

Journal of Electric Power Science and Technology

Volume 38 | Issue 5

Article 25

1-15-2024

Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects

Wen LI

State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; Live Inspection and Intelligent Operation Technology State Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China

Huaxu LI

State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; Live Inspection and Intelligent Operation Technology State Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China

Li YANG

State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; Live Inspection and Intelligent Operation Technology State Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China

Haoyan YANG

State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; Live Inspection and Intelligent Operation Technology State Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China

Mingjian HU

State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; Live Inspection and Intelligent Operation Technology State Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

LI, Wen; LI, Huaxu; YANG, Li; YANG, Haoyan; HU, Mingjian; LIU, Dongxiong; and YANG, Zhongyi (2024)

"Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 38: Iss. 5, Article 25.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.025

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/25>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects

Authors

Wen LI, Huaxu LI, Li YANG, Haoyan YANG, Mingjian HU, Dongxiong LIU, and Zhongyi YANG

超高压输电线路复合绝缘子不同位置 缺陷下发热特性研究

李 稳^{1,2}, 李化旭^{1,2}, 杨 力^{1,2}, 杨昊彦^{1,2}, 胡茗舰^{1,2}, 刘冬雄³, 杨忠毅³

(1.国网湖南超高压输电公司,湖南长沙410000;2.带电巡检与智能作业技术国网公司实验室,湖南长沙410004;
3.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙410114)

摘要:复合绝缘子具有质量轻、机械性能好等特点,其在超特高压输电线路中的应用越来越广泛,但随着使用年限的增加,复合绝缘子容易由于隐蔽性缺陷而发热,最终造成严重的影响。本文建立真型500 kV输电线路复合绝缘子多物理场有限元模型,研究其在高压端、低压端和中间位置存在导通性故障时的电场和温度场分布。结果表明,当存在导通性故障时,绝缘子串电场和热场均产生了较大的变化。高压端、低压端和中间位置分别设置导通性故障时,绝缘子伞裙尖端最大电场分别可达17.45、15.95、5.62 kV/cm,温升分别可达9.3、4.4、1.8 °C,最大温升比正常工况下的温升增加了10.6倍。此外,当存在导通性故障时,沿绝缘交界面的温度分布各有特点,例如,中端故障时,其中端存在2个明显的温度峰值。最后,进行现场的红外热像测试试验,验证试验结果与仿真结果具有很好的一致性。

关键词:超高压;复合绝缘子;导通性故障;有限元;电热场

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.025 中图分类号:TM85 文章编号:1673-9140(2023)05-0246-07

Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects

LI Wen^{1,2}, LI Huaxu^{1,2}, YANG Li^{1,2}, YANG Haoyan^{1,2},
HU Mingjian^{1,2}, LIU Dongxiong³, YANG Zhongyi³

(1.State Grid Hunan EHV Transmission Company, Changsha 410000, China; 2.Live Inspection and Intelligent Operation Technology State
Grid Corporation Laboratory, Changsha 410004, China; 3.Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Composite insulators are increasingly employed in EHV/UHV transmission lines due to their light weight and excellent mechanical properties. However, with prolonged service life, composite insulators are susceptible to hidden defects and heating, leading to serious consequences. In this paper, the multiphysical field finite element model for real-size 500 kV transmission line composite insulators is established, and the distribution of electric field and temperature field under conductive faults at high voltage end, low voltage end and middle position are calculated. The research findings yield the following conclusions: There are substantial changes in the electric field and thermal field of the insulator strings under conductive faults. Specifically, when conductive faults are introduced at the high-voltage end, low-voltage end and middle position, the maximum electric field at the tip of insulator umbrella skirt can reach 17.45, 15.95 and 5.62 kV/cm

收稿日期:2022-02-13;修回日期:2022-04-25

基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ40604);湖南省教育厅科学研究项目(20C0047)

通信作者:刘冬雄(1997—),男,硕士研究生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;E-mail:liudongx97@163.com

respectively, and the corresponding temperature rise can reach 9.3, 4.4 and 1.8 °C respectively, representing a maximum temperature rise 10.6 times higher than that under normal working conditions. In addition, the temperature distribution along the insulation interface exhibits distinctive characteristics under conductive fault conditions at different positions. For example, in the case of a fault at the middle end, two obvious temperature peaks are observed. Finally, an infrared thermal image test is carried out, and the results are in good agreement with the simulations presented in this paper.

