

# 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

周吉刚<sup>1</sup>, 李希元<sup>1</sup>, 徐中凯<sup>2</sup>, 朱元成<sup>2</sup>, 李锡忠<sup>2</sup>, 马洪峰<sup>2</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 国网营口供电公司, 辽宁 营口 115000)

**摘要:**利用有限元方法研究了包含不同位置、数量与劣化程度劣化绝缘子的绝缘子串电场强度和电位分布。结果表明:高、低压端绝缘子劣化对绝缘子串轴向电场影响最大,会明显增加劣化位置的电场峰值幅值。与含单片劣化绝缘子的绝缘子串相比,当存在双片(第1和2片)重度劣化绝缘子时,对于第2片绝缘子附近的电场峰值影响较大。当绝缘子劣化位置与数量相同时,轻度劣化绝缘子相对于零值绝缘子对绝缘子串轴向电场强度的影响趋势相同,但是影响程度随劣化程度的增加而增加。

**关键词:**有限元;瓷绝缘子劣化;电场强度;劣化绝缘子检测

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)10-0079-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.10.012

## Influence of Porcelain Insulator Deterioration on Axial Electric Field Distribution of Transmission Line Insulator String Based on Finite Element Method

ZHOU Jigang<sup>1</sup>, LI Xiyuan<sup>1</sup>, XU Zhongkai<sup>2</sup>, ZHU Yuancheng<sup>2</sup>, LI Xizhong<sup>2</sup>, MA Hongfeng<sup>2</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110000, China;

2. State Grid Yingkou Electric Power Supply Company, Yingkou 115000, China)

**Abstract:** The electric field strength and potential distribution of insulator strings with different locations, numbers and deterioration degrees of insulators were studied by finite element method. The results show that the deteriorated insulators at high and low voltage terminals has the greatest effect on the axial electric field of the insulator string, which significantly increases the peak amplitude of electric field at the deterioration location. Compared with the insulator string with a heavily deteriorated insulator, the electric field peak near the second insulator is greatly affected by the presence of two (first and second) deteriorated insulators. When the number and location of insulator degradation are the same, the effect of slightly deteriorated insulator on the axial electric field strength of insulator string is the same as that of zero value insulator, but the influence degree increases with the increase of degradation degree.

**Key words:** finite element; deterioration of porcelain insulator; electric field strength; detection of deteriorated insulator

## 0 引言

绝缘子串在输电线路中起着不可替代的作用,对高压电网的正常运行至关重要<sup>[1-4]</sup>,因此其绝缘性能和力学性能越来越受到人们的关注。绝缘子串中如果有绝缘子劣化会导致其性能下降,若不及时加以更换,可能会给电网带来严重故障<sup>[5-8]</sup>。因此准

确、及时地识别串间绝缘子的劣化特性具有重要意义。

国内外目前探索出了紫外成像法、红外成像法、超声波检测法、泄漏电流检测法、电场测量法等检测劣化绝缘子的方法<sup>[9-10]</sup>。但各种方法均存在其局限性,例如张晓春等<sup>[11]</sup>基于红外成像技术检测劣化绝缘子,但受到污秽影响,容易出现误判。夏强峰<sup>[6]</sup>研究指出,泄漏电流检测法灵敏度受劣化绝缘子阻值、环境温度、湿度的影响。对于超声波检测

收稿日期:2020-12-23 修回日期:2021-03-23

作者简介:周吉刚(1974-),男(汉族),辽宁辽阳人,高级工程师,主要从事电气工程自动化及电力系统的研究。

法而言,超声波本身存在耦合和衰减,最终都会导致误判等情况。

近年来电场测量法得到很多的应用,例如文献[12-14]对劣化绝缘子的电场分布进行了研究,并得到相似的结论,劣化绝缘子对空间轴向电场分量影响最大;测量距离越远,其空间轴向电场的变化率越小。直接分析绝缘子串空间轴向电场的变化能够判断出劣化绝缘子及其位置。

