

Research of Insulator Degradation Detecting Technology Based on Optical Electric Field Sensor

Wei Chen, Qiang Xu, Jiacheng Li, Dongliang Yuan, Xianchen Zhao

Qujing Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Qujing Yunnan
Email: 443925426@qq.com

Received: Nov. 29th, 2019; accepted: Dec. 16th, 2019; published: Dec. 23rd, 2019

Abstract

Insulators are an important part of transmission lines. The reliability and stability of their operation are closely related to the safe operation of power systems. Therefore, the live detection of insulators is one of the important tasks in line operation and maintenance. In this paper, an insulator detection method based on fiber-optic electric field sensor is proposed, and related detection devices are studied. The test device is used to test the degradation insulation of 220 kV line. The test results show that the deterioration of the insulator at the high voltage end, the low voltage end and the middle part can be expressed by the electric field measurement results, indicating that the detection method of this paper can become the live line detection—an effective means of degrading insulators.

Keywords

Faulty Insulator, Automatic Detection Device, Electric Field Distribution, Fiber Sensor

基于光纤电场传感器的劣化绝缘子检测技术研究

陈伟, 许强, 李佳城, 袁栋梁, 赵宪忱

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖
Email: 443925426@qq.com

收稿日期: 2019年11月29日; 录用日期: 2019年12月16日; 发布日期: 2019年12月23日

摘要

绝缘子是输电线路的重要组成部分, 其运行的可靠性和稳定性与电力系统的安全运行状况息息相关, 所

文章引用: 陈伟, 许强, 李佳城, 袁栋梁, 赵宪忱. 基于光纤电场传感器的劣化绝缘子检测技术研究[J]. 智能电网, 2019, 9(6): 318-326. DOI: 10.12677/sg.2019.96034

以绝缘子的带电检测是线路运行维护中的重要工作之一。本文提出了一种基于光纤电场传感器的绝缘子检测方法,并研究了相关的检测装置,并采用此检测装置对220 kV线路进行了劣化绝缘试验,试验结果表明,绝缘子在高压端、低压端以及中部的劣化都能够通过电场测量结果表现出来,说明本文的检测方法可以成为输电线路带电检测劣化绝缘子的有效手段。

关键词

劣化绝缘子, 自动检测装置, 电场分布, 光纤传感器

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来, 高压输电线路的数量显著增加, 而绝缘子的运行状态无时无刻影响着电网的安全, 绝缘子长期性暴露于较为恶劣的环境之中, 其绝缘性能会逐渐下降, 进而变为劣化绝缘子, 进而大概率造成输电系统事故, 所以对劣化绝缘子进行快速准确的检测并对劣化绝缘子进行及时更换, 可以确保电力系统的安全稳定运行[1]。

现阶段, 检测劣化绝缘子的方法主要有观察法、火花间隙法、电压分布法、紫外成像、红外诊断、超声检测、憎水性检测及电场检测等方法[2] [3] [4]。但是这些方法都有不足: 电压分布法等方法需要人工登杆, 劳动强度较大并且容易受到工作人员主观因素的影响, 并且不适用于高压或特高压输电线路绝缘子的检测; 紫外成像法主要适合于观测局部放电的情况, 且价格比较昂贵; 红外诊断法受环境因素干扰较大, 气象条件对检测结果会造成较大的影响; 声波法可以检测到机械损伤故障, 但无法对整体性的慢性劣化进行评估; 憎水性检测作为检测复合绝缘子的一种方法, 其工序比较复杂, 实际操作起来比较困难。电场检测法是综合看来目前适用性较好的一种检测方式, 其思路是通过电场传感器对绝缘子表面进行表面电场强度的测量, 根据电场的畸变情况对绝缘子的运行状态进行判断。在引入光纤电场传感器之后, 电场的测量工作也变得更加简单可靠[5] [6]。

本文首先阐述了基于光纤电场传感器的电场检测法的工作原理, 随后对检测装置的大致结构进行介绍, 最后在 220 kV 线路上对检测装置进行了试验, 验证了该检测方法的可行性。

