文献[13]的研究结论相符。

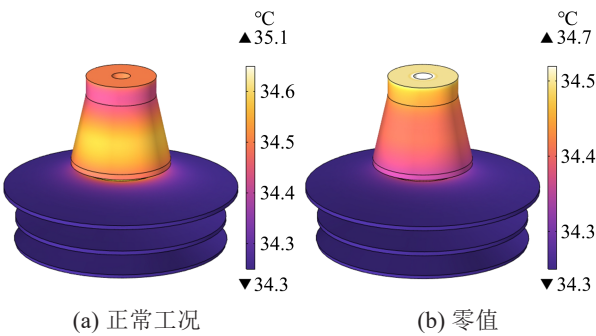


图15 第3片绝缘子发热状况

Fig.15 Heating condition of the third insulator

(2)沿串发热分析

为消除环境温度造成的影响，引入式(10)所示温度变化率 S 进行分析^[5]，其中 T_1 为绝缘子铁帽处采集温度， T_2 为环境温度。

$$S = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \times 100\% \quad (10)$$

各工况下仿真与试验绝缘子串的发热特征曲线如图 16 所示,相关统计参数如表 5 所示。

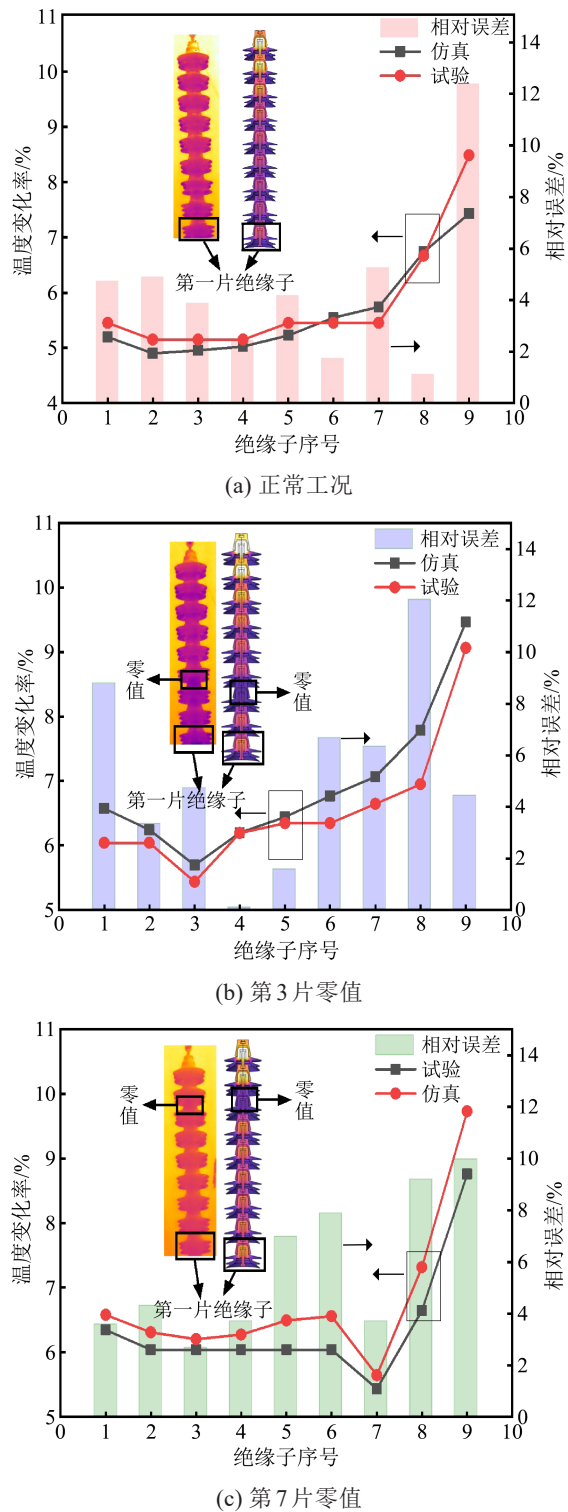


图 16 绝缘子发热特征曲线

Fig.16 Insulator heating characteristic curves

从表 5 可知,各工况下仿真与试验绝缘子串发热特征曲线的皮尔逊相关系数 R 均大于 0.95,决定系数 R^2 均大于 0.8,最大相对误差 $\delta_{\max}$ 为 12.38%,均