Key words: extra high voltage; composite insulator; conductive fault; finite element method; electrothermal field

复合绝缘子具有质量轻、机械性能好等特点,在超特高压输电线路中的应用越来越广泛^[1-4],但随着使用年限的增加,由于巡检不及时且无科学有效的监测手段,复合绝缘子容易发生断串开裂^[5-8]等明显缺陷,或者内部爬电与导通等隐蔽性缺陷^[9],最终造成严重的影响。因此,及时监测复合绝缘运行状态十分重要。

电场的检测技术以及红外测温技术作为绝缘子在线无损检测手段,在日常运行维护过程中得到广泛使用^[10-14]。现阶段,一些文献对于劣化绝缘子电场^[15-18]和温度^[9, 19-23]进行了研究,文献[15]统计分析了输电线路棒形悬式复合绝缘子鸟啄伞裙损伤特征,在实验室选取35、110、220 kV 3种电压等级棒形悬式复合绝缘子人工模拟伞裙鸟啄损伤,研究了伞裙损伤对棒形悬式复合绝缘子交流电场分布特性和污闪特性的影响。文献[16]对存在内部缺陷的复合绝缘子进行电场分析,用空气隙模拟芯棒与伞套粘接面缺陷,分别分析没有缺陷及存在3种不同尺寸空气隙时该处电场分布受到的影响。

文献[9]在不同环境相对湿度下对复合绝缘子的性能进行试验分析,结果表明:在环境相对湿度较高条件下,复合绝缘子红外测温结果上升,介损角正切值逐步增大并趋于饱和,因此建议应在环境湿度低于67.5%时使用红外测温技术。文献[20]研究了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,以实现对不同发热幅值发热缺陷的有效辨识。文献[21]研究表明由于高电导率的重污秽以及污秽受潮的不均匀性,红外成像及紫外成像法均可能发生误判。文献[22]研究了测试距离对现场发热复合绝缘子无人机红外测试影响,基于红外测试镜头参数、测试距离与被试绝缘子在红外测试屏幕上的占比分析,给出了适用于现场无人机操控的测试距离控制方法。以上研究对认识复合绝缘子劣化下的电场分布和红外检测技

术具有重要作用,但少有文献专门针对超高压输电线路复合绝缘子不同位置缺陷下的发热特性进行研究。

基于此,建立真型500 kV 输电线路复合绝缘子多物理场有限元模型,研究其在高压端、低压端和中间位置存在导通性故障时的电场和温度场分布。最后,进行现场的红外热像测试试验,验证试验结果与本文仿真结果的一致性。

1 复合绝缘子电热耦合多物理场仿真模型

1.1 有限元计算原理

本文研究不同位置缺陷下500 kV 输电线路复合绝缘子的温度场分布,运行工况为50 Hz工频电压,对于500 kV 输电线路复合绝缘子,沿劣化位置的电场和电位分布受位移电流的影响较大,而电场与电位分布影响绝缘子的发热特性。因此,首先需要考虑电位和电场的计算,本文选取准静电场计算模型。

由静电场原理,500 kV 输电线路复合绝缘子整体电位分布满足泊松方程,如下:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

式中, ϵ 为介质的介电常数; φ 为电位; ∇^2 为拉普拉斯算子; ρ 为静电场中任意一点的电荷密度,当场中无自由移动的空间电荷时, ρ 为0, 拉普拉斯方程成立:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