2. 工作原理

2.1. 电场检测法

电场检测法相比于其他检测方法的优势主要体现在其受到外界因素的干扰较小, 并且能够带电检测绝缘子内部的绝缘故障[7] [8]。正常绝缘子与劣化绝缘子的电场分布对比示意图如图 1 所示, 绝缘子的电场可以分解为横向分量和纵向分量, 其中纵向分量在正常状态下变化曲线呈光滑的 U 型分布, 这主要是由绝缘子片与导线和铁塔之间的杂散电容的相对大小所决定的。在靠近导线侧的高压端, 由于分流作用大于汇流作用, 越远离高压端的绝缘子自身电容获得的电流越小, 因此其压降越小; 而在靠近杆塔的接地端, 由于分流作用小于汇流作用, 因此靠近杆塔侧的绝缘子压降会有所抬升, 使整个电场分布呈现为不对称的“U 形”分布。如图中曲线 A。当绝缘子存在故障时, 分布曲线不再光滑, 在故障相对应的位置会有畸变, 如图中曲线 B [9] [10] [11] [12] [13]。

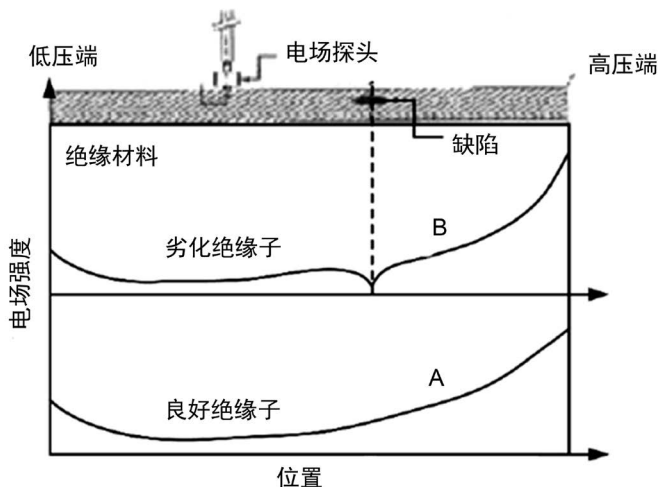


Figure 1. Electric field distribution of composite insulator and faulty insulator
图 1. 正常绝缘子与劣化绝缘子的电场分布示意图

2.2. 线性电光效应

光纤电场传感器的原理是基于线性电光效应，又称 Pockels 效应，它的主要内容是折射率的变化与外加场强成正比。同时，某些物质在电场中也会产生感应双折射现象，其大小正比于电场强度。线性电光效应是线性效应，只存在于一些没有对称中心的晶体之中。线性电光效应用公式可以表达为

$$\delta = kE \tag{1}$$

式中， δ 为线性电光效应引起的双折射造成的两正交偏振光束在晶体中传输的相位差， E 为外加电场强度， k 为晶体的电光系数，取 $\delta = k = 3 \times 10^{-11} \text{ m/V}$ [14][15][16][17][18]。

线性电光效应原理如图 2 所示，大致过程如下：入射光沿着晶体光轴入射，首先经过起偏器变成线偏振光，接着经过 1/4 玻片变成圆偏振光，通过光学晶体时在外加电场的作用下发生双折射，此时光的相位发生了变化，最后使用检偏器将光的相位变化转换成光强变化，即可以反映出电场强度。

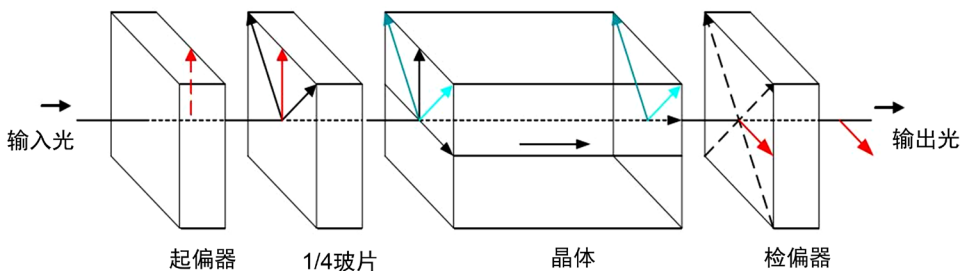
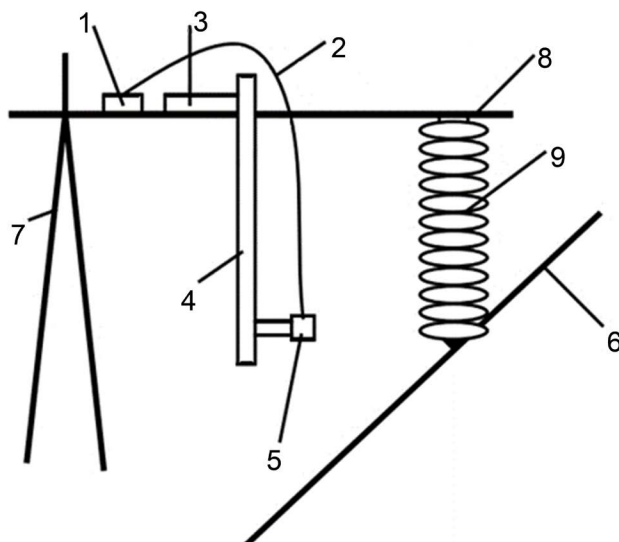