表 5 发热曲线统计参数

Table 5 Statistical parameters of heating curve

参数	$\delta_{\max}/\%$	R	R^2
正常工况	12.38	0.952	0.852
第3片零值	12.03	0.977	0.809
第7片零值	9.95	0.993	0.812

在可接受范围内,其中第 7 片零值工况下绝缘子串发热特征曲线的相关系数达到 0.993。分析误差存在的原因有:

(1)试验过程中直流电压波动形成的分布电容使得绝缘子呈现类似交流工况时的容性特征,从而影响绝缘子发热。

(2)仿真设定绝缘子金具表面洁净无污秽,但实际绝缘子表面存在着难以清洗的污秽,污秽电解产生的自由离子在恒定电场作用下定向移动形成表面泄漏电流,从而对绝缘子发热造成影响。

根据图 9 绝缘子串电压分布曲线以及图 10 绝缘子串电场强度分布,图 16 中绝缘子串的发热特征也随着绝缘子承受电压的变化而变化。各绝缘子发热量随其承受压的增大而增大,零值绝缘子在承受电压极低情况下,其自身几乎不发热,这也是红外监测图像中零值绝缘子铁帽呈暗色的原因。

4 结论

本文结合有限元仿真、电导电路模型和现场试验研究了在正常、劣化工况下直流绝缘子串的分布电导、电场特性以及发热状况,主要得到以下结论:

(1)直流绝缘子串金具与周围空间导体存在复杂的电导耦合关系,正常绝缘子之间的分布电导基本相同,绝缘子金具-地、金具-导线间的分布电导沿串方向随空间距离增大而减小;利用电导电路模型和仿真模型分别计算绝缘子串的电位分布,所得曲线拟合统计参数 $\delta_{\max}$ 小于 10%, R 、 R^2 大于 0.95,表明分布电导对绝缘子串的电位分布具有决定性作用。

(2)直流绝缘子串电压呈“U”形分布,绝缘子所处位置轴向场强峰值越大,分压越大;绝缘子劣化后承受电压和轴向场强峰值骤降,使得其他绝缘子的轴向场强峰值增大,承受电压升高。

(3)绝缘子承受电压对其发热起主导作用,各绝缘子发热量随其承受电压的增大而增大;耐压状态下零值绝缘子自身几乎不发热;正常绝缘子的铁

帽中下部发热明显,而零值绝缘子的铁帽发热较为均匀,仿真与试验所得绝缘子串发热特征曲线的 $\delta_{\max}$ 为12.38%, R 大于0.95, R^2 大于0.8,误差来源于试验过程中直流电压波动形成的电容电流以及绝缘子表面污秽电解形成的离子电流。