基于以上分析,本文考虑到绝缘子的不同位置、数量与劣化程度等因素,研究劣化绝缘子对绝缘子串电场强度和电位分布的影响,以期为非接触检测劣化绝缘子提供参考。

## 1 计算

### 1.1 计算理论

在电场中,对于清洁绝缘子串,塔中传导电流远大于位移电流,而在传输线中则相反,因此采用静电场进行模拟较为合适。然而,对于劣化绝缘子,沿绝缘子表面的电场和电位分布受位移电流的影响较大。在此假设下,采用准静电场进行模拟。

根据静电场原理,带电线路中含劣化绝缘子的绝缘子串整体电位分布满足泊松方程,如式(1)所示。当场中无自由移动的空间电荷时,静电场中任意一点的电荷密度 $\rho$ 为零,拉普拉斯方程成立,如式(2)所示。

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

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

式(1)~(2)中: $\varepsilon$ 为介质的介电常数; $\varphi$ 为电位; $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子。

求解带电线路中机械器具与输电线路的整体电场分布时,其变分问题,与计算域单元顶点 $e$ 的电势表达式分别为式(3)和式(4)所示。

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

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

$F(\varphi^e)$ 对 $\varphi^e$ 导数为零,可以得到公式(5)。进一步表示为矩阵的形式,即可得到公式(6)。

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

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

式(6)中: $[K]$ 为刚度矩阵; $[\varphi]$ 为电势矩阵。通过求解器的迭代计算,最终可以求得带电线路中含劣化

绝缘子的绝缘子串的整体电场分布。

### 1.2 计算模型

本文仿真计算中,综合考虑了以下工况:单片劣化绝缘子不同位置对轴向电场分布的影响;双片劣化绝缘子不同位置对轴向电场分布的影响;轻度劣化绝缘子对轴向电场分布的影响。空气、金具、瓷3种介质的相对介电常数分别设置为1.0、 $1.0 \times 10^{10}$ 、6.0。文献[15]指出,可以通过单独设置介电常数和电导率值的方法构造出不同的低值劣化绝缘子,通常电流场模块可以设置绝缘子的电导率值,静电场则通过设置相对介电常数来构造。本研究通过改变绝缘子的相对介电常数模拟严重劣化(零值)和轻度劣化绝缘子。劣化绝缘子的相对介电常数数值参考现场取样测量结果,参考1片298 M $\Omega$ 的绝缘子相对介电常数,取20;对于严重劣化,考虑钢帽和钢脚处水泥存在贯穿损伤,取1 000。因此轻度劣化的介电常数设置为20,严重劣化的相对介电常数设置为1 000。交流输电线路含劣化绝缘子的绝缘子串电场计算模型网格分化结果如图1所示;采用二维轴对称模型等效计算三维电场分布,可以在同等计算精度的基础上,大幅减少计算量。

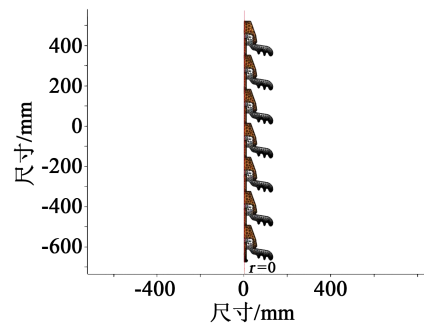


图1 网格划分结果

Fig.1 Meshing result

## 2 劣化绝缘子电场分布与分析

### 2.1 正常绝缘子串电场分布

现有研究表明,劣化绝缘子对空间轴向电场分量影响最大,因此本文主要研究紧邻绝缘子伞裙处的纵向电场分布,和距离伞裙周围6.5 cm范围的电场分布。

首先根据第1节的方法,计算得到正常绝缘子串的轴向电势和电场分布,如图2所示。对于瓷绝缘子串,根据情况对绝缘子串下端钢脚加载高电势 $U_m = 110 \times 1.1 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 98.796$  kV。从图2(a)可以看出,完好绝缘子串电势分布相对均匀,自高压端向低压端逐渐降低。