Figure 2. Diagram of linear electro-optic effect
图 2. 线性电光效应示意图

3. 220 kV 绝缘子劣化试验

3.1. 检测装置结构

绝缘子劣化检测仪结构示意图如图 3 所示。图中 5 为光学电场传感器，信号通过两根光缆引出。1 为电场测量仪，通过发出功率稳定的被测光信号，输入到无源电场探头内并通过电光晶体。输出端接收被外界电场调制后的光信号，通过光电转换后信号调理电路即可获得电场强度的测量值。



1) 电场检测仪; 2) 光缆; 3) 结构固定件; 4) 检测用绝缘杆; 5) 光学电场传感器; 6) 高压导线; 7) 杆塔; 8) 横担; 9) 绝缘子串

Figure 3. Insulator inspection device construction diagram

图 3. 检测系统结构示意图

3.2. 检测试验

绝缘劣化带电检测在高压试验大厅进行, 具体试验条件为: 220 kV 电压等级复合绝缘子串, 一共 19~23 片, 悬挂在单相导线上, 加载电压为 123.7 kV。湿度 35%, 温度 3℃~6℃。

试验制定了五种方案, 如表 1 所示, 通过分析与对比各方案的试验结果可以得出实际试验与理论之间存在的差异以及检测方法在实际输电线路中的可行性。

Table 1. Five schemes for live detection of insulation deterioration

表 1. 绝缘劣化带电检测的五种方案

序号	方案
1	降压运行的复合绝缘子在不同测量距离下的电场测量试验
2	额定电压运行的良好复合绝缘子的电场分布试验
3	复合绝缘子内部导通型缺陷的电场分布试验
4	受到盐水浸渍缺陷影响的复合绝缘子电场分布
5	受均压环影响的复合绝缘子电场分布

具体试验方案的试品以及试验结果如下:

1) 方案一

试品: 1#无缺陷, 电压为低电压 110 kV, 距离分别为 10 cm, 20 cm, 30 cm。

试验测得的电场强度分布曲线图如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 测量距离对于绝缘子表面的电场分布有较大的影响, 传感器在距离绝缘子 10 cm 时, 测量得到的电场分布曲线更接近理论的 U 型分布, 距离越远, 表面电场分布受到绝缘子本身的影响就越小, 逐渐呈现出只与高压端金属环相关的单调上升的规律, 所以在接下来的试验中测量距离选取为 10 cm。

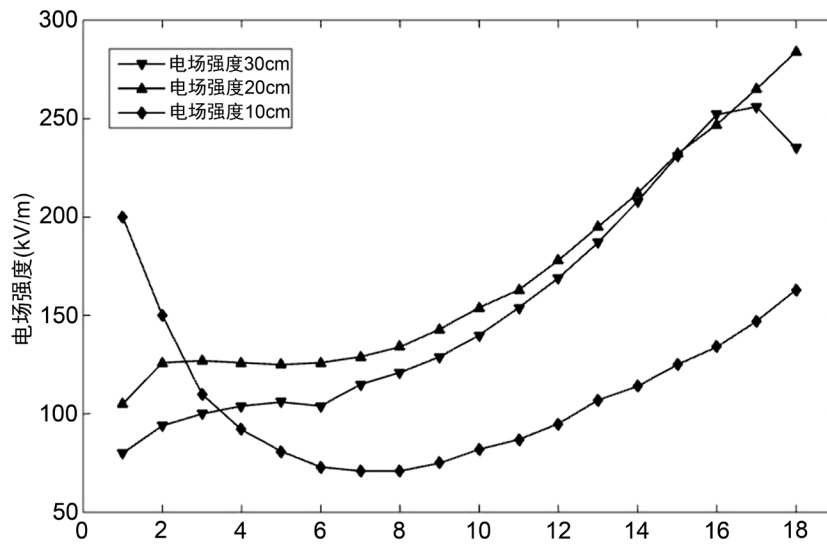


Figure 4. Electric field distribution curves at different measurement distances
图 4. 不同测量距离的电场分布曲线