参考文献 References

- [1] 王子江,张兆毅,樊友平,等.基于近似熵变化量判据的混合直流输电系统纵联保护方案[J].电力系统保护与控制,2024,52(21):1-12.
WANG Zijiang, ZHANG Zhaoyi, FAN Youping, et al. A pilot protection scheme for a hybrid HVDC transmission system based on an approximate entropy change criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 1-12.
- [2] 金子惠,耿文婷,李永红,等.特高压输电工程植被恢复过程中树种适宜性研究——以酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段为例[J].水土保持通报,2025,45(1):199-207,253.
JIN Zihui, GENG Wenting, LI Yonghong, et al. Vegetation restoration and screening with suitable tree and grass taxa for extra-high voltage transmission projects—taking Gansu section of Jiuzhou-Hunan ±800 kV DC transmission line project as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 199-207, 253.
- [3] 张语桐,吴泽华,徐家忠,等.特高压GIS用单支撑绝缘子绝缘结构优化设计[J].电工技术学报,2023,38(1):258-269.
ZHANG Yutong, WU Zehua, XU Jiazhong, et al. Optimization design of insulation structure for post insulator in UHVAC GIS [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 258-269.
- [4] 刘嵘,戴建强,李珊,等.多种布设方式下交流220 kV线路瓷绝缘子劣化判别的仿真与实测研究[J].绝缘材料,2024,57(7):127-134.
LIU Rong, DAI Jianqiang, LI Shan, et al. Simulation and measurement of deteriorated porcelain insulator discrimination for AC 220 kV transmission lines under multiple layout methods[J]. Insulating Materials, 2024, 57(7): 127-134.
- [5] 孙瑞筱,胡玉耀,蒋兴良,等.不同污秽影响下劣化瓷绝缘子发热规律与红外特征分析[J].电工技术学报,2025,40(11):3591-3603.
SUN Ruixiao, HU Yuyao, JIANG Xingliang, et al. Analysis of temperature rise and infrared feature of faulty porcelain insulators under different contamination effects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(11): 3591-3603.
- [6] 韩学春,潘灵敏,李颖洁,等.不同工况下输电线路劣化复合绝缘子空间电场特性研究[J].自动化与仪器仪表,2024(9):211-214,220.
HAN Xuechun, PAN Lingmin, LI Yingjie, et al. Study on spatial electric field characteristics of the deteriorated composite insulator of the transmission lines under different operating factors[J]. Automation and Instrumentation, 2024(9): 211-214, 220.
- [7] 刘洪吉,耿三平,王军,等.特高压交流输电线路瓷绝缘子劣化分析[J].电瓷避雷器,2022(6):159-164.
LIU Hongji, GENG Sanping, WANG Jun, et al. Aging analysis of porcelain insulators used in UHV AC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 159-164.
- [8] 邵九,傅洪全,王官健.基于电场分布法和支撑向量机的复合绝缘子劣化检测方法研究[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(6):798-803.
SHAO Jiu, FU Hongquan, WANG Guanlian, et al. Research on degradation detection method of composite insulator based on electric field distribution method and SVM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(6): 798-803.
- [9] 李特,陶瑞祥,张锐,等.典型发热缺陷复合绝缘子红外特征及无人机红外测试参数选择[J].高电压技术,2022,48(3):865-875.
LI Te, TAO Ruixiang, ZHANG Rui, et al. Infrared characteristic of typical composite insulator heating defects and selection of fieldunmanned aerial vehicle infrared test parameters[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 865-875.
- [10] 李欣然,黄齐林,陈晓琳,等.基于不同发热特征的复合绝缘子老化原因分析[J].绝缘材料,2023,56(8):100-107.
LI Xinran, HUANG Qilin, CHEN Xiaolin, et al. Ageing analysis of composite insulators based on different heating characteristics [J]. Insulating Materials, 2023, 56(8): 100-107.
- [11] 张东东,万武艺,黄宵宁,等.基于热-电-流耦合的芯棒碳化复合绝缘子发热特性研究[J].电网技术,2023,47(7):3010-3018.
ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, HUANG Xiaoning, et al. Heat generation characteristics of mandrel carbonized composite insulators based on heat-electricity-flow coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3010-3018.
- [12] 裴少通,马子儒,刘云鹏,等.500kV输电线路劣化瓷绝缘子非线性发热特性的红外分析[J].高压电器,2024,60(1):33-40.
PEI Shaotong, MA Ziru, LIU Yunpeng, et al. Infrared analysis of nonlinear heating characteristics of deteriorated porcelain insulator of 500 kV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 33-40.
- [13] 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.
- [14] 李唐兵,龙洋,万亚玲,等.基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子红外检测方法[J].红外技术,2018,40(12):1193-1197,1205.
LI Tangbing, LONG Yang, WAN Yaling. Infrared image synthetic diagnosis method of faulty insulators based on temperature rise characteristics of steel caps and disks[J]. Infrared Technology, 2018, 40(12): 1193-1197, 1205.
- [15] WANG C, LI T F, TU Y P, et al. Heating phenomenon in unclean composite insulators[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 65: 48-56.
- [16] HU W, TU Y X, LIU J B, et al. Finite element simulation analysis of infrared thermal wave detection on composite insulators [C]//2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Suzhou, China: IEEE, 2019: 566-569.