求解500 kV 输电线路复合绝缘子的整体电场分布时,其变分问题与计算域单元顶点的点位表达式如下:

$$F(\varphi) = \int \frac{\epsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dV \quad (3)$$

$$F^e(\varphi^e) = \int_{J_e} \frac{\epsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi^e}{\partial z} \right)^2 \right] dV_e \quad (4)$$

式中, $F^e(\varphi^e)$ 对 φ^e 导数为零, 则可以得:

$$\frac{\partial F(\varphi)}{\partial \varphi} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial F^e(\varphi^e)}{\partial \varphi^e} = 0 \quad (5)$$

进一步表示为矩阵的形式, 即可得到:

$$[\mathbf{K}][\varphi] = [0] \quad (6)$$

式中, $[\mathbf{K}]$ 为刚度矩阵, 通过求解器的迭代计算, 最终可求得 500 kV 输电线路复合绝缘子的整体电场分布。

为研究 500 kV 输电线路复合绝缘子电热耦合问题, 稳态热传导方程表示如下:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

若要解上述方程需要给定物体的边界条件, 热边界条件是结构边界与外部相互作用的结果, 一般包含以下 3 种形式。

- 1) 温度边界条件: 给定物体边界温度的绝对大小。
- 2) 热流边界条件: 给定边界上的热流密度。
- 3) 换热边界条件: 表示物体表面与周围介质的换热大小。

上述 3 类边界条件可以统一如下:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_r + \alpha(T - T_m) - q_0 = 0 \quad (8)$$

式中, λ 为导热系数; α 为换热系数; T 为边界温度; T_m 为某固定温度值; q_0 为边界热流密度。与电磁场求解边界问题一样, 同样采用变分法数值计算求解近似解, 其构造边值问题的泛函为

$$F(T) = \iint_{\Omega} \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dA + \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{2} \alpha T^2 - \alpha T_m T - q_0 T \right) ds \quad (9)$$

因此, 边值问题的解等价于极值问题, 这就是建立热分析有限元方程的依据, 基于此可对 500 kV 输电线路复合绝缘子的整体热场分布进行求解。

1.2 多物理场仿真模型

仿真计算中, 以超高压 500 kV 输电线路复合绝缘子为研究对象^[24], 其结构剖面如图 1 所示, 结构高度为 5315 mm, 大小伞直径分别为 174、88 mm, 芯棒直径和杆径分别为 30、40 mm。

本文讨论 500 kV 输电线路复合绝缘子串高压端、低压端和中间位置分别因缺陷而有导通性故障时^[25], 对其温度场分布产生的影响。对于超高压 500 kV 绝缘子串, 根据情况对绝缘子串下端钢脚加载高电位 $500 \times 1.1 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ 。本文有限元计算的材料物性参数设置如表 1 所示。

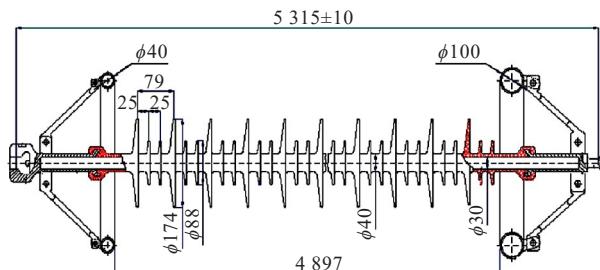


图 1 500 kV 输电线路复合绝缘子剖面图(单位:mm)

Figure 1 500 kV transmission line composite insulator profile

表 1 有限元计算的材料物性参数

Table 1 Material physical parameters in finite element calculation

结构部位	介质材料	导热系数/(W/m·K)	电阻率/(Ω·m)	相对介电常数
芯棒	玻璃纤维	0.29	1.36×10^{13}	2.25
伞裙	硅橡胶	0.27	1.42×10^{13}	2.80
钢帽钢脚均压环	钢材	80.00	9.78×10^{-8}	—
其余计算域	空气	0.26	0.58×10^{-8}	1.00