2) 方案二

试品: 1#无缺陷, 电压为额定电压 220 kV。

测量所得的电场分布图如图 5 所示。

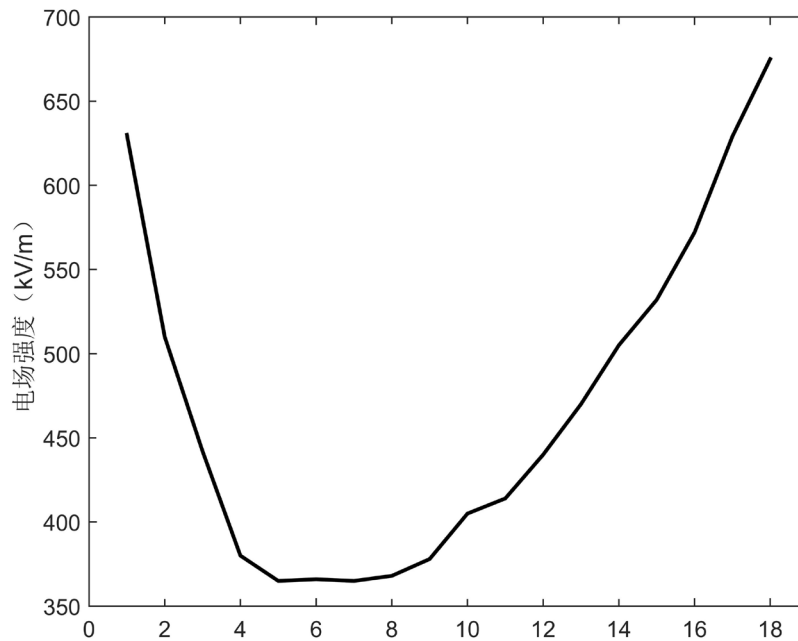


Figure 5. Electric field simulation results of the composite insulator in good condition
图 5. 良好复合绝缘子在额定电压下的电场分布

从图中可以看出, 良好的复合绝缘子在额定电压等级下的电场分布曲线和在降压运行条件下测得的表面电场强度分布曲线形状相同, 仅数值按照比例变化, 均呈现标准的 U 型分布。

3) 方案三

试品: 1#导通型缺陷: 用锡箔纸包住第 6 片伞裙位置的芯棒护套。测得的电场分布情况如图 6 所示。

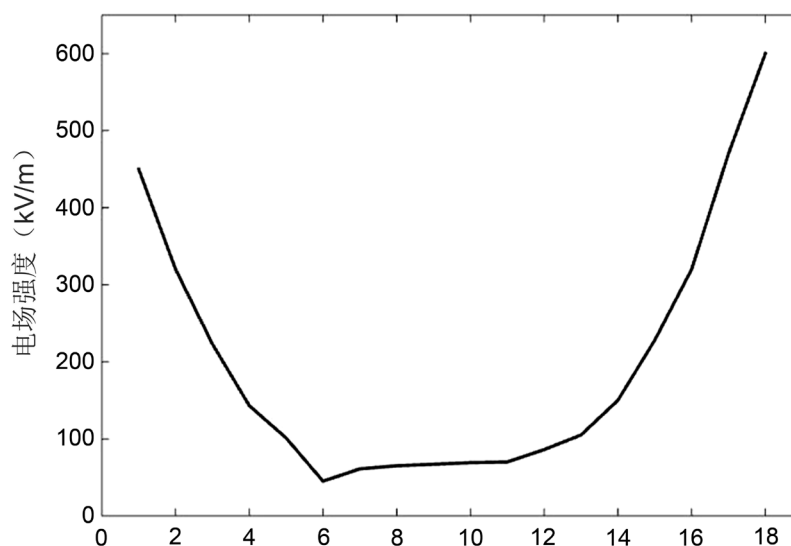


Figure 6. Electric field simulation results of the composite insulator with 6th shed position deteriorated
图 6. 模拟第 6 片伞裙位置劣化电场分布