- [17] DOUFENE D, BOUAZABIA S, BOUHADDICHE R. Heating dissipation study of a pollution layer on a cap and pin insulator [C]//2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering. El Oued, Algeria: IEEE, 2018: 1-4.
- [18] 胡丹晖, 周学明, 易福明, 等. 在役瓷绝缘子串温度梯度分布相关性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 172-179.
HU Danhui, ZHOU Xueming, YI Fuming, et al. Correlation analysis of temperature gradients distribution of porcelain insulator strings in service[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 172-179.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 邱文严, 陈军锋, 周文正. 复杂天气下直流穿墙套管电场分布仿真研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 49-53.
QIU Wenyan, CHEN Junfeng, ZHOU Wenzheng, et al. Simulation on electric field distribution of DC wall bushing under complex weather conditions[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 49-53.
- [22] 徐晓彬, 刘雪飞, 马国真, 等. 基于有限元的 500 kV 复合绝缘横担电场分布仿真分析[J]. 绝缘材料, 2023, 56(8): 94-99.
XU Xiaobin, LIU Xuefei, MA Guozhen, et al. Simulation analysis on electric field distribution of composite cross arm based on finite element method[J]. Insulating Materials, 2023, 56(8): 94-99.
- [23] 曹晓斌, 陈友, 唐平, 等. ± 800 kV 输电线路直流绝缘子串分布电导模型及其对电压和泄漏电流的影响研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 86-93.
CAO Xiaobin, CHEN You, TANG Ping, et al. Insulator string conductance distribution model of ± 800 kV DC transmission line and its influence on the voltage and leakage current[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 86-93.
- [24] ZHENG W G, MA Y L, GENG L N, et al. Identification of deteriorated porcelain insulators for transmission lines based on electric field distribution measurement method[J]. Journal of Electronic Materials, 2025, 54: 4874-4881.
- [25] 侯磊, 曲锋, 祁天星, 等. 基于温度场分析的直流电能表计量准确度研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 188-193.
HOU Lei, QU Feng, QI Tianxing, et al. Research on measurement accuracy of DC electricity meter based on temperature field analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 188-193.
- [26] 陈轩, 韩学春, 宋恒东, 等. 复杂工况下零值瓷绝缘子的空间电场分布特性研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1): 183-187.
CHEN Xuan, HAN Xuechun, SONG Hengdong, et al. Research on the spatial electric field distribution characteristics of zero value porcelain insulators under complex working conditions[J]. Automation and Instrumentation, 2025(1): 183-187.
- [27] 郭卫, 孙致远, 门业堃, 等. 基于 COMSOL 电-热-流场分布仿真的高压电缆终端缺陷分析[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 100-106.
GUO Wei, SUN Zhiyuan, MEN Yekun, et al. Defect analysis of high voltage cable terminal based on COMSOL electric-thermal-flow field distribution simulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 100-106.

收稿日期: 2025-06-05; 修回日期: 2025-07-15。

作者简介:

李唐兵(1983—), 男(汉族), 湖南株洲人, 正高级工程师, 主要从事输变电设备状态检测技术的研究。

通信作者: 邹礼斌(1999—), 男(汉族), 江西赣州人, 硕士生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。