采用二维轴对称模型模拟三维电场与热场分布, 在保证计算精度的基础上, 可大大减少计算量, 此外, 为了进一步降低计算量, 对绝缘子周围网格进行较为细化的划分, 对远离绝缘子部分进行稀疏的网格划分, 局部网格划分结果如图 2 所示, 缺陷模拟位置示意图如图 3 所示。

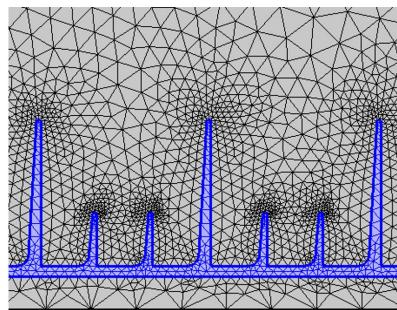


图 2 500 kV 输电线路复合绝缘子局部网格划分

Figure 2 Local mesh division of 500 kV transmission line composite insulator model

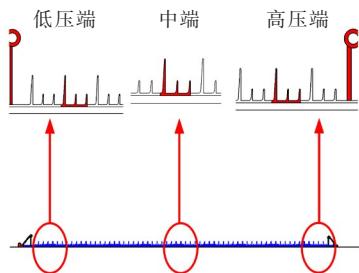


图3 500 kV 输电线路复合绝缘子缺陷模拟

Figure 3 Simulation of defects in 500 kV transmission line composite insulator

2 仿真结果及分析

本文计算得到500 kV输电线路复合绝缘子在正常工况下,绝缘子串高压端、低压端和中间位置分别因缺陷而有导通性故障时的电场和温度场分布。主要聚焦绝缘的热特性,因此仅对电场云图进行简单分析,着重分析复合绝缘子的热特性。

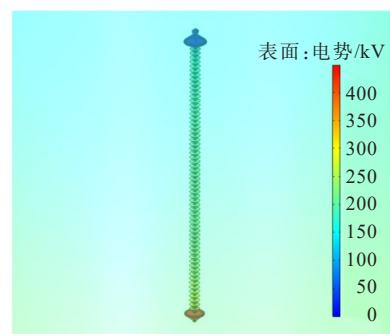
2.1 电场分布特性仿真结果与分析

500 kV输电线路复合绝缘子在正常工况下的电势与电场分布如图4所示。从图4可以看出,完好绝缘子串电位分布相对均匀,自高压端向低压端逐渐降低,底部为高压端,但绝缘子的电场沿串是不均匀分布的,在高压端和低压端电场相对较大,电场最大值为25.06 kV/cm。

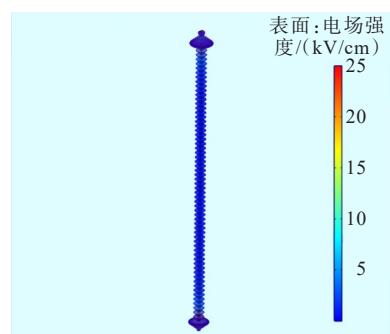
当500 kV输电线路复合绝缘子在绝缘子串高压端、低压端和中间位置分别设置导通性故障时,绝缘子串电场分布如图5所示。

从图5可以看出,当高压端、低压端和中间位置分别设置导通性故障时,与无故障绝缘子串对比,绝缘子伞裙电场均产生了较大的变化。尤其是导通性故障位置上下伞裙处电场较大。

500 kV输电线路复合绝缘子串不同位置故障时电场变化不同,整体上看,高压端和低压端设置导通性故障时的电场变化大于中间位置设置故障的电场变化。具体言之,高压端设置导通性故障时,绝缘子伞裙尖端电场最大可达17.45 kV/cm。对于低压端和中间位置分别设置导通性故障时,绝缘子伞裙尖端电场最大分别可达15.95、5.62 kV/cm。



(a) 电势分布



(b) 电场分布

图4 无故障整体电势与电场分布

Figure 4 Overall potential and electric field distribution under fault-free condition