试品：1#导通性缺陷：锡箔纸包住第 6、7 片伞裙位置的芯棒护套。测得的电场分布如图 7 所示。

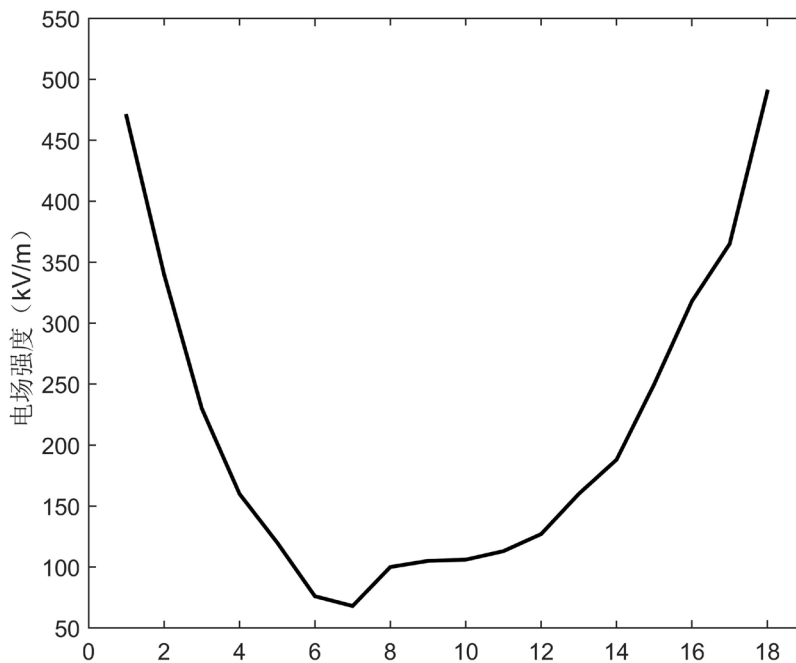


Figure 7. Electric field simulation results of the composite insulator with 6th and 7th shed position deteriorated
图 7. 模拟第 6、7 片伞裙位置劣化电场分布

试品：2#导通性缺陷：锡箔纸包住第 19 片伞裙位置的芯棒护套。测得的电场分布情况如图 8 所示。

从下图中可以看出，通过采用锡箔纸将芯棒护套包住的操作制造的绝缘子内绝缘导通性缺陷明显改变了绝缘子表面电场的分布，缺陷的位置与电场分布曲线的畸变位置基本吻合，得出可以直接通过对电场分布曲线进行分析，从而对这种类型的导通性缺陷的位置以及程度进行判别。

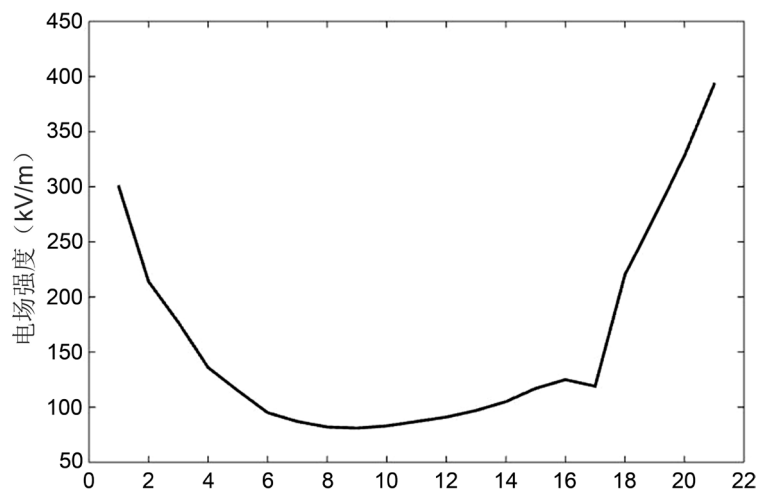


Figure 8. Electric field simulation results of the composite insulator with 19th shed position deteriorated
图 8. 模拟第 19 片伞裙位置劣化电场分布