从图2(b)可以看出,轴向电场整体呈现U形分

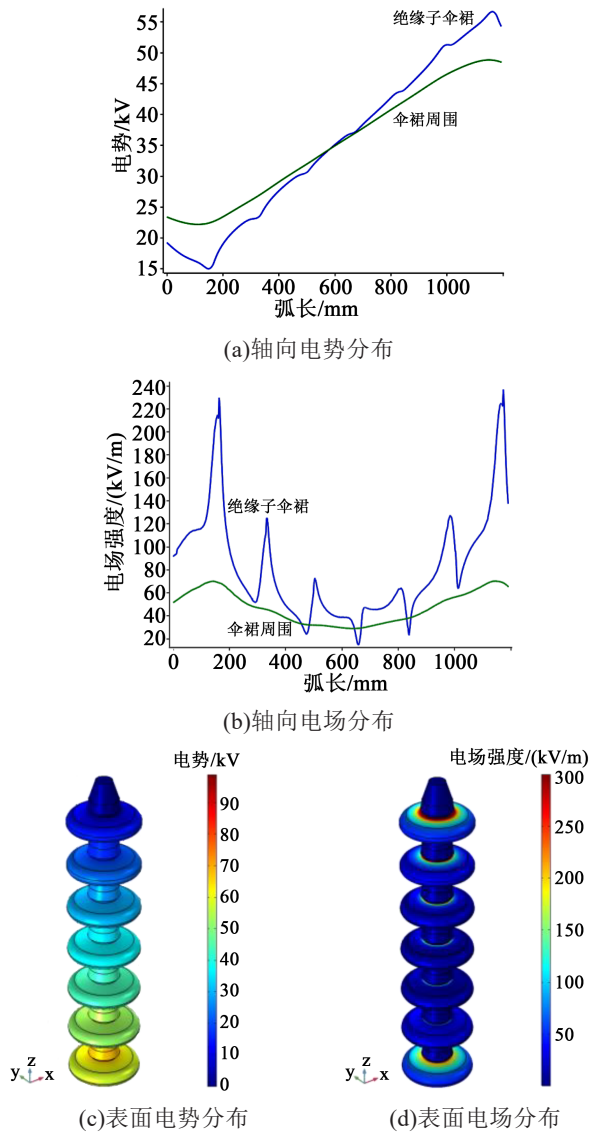


图2 正常绝缘子串计算结果

Fig.2 Calculation results of normal insulator string

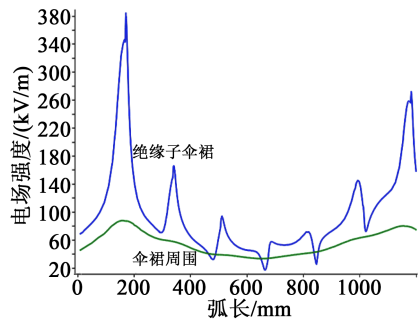
布,高、低压端电场较大,例如,绝缘子伞裙处电场最高可达239 kV/m,中间位置电场较小,平均仅为20 kV/m。绝缘子伞裙周围电场最高可达70 kV/m,中间位置电场较小,平均仅为30 kV/m。此外,根据正常绝缘子串的轴向电场分布三维图可知,其电场较大位置出现在钢帽、钢脚与瓷质伞裙交界处,并且在第1片和第7片位置电场最大。

2.2 单片劣化(零值)绝缘子电场分布

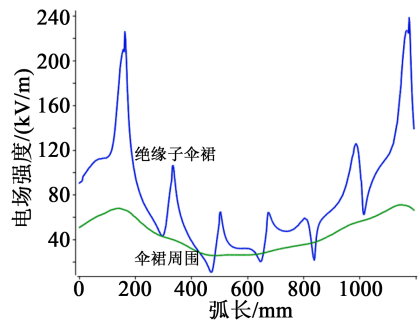
根据第1节的方法,计算存在单片劣化绝缘子的绝缘子串轴向电场分布,计算结果如图3所示。