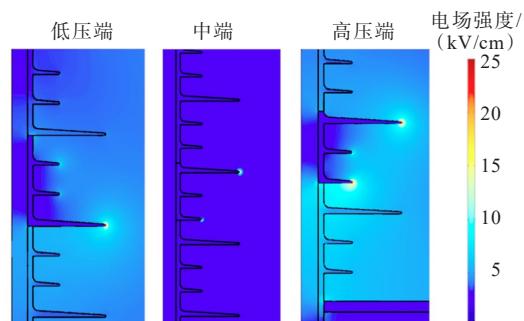


图5 导通性故障电场分布

Figure 5 Electric field distribution under conductive fault conditions

2.2 温度分布特性仿真结果与分析

500 kV输电线路复合绝缘子在正常工况下的热场分布如图6所示。当500 kV输电线路复合绝缘子在绝缘子串高压端、低压端和中间位置分别设置导通性故障时,绝缘子串热场分布如图7所示。导通性故障沿绝缘交界面温度分布如图8所示。

从图6中可以看出,在正常工况下,绝缘子表面的温升较小,但是整体上看沿串也呈不均匀分布,其高压端和低压端温升较大,最大温升可达0.8 ℃左右。绝缘子串中部温升不明显,几乎与环境温度相等。

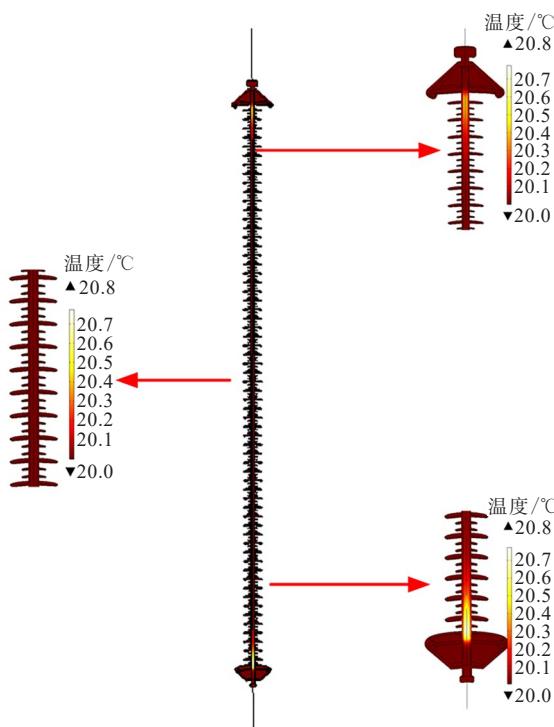


图6 无故障整体热场分布

Figure 6 Overall thermal field distribution under fault-free conditions

但是,当绝缘子串存在导通性故障时,其热场分布有较大变化。从图7中可以看出,当绝缘子高压端存在导通性故障时,其绝缘子的温升最大可达9.3 °C,而低压端存在导通性故障时,其绝缘子表面的温升可达4.4 °C,但是当中端存在导通性故障时,其温升相对较小为1.8 °C。最大温升比正常工况下的温升增加了10.6倍。

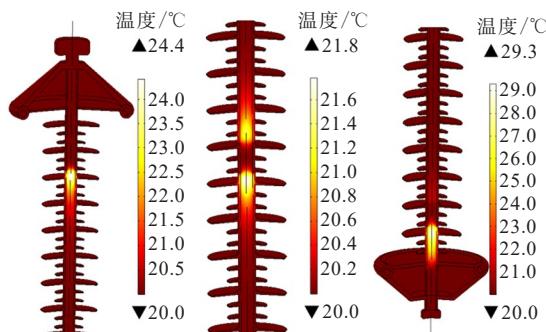


图7 导通性故障热场分布

Figure 7 Thermal field distribution under conductivity fault conditions

从图8中可以看出,当存在导通性故障时,沿绝缘交界面的温度分布各有特点,其低压端存在故障时,相较于正常的绝缘子串,其温升曲线相似,但是幅值比正常情况下大一些;而高压端存在故障时,其高压