4) 方案四

试品：1#盐水浸渍第 14 片伞裙。

试验测得的电场分布曲线如图 9 所示。

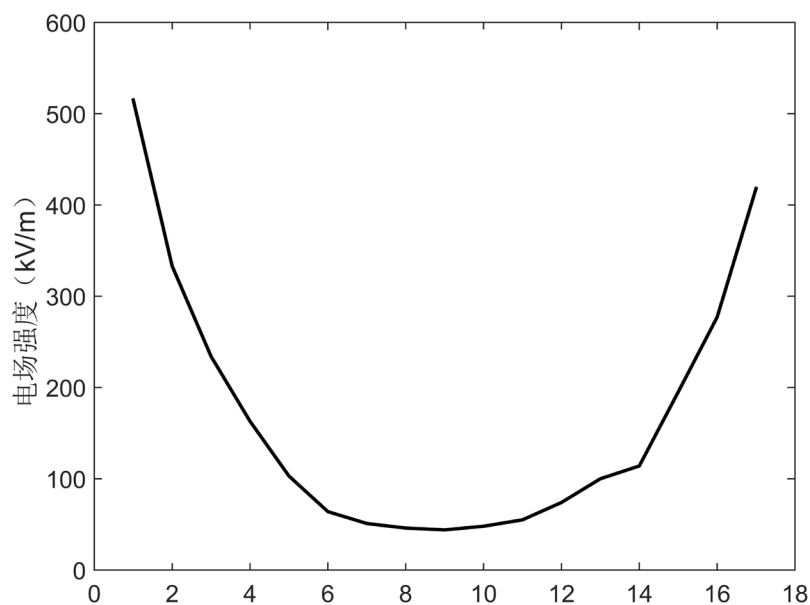


Figure 9. Electric field simulation results of the composite insulator with 14th shed position deteriorated by salt water immersion

图 9. 盐水浸渍模拟第 14 片伞裙位置劣化电场分布

从图中可以得出，盐水浸渍的合成绝缘子缺陷造成了电场分布曲线的畸变，但是影响程度较弱，电场分布曲线凹陷的位置和盐水浸渍的缺陷位置能够很好的对应。

5) 方案五

试品：3#无缺陷，高、低压端都去掉均压环。

试验测得的电场分布情况如图 10 所示。

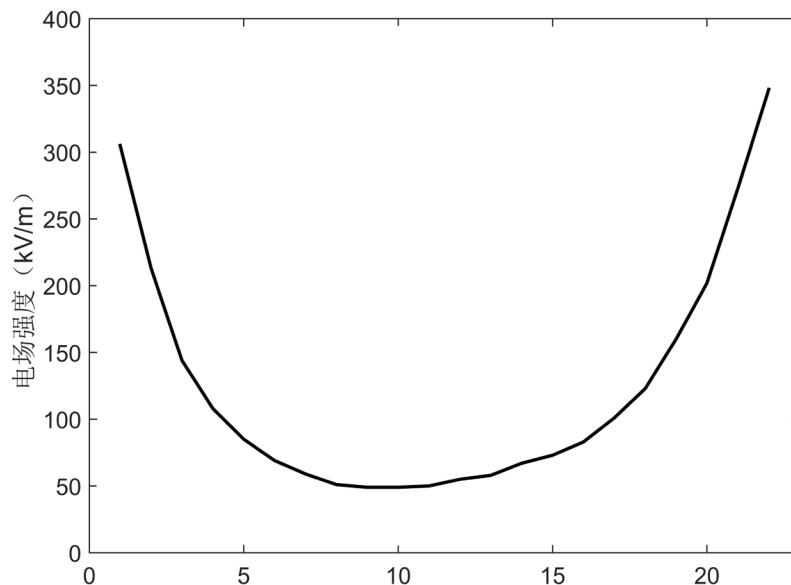


Figure 10. Electric field distribution of insulator without influence of grading ring
图 10. 无均压环影响的绝缘子电场分布

从图 10 可以看出是否有复合绝缘子均压环对电场分布曲线基本没有影响, 相反与有均压环的情况相比, 没有均压环时的电场分布曲线更为光滑, 最低点的位置朝高压端略有偏移, 曲线依然呈现 U 型分布, 并没有出现明显的局部凹陷。