对比图2(b)和图3(a)可知,当单片劣化绝缘子位置为第1片时,对于绝缘子伞裙处,第7片绝缘子位置电场强度相比于无劣化绝缘子的电场强度略有升高,从239 kV/m增加至272 kV/m,仅增加了13.8%;第1片绝缘子位置电场强度相比于无劣化绝

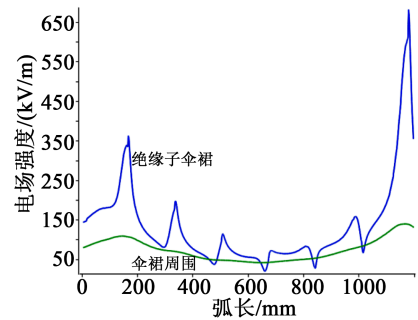
缘子的电场强度明显升高,从231 kV/m增加至382 kV/m,增加了65.4%;此外,高压端附近的电场增加均较为明显,例如第2片绝缘子伞裙处电场从127 kV/m增加至168 kV/m。对于绝缘子伞裙周围,相较于绝缘子伞裙处,其高、低压端电场亦呈增加趋



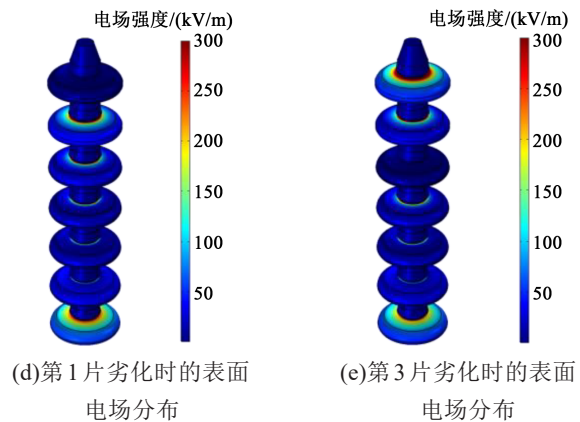
(a)第1片劣化时的轴向电场分布



(b)第3片劣化时的轴向电场分布

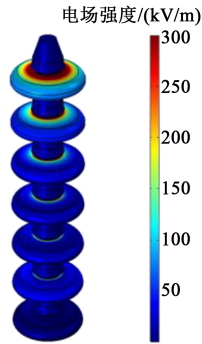


(c)第7片劣化时的轴向电场分布



(d)第1片劣化时的表面电场分布

(e)第3片劣化时的表面电场分布



(f)第7片劣化时的表面电场分布

图3 含单片劣化绝缘子的绝缘子串电场分布计算结果

Fig.3 Calculation results of electric field distribution of insulator string containing a single piece of degraded insulator

势,但增加趋势相对较小,例如,第7片绝缘子位置电场强度相比于无劣化绝缘子的电场强度从70 kV/m增加至80 kV/m,仅增加了14.3%。

由图3(b)可知,当单片劣化绝缘子位置为第3片时,对于绝缘子伞裙周围电场,其变化相比第1片劣化时较小,整体趋势没有较大波动;但对于绝缘子伞裙处电场,第3片劣化时,会导致第4片附近电场峰值增加(从47 kV/m增加至65 kV/m),但同时也会导致第3和2片附近电场峰值降低。

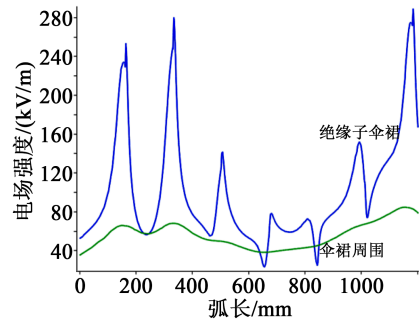
由图3(c)可知,当单片劣化绝缘子位置为第7片时,电场增加最为明显,第7片绝缘子位置电场强度相比于无劣化绝缘子的电场强度明显升高(从239 kV/m增加至680 kV/m),增加了184.5%;第1片绝缘子位置电场强度相比于无劣化绝缘子的电场强度亦升高(从231 kV/m增加至363 kV/m),增加了57.1%。