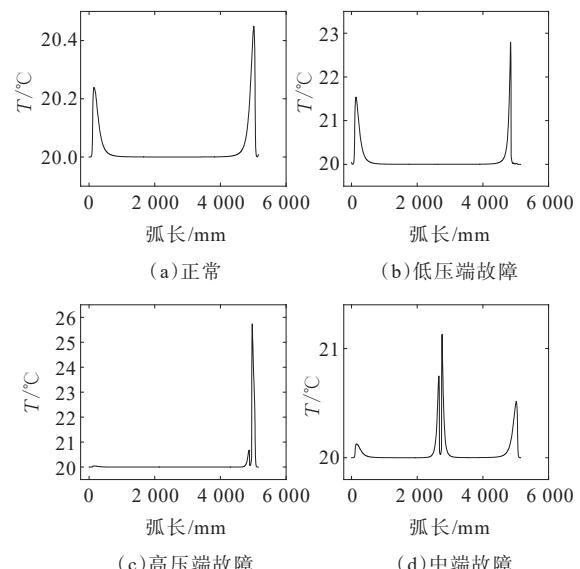


图8 导通性故障沿绝缘交界面温度分布

Figure 8 Temperature distribution along insulation interface under conductive fault conditions

端有较高的温度峰值,而低压端则温度峰值不明显。中端故障时,其中端存在2个明显的温度峰值。

从以上分析可以看出,不同位置的导通性故障温度分布各有特点,依靠红外成像温度检测的方法,可以协助判断绝缘子的故障位置。

2.3 现场温度分布试验

为了验证本文仿真的正确性,进行了现场的红外热像测试试验。正常500 kV输电线路复合绝缘子串的红外热像图如图9所示。从图9中可以看出,绝缘子表面的最大温升较小,小于2 °C。虽然温升值比本文仿真略大,但是整体上看沿串也呈不均匀分布,其高压端和低压端温升较大,绝缘子串中部温升不明显,几乎与环境温度相等,这也与本文仿真结论一致。

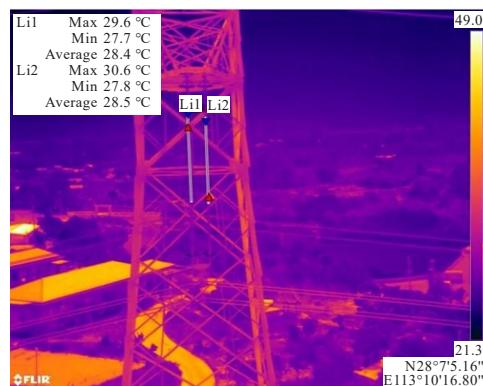


图9 正常绝缘子串温度测试

Figure 9 Temperature test of normal insulator strings

此外,试验中发现一故障绝缘子,其局部温升图如图10所示,可以看出,其发热云图与本文仿真云图十分接近,因此,说明本文的仿真结果可靠性较高,可为500 kV输电线路复合绝缘子串的红外热像检测故障判断提供依据。

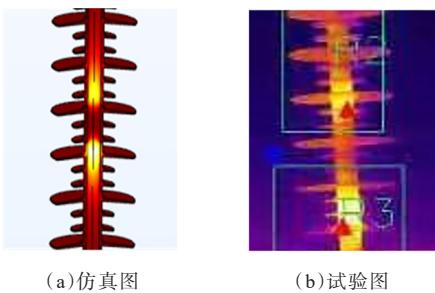


图10 故障下仿真与试验局部温度对比

Figure 10 Local temperature comparison between simulation and test under fault conditions