3.3. 试验数据与理论的差异

将试验所得到的结果与理论研究结果进行对比可以发现, 理论和试验结果相互之间的吻合还是比较理想的, 虽然存在一些微小的差异, 但这些小的差异对于判断绝缘子的劣化情况, 特别是比较严重的导通性缺陷, 是没有影响的, 其中导致这些小的差异的原因可能有两点:

1) 在本次试验中, 绝缘杆是从侧面伸向绝缘子的, 但是在实际的输电线路中, 绝缘杆与绝缘子是平行放置的, 所以绝缘杆对于电场分布的影响会有不同。

2) 理论上来说, 要找到劣化绝缘子附近电场强度的最低点, 需要进行连续、无间隙的取点, 而在试验时采取的方法是每一片绝缘子取一个测量点。

4. 结论

本文介绍了一种以光学传感器为主要部件的劣化绝缘子检测设备, 介绍了它的工作原理, 提出了复合绝缘子劣化的带电测量方法, 并进行了在线的检测试验, 将试验所得到的结果与理论进行对比, 验证了此种检测方法的可行性, 试验结果表明, 绝缘子在高压端、低压端以及中部的劣化都能够通过电场测量数据形象化地体现出来, 说明本文介绍的通过电场检测判断劣化绝缘子的方法在实际输电线路可以得到运用。

参考文献

- [1] 陶留海. 特高压交流输电线路瓷质绝缘子带电检测技术研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(9): 18-23.
- [2] 刘晓伟, 王力农, 王军华, 李小春. 交流输电线路劣化瓷质绝缘子自动检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 110-115.
- [3] 赵柳. 关于 500kV 及以下变电站悬式绝缘子选择设计的建议[J]. 电气技术, 2013, 14(6): 66-70.

- [4] 王力农, 李小春, 宋斌, 胡鑫, 郭真萍, 刘晓伟. 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.
- [5] 潘荣超, 刘念, 甘德刚, 杨琳, 刘守豹, 李顺, 王利来, 李建. 500kV 绝缘子串含零值绝缘子时的电晕放电分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(6): 50-54.
- [6] Chen, W., Yao, C., Chen, P., *et al.* (2008) A New Broadband Microcurrent Transducer for Insulator Leakage Current Monitoring System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 355-360.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905833>
- [7] 李婵斌, 牛犇, 曾嵘, 余占清, 张福增. 基于光电电场传感器的复合绝缘子内部绝缘故障检测[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2422-2428.
- [8] 李长胜, 崔翔. 光学电场传感器研究综述[J]. 电气应用, 2008(16): 8-13.
- [9] 王锋, 张宏军, 温定筠, 张秀斌, 李亚军. 绝缘子表面电场强度和电压分布的实测研究[J]. 电气技术, 2016, 17(2): 28-31.
- [10] 许晓峰, 于洋, 朱义东, 胡大伟, 许东. 基于光纤传感器的劣化瓷质绝缘子检测方法研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(1): 14-17.
- [11] Fontana, E., Oliveira, S.C., Cavalcanti, F.J.M.M., *et al.* (2006) Novel Sensor System for Leakage Current Detection on Insulator Strings of Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 2064-2070.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.877099>
- [12] 邓红雷, 陈力, 鲁强, 戴栋, 李富才. 超声导波检测绝缘子用玻璃钢芯棒缺陷[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 268-276.
- [13] 魏梦婷, 黄道春, 霍锋, 阮江军, 黄从鹏. 特高压交流线路 Y 型复合绝缘子串静电场分布[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 203-210.
- [14] 高嵩, 刘洋, 薄斌, 陶风波, 周志成, 黄道春, 陈杰. 500kV 同塔双回线路污秽自动测量装置及其电场分布[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 510-515.
- [15] 祝永坤, 孙广, 高树永, 史文江, 许大鹏, 于明星, 秦滢滢. 基于光学电场传感技术的瓷质劣化绝缘子在线检测装置[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 138-142.
- [16] 成俊奇, 丁立健. 绝缘子表面电场分布的数值仿真[J]. 电瓷避雷器, 2009(6): 16-18.
- [17] 杨铁军, 续晋江. 光学电场传感器性能对劣质绝缘子检测结果的影响[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 17-20.
- [18] 张秀斌, 牟中华, 孙亚明, 彭鹏, 范迪铭. 基于 ANSYS 的 330kV 有机复合绝缘子表面电场建模和优化[J]. 电气技术, 2015, 16(6): 63-66.