### 2.3 双片劣化(零值)绝缘子电场分布

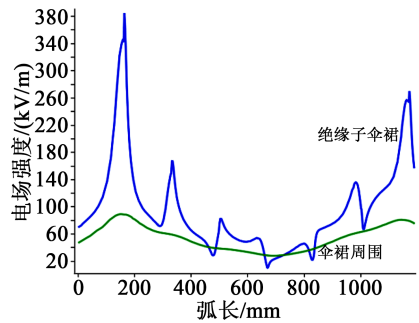
根据第1节的方法,计算存在双片(第1、2片)劣化绝缘子的绝缘子串轴向电场分布,计算结果如图4所示。

从图4(a)可以看出,与含单片劣化绝缘子的绝缘子串相比,当存在双片(第1、2片)劣化绝缘子时,对于第2片绝缘子附近的电场峰值影响较大,第2片绝缘子位置电场强度明显升高,从168 kV/m增加至280 kV/m,增加了66.7%。第1片绝缘子附近的电场峰值略有降低,从382 kV/m降低至255 kV/m。第3、4片绝缘子附近的电场峰值均有所增加,而第5、6片电场变化不明显。

从图4(b)可以看出,对于双片(第1、4片)劣化时,与单片(第1片)劣化时电场分布相差不大,因此可以得出结论,不管对于双片和还是单片劣化,都



(a)第1和2片劣化



(b)第1和4片劣化

图4 含双片劣化绝缘子的绝缘子串电场分布计算结果

Fig.4 Calculation results of electric field distribution of insulator string containing double piece of degraded insulator

是高、低压端的劣化会更大程度地改变电场强度,而绝缘子串中部的劣化对电场影响较小。

### 2.4 不同劣化程度绝缘子电场分布

计算得到含单片轻度劣化绝缘子的绝缘子串轴向电场分布,结果如图5所示。

从图5可以看出,当第7片绝缘子完好(图2(c)~(d))、轻度劣化(图5(a))和零值(图3(e)~(f))时,第1片绝缘子位置附近的电场峰值分别为231、299、363 kV/m;第7片绝缘子位置附近的电场峰值分别为239、445、680 kV/m。相较于重度劣化(图4(a)),第1、2片绝缘子轻度劣化对第2片绝缘子附近电场的影响不明显。

由此可得出,当绝缘子劣化位置与数量相同时,轻度劣化绝缘子相对于零值绝缘子对绝缘子串轴向电场强度的影响趋势相同,但是影响程度随劣化程度的增加而增加。

## 3 讨论

通过单片不同劣化绝缘子位置的电场分布计算可知,高低压端绝缘子劣化对绝缘子串轴向电场的影响最大,会明显增加劣化位置的电场峰值幅值,例如第1片绝缘子劣化,会使得第1片绝缘子附近电场峰值增加65.4%。

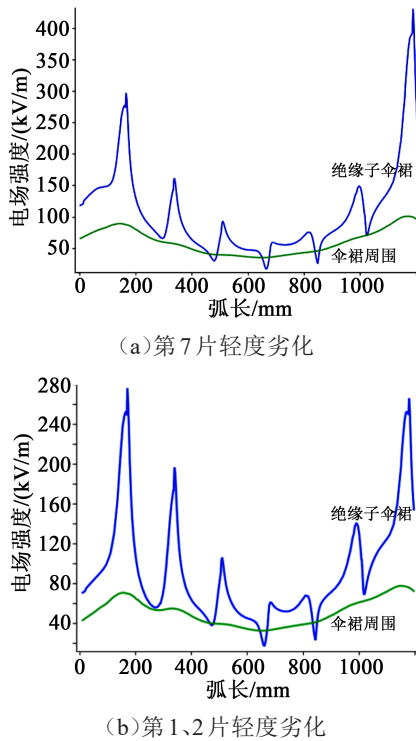


图5 含轻度劣化绝缘子的绝缘子串计算结果

Fig.5 Calculation results of insulator string containing slightly degraded insulator