3 结语

本文建立了真型500 kV输电线路复合绝缘子多物理场有限元模型,研究了其在高压端、低压端和中间位置存在导通性故障时的电场和温度场分布,得出以下结论。

当存在导通性故障时,绝缘子伞裙电场和热场均产生了较大的变化,且不同位置变化不一。以热场为例,高压端存在导通性故障时绝缘子的温升最大可达9.3 °C,比正常工况下的温升增加了10.6倍;而低压端存在导通性故障时,其绝缘子表面的温升可达4.4 °C,但是当中端存在导通性故障时,其温升相对较小,可达1.8 °C。当存在导通性故障时,沿绝缘交界面的温度分布各有特点,例如中端故障时,其中端存在2个明显的温度峰值。因此,依靠红外成像温度检测的方法,可以协助判断绝缘子的故障位置。

本文进行了现场的红外热像测试试验,试验结果与本文的仿真结果具有很好的一致性,本文研究结果可为500 kV输电线路复合绝缘子串的红外热像检测故障判断提供依据。

参考文献:

- [1] 闫丽梅,刘永强,徐建军,等.基于Grabcut分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):114-119.
YAN Limei, LIU Yongqiang, XU Jianjun, et al. Broken

string diagnosis of composite insulator based on Grabcut segmentation and filler area discrimination[J]. Power System Protection and Control,2021,49(22):114-119.

- [2] 侯思祖,钟正,刘云鹏,等.高压复合绝缘子用GFRP材料吸湿特性及湿应力分布数值模拟[J].电工技术学报,2022,37(4):1010-1019.
HOU Sizhu, ZHONG Zheng, LIU Yunpeng, et al. Numerical simulation of hygroscopic characteristic and wet stress distribution of GFRP material used in high voltage composite insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(4):1010-1019.
- [3] 王思华,王军军,赵磊,等.污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J].中国电力,2021,54(7):149-157.
WANG Sihua, WANG Junjun, ZHAO Lei, et al. Influence of pollution components on surface electric field of composite insulators[J]. Electric Power,2021,54(7):149-157.
- [4] 单节杉,任敏,田鑫萃,等.基于故障电流回路特性的柔性直流架空线路纵联保护[J].电力系统自动化,2022,46(21):152-159.
SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, et al. Pilot protection of flexible DC overhead line based on characteristics of fault current loop[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(21):152-159.
- [5] 周晨,周路遥,李特,等.浙江省内复合绝缘子断串及芯棒击穿故障分析[J].高压电器,2021,57(5):182-188.
ZHOU Chen, ZHOU Luyao, LI Te, et al. Fault analysis on string fracture and core breakdown of composite insulator in Zhejiang Province[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(5):182-188.
- [6] 郑建军,贾鹏,刘昊东,等.110 kV复合绝缘子高压侧护套开裂故障原因分析[J].内蒙古电力技术,2021,39(1):72-75.
ZHENG Jianjun, JIA Peng, LIU Haodong, et al. Cracking analysis of 110 kV composite insulator high-voltage side sheath[J]. Inner Mongolia Electric Power,2021,39(1):72-75.
- [7] ZHU Z Y, JIA Z D, MA G X, et al. Fatigue fracture of composite insulator sheds utilized in strong wind areas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(3):1636-1643.
- [8] KUMOSA M, KUMOSA L, ARMENTROUT D. Failure analyses of nonceramic insulators. Part 1: brittle fracture characteristics[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005,21(3):14-27.
- [9] 王黎明,付铠玮,梅红伟,等.环境湿度对复合绝缘子红外测温的影响[J].高电压技术,2019,45(6):1955-1961.
WANG Liming, FU Kaiwei, MEI Hongwei, et al. Influence of environmental humidity on infrared measurement temperature of composite insulators[J]. High Voltage