与含单片劣化绝缘子的绝缘子串相比,当存在双片(第1、2片)劣化绝缘子时,最为显著的特点是:对于第2片绝缘子附近的电场峰值影响较大,第2片绝缘子位置电场强度明显升高(从168 kV/m增加至280 kV/m),增加了66.7%。

当绝缘子劣化位置与数量相同时,轻度劣化绝缘子相对于零值绝缘子对绝缘子串轴向电场强度的影响趋势相同,但是影响程度随劣化程度的增加而增加。

因此,在进行电场检测定位劣化绝缘子时,首先应建立不同劣化绝缘子串轴向上电场分布的案例库;在现场工程实践中,应测得目标绝缘子串整个轴线上的电场分布,而不能单纯通过测量具体点位置的电场分布,通过轴线电场分布与案例库曲线相关度,进而确定劣化绝缘子的位置,这样可以降低单点测试的误差。

此外,紧邻伞裙位置的电场相比伞裙周围电场所受影响大,因此建议进行电场检测定位劣化绝缘子时,要尽可能靠近绝缘子伞裙。

## 4 结论

(1)高、低压端绝缘子劣化对绝缘子串轴向电场影响最大,会明显增加劣化位置的电场峰值。

(2)与含单片劣化绝缘子的绝缘子串相比,当存在双片(第1和2片)劣化绝缘子时,最为显著的特点是:对于第2片绝缘子附近的电场峰值影响较大。

(3)当绝缘子劣化位置与数量相同时,轻度劣化绝缘子相对于零值绝缘子对绝缘子串轴向电场强度的影响趋势相同,但是影响程度随劣化程度的增加而增加。

(4)紧邻伞裙位置的电场相比伞裙周围电场所受影响大,因此建议进行电场检测定位劣化绝缘子时,要尽可能靠近绝缘子伞裙。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Long, ZHU Jing, CAO Shilin, et al. Mechanism and novel structure for  $di/dt$  controllability in U-shaped channel silicon-on-insulator lateral IGBTs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019,40(10):1658-1661.
- [2] YIN Jungang, LU Yipeng, GONG Zhengxiong, et al. Edge detection of high-voltage porcelain insulators in infrared image using dual parity morphological gradients[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32728-32734.
- [3] LIN Ying, YIN Fanghui, LIU Yuhao, et al. Influence of vulcanization factors on UV-A resistance of silicone rubber for outdoor insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020,27(1):296-304.
- [4] LIANG Xidong, BAO Weining, GAO Yanfeng. Decay-like fracture mechanism of silicone rubber composite insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 110-119.
- [5] 于洋. 高压输电线路绝缘子劣化检测方法研究[D]. 沈阳:沈阳工程学院, 2019.
- [6] 夏强峰. 瓷质悬式绝缘子劣化非接触式检测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [7] 李凯迪. 基于红外检测的瓷绝缘子劣化诊断技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019.
- [8] 白卫,黎业欣,甘徐,等. 绝缘子劣化状态检测技术研究[J]. 科技与创新, 2020(15):1-3,6.
- [9] 林瑞聪,缪希仁,郭谋发,等. 基于紫外成像技术的劣化绝缘子放电动态特性分析[J]. 绝缘材料, 2014,47(5):87-91.
- [10] 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.
- [11] 张晓春,欧阳广泽,何洪英,等. 基于红外图像匹配的零值绝缘子检测[J]. 电测与仪表, 2019,56(6):100-105.
- [12] 唐盼,肖宾,邓益民,等. 带电作业用绝缘工具超声检测方法[J]. 高压技术, 2019,45(5):1584-1590.
- [13] 蒋兴良,夏强峰,胡琴,等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(16):118-124.
- [14] 白欢,陈洪波,黄道春. 110kV 零值瓷绝缘子电场仿真分析研究[J]. 四川电力技术, 2014,37(2):62-67.
- [15] 王平,李抗,耿江海,等. 110kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020,57(14):93-98.