- Engineering,2019,45(6):1955-1961.
- [10] 余海,姜吉顺,史晓航,等.基于红外测温的复合绝缘子老化程度量化评估方法[J].电测与仪表,2023,60(3):183-187.
YU Hai, JIANG Jishun, SHI Xiaohang, et al. Quantitative evaluation method for aging of composite insulators based on infrared temperature measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(3):183-187.
- [11] 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.
- [12] 彭向阳,张中浩,黄振,等.广东地区高温发热线路棒形复合绝缘子劣化特性[J].高压电器,2020,56(3):104-110.
PENG Xiangyang, ZHANG Zhonghao, HUANG Zhen, et al. Deterioration characteristics of rod type composite insulators in Guangdong high temperature heating line[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(3):104-110.
- [13] 周吉刚,李希元,徐中凯,等.基于有限元的瓷绝缘子劣化对输电线路绝缘子串轴向电场分布影响研究[J].绝缘材料,2021,54(10):79-83.
ZHOU Jigang, LI Xiyuan, XU Zhongkai, et al. Influence of 110 kV porcelain insulator deterioration on axial electric field distribution of transmission line insulator string based on finite element method[J]. Insulating Materials, 2021,54(10):79-83.
- [14] 郑云龙,罗日成,邹明.UHVDC输电线路低零值绝缘子带电检测方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):197-204.
ZHENG Yunlong, LUO Richeng, ZOU Ming. Research on live detection method of zero insulator for UHVDC transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):197-204.
- [15] 王克胜,赵彦平,原帅,等.基于电场计算及模态分析的220 kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J].电网与清洁能源,2021,37(8):32-38+47.
WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(8):32-38+47.
- [16] 芦山,王希林,刘星廷,等.基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽自由定标定量分析[J].智慧电力,2021,49(10):90-96.
LU Shan, WANG Xilin, LIU Xingting, et al. Calibration-free quantitative analysis of insulator pollution via laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Smart Power,2021,49(10):90-96.
- [17] PHILLIPS A J, KUFFEL J, BAKER A, et al. Electric fields on AC composite transmission line insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):823-830.
- [18] DA COSTA E G, FERREIRA T V, NERI M G G, et al. Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009,16(4):985-992.
- [19] 郝艳捧,王泉,毕继凯,等.复合绝缘子界面热源下的温度分布和暂态过程[J].高电压技术,2022,48(9):3497-3506.
HAO Yanpeng, WANG Quan, BI Jikai, et al. Temperature distribution and transient process of interface heat in composite insulators[J]. High Voltage Engineering,2022,48 (9):3497-3506.
- [20] 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 field unmanned aerial vehicle infrared test parameters[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(3):865-875.
- [21] 王胜辉,姜婷玥,李伟,等.零值绝缘子串红外和紫外成像特性试验及耦合场仿真研究[J].高压电器,2021,57(12):1-9.
WANG Shenghui, JIANG Tingyue, LI Wei, et al. Study on infrared and UV imaging characteristics test and coupling field simulation of zero-value insulator strings[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(12):1-9.
- [22] 刘黎,李特,赵浩然,等.测试距离对现场发热复合绝缘子无人机红外测试影响研究及控制建议[J].电瓷避雷器,2021(6):184-191.
LIU Li, LI Te, ZHAO Haoran, et al. Influence of test distance on unmanned aerial vehicle infrared test of field heating composite insulators and control method[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(6):184-191.
- [23] 曾磊磊,张宇,李唐兵,等.复合绝缘子芯棒发热的热传导特性研究[J].电瓷避雷器,2022(1):219-224.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, LI Tangbing, et al. Study on heat conduction characteristics of FRP rod heating of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1):219-224.
- [24] 黎卫国.交流复合绝缘子覆冰电位电场仿真研究[D].广州:华南理工大学,2012.
LI Weiguo. Study on AC icing composite insulators' potential and electric field distribution[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2012.
- [25] 王力农,李小春,宋斌,等.输电线路劣化绝缘子电场分布仿真与检测研究[J].高压电器,2018,54(10):49-55+62.
WANG Linong, LI Xiaochun, SONG Bin, et al. Researches of simulation and detection for electric field distribution along faulty insulator on transmission line[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(10):49-55+62.