

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.020

基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究

张东东¹, 常泽中¹, 万武艺¹, 张志劲², 陈久林³

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:采用电场法可检测出绝缘子串零值片,而现有技术通常通过扫测整串绝缘子的电场分布曲线来找出绝缘子串零值片,这一方法操作难度大、效率低。文中提出通过探测绝缘子局部电场的方法来识别零值绝缘子,首先建立零值绝缘子检测仿真模型,得到含检测装置的绝缘子串电场畸变特性;然后,通过该特性获得零值片的局部电场识别判据;最后,通过设计传感器、探测装置验证仿真结果,并实现零值绝缘子的点测识别。研究结果表明,采用三阵列电场法可以实现零值绝缘子检测。装置长度应大于电场的畸变区间长度,对于文中研究对象可取130 mm;识别判据为探头1、3变化率小于10%,探头2偏差率小于50%。检测时,对于高压端和中压端,检测装置应为正对钢脚,在低压端应为正对伞裙。研究结果可为输配电外绝缘智慧运维提供理论支撑。

关键词:带电检测;绝缘子;零值;电场;阵列传感器;有限元

中图分类号: TM216.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0193-09

0 引言

瓷质绝缘子作为一种十分重要的电气部件,被广泛应用于日常输电线路中,对于输电线路起到了机械支撑和电气绝缘的作用。工程现场使用的瓷质绝缘子主要由4个部分构成,分别为钢帽、粘合剂、瓷件和钢脚。正确工艺制作得到的瓷质绝缘子绝缘电阻较高,因此拥有良好的绝缘性能,但长时间工作在输电线路中,受到各种自然环境因素及高压的影响,瓷质绝缘子内部的粘合剂部分受腐蚀、高压作用而损坏造成绝缘电阻阻值不断降低,最终形成零值,从而使瓷质绝缘子丧失绝缘性能^[1-6]。绝缘子性能的降低给电网的稳定运行带来潜在的威胁,因此对绝缘子进行状态检测有着十分重要的现实意义^[7-9]。

现如今对于绝缘子零值检测技术主要分为2种,一种是传统的接触式检测方法,另一种是非接触式检测方法。传统的接触式检测方法以火花间隙法和绝缘电阻法为代表,需要登塔操作,费时费力,且绝缘电阻法需要停电。此外还有一些新兴方法^[10]不断被提出,例如紫外检测法^[11-12]、红外检测法^[13]和空间电场检测法^[14]。紫外法和红外法在测量零值绝缘子时容易受外部环境因素干扰,对检测

的环境要求比较高。空间电场法检测零值绝缘子是基于检测待测绝缘子的沿串电场分布得出电压分布曲线,并与完好绝缘子的电场分布曲线作对比从而得出待测绝缘子是否存在零值及零值位置,受外部检测环境干扰较小。

因此,电场法检测零值绝缘子相较其他方法有着显著优势,文献^[15]提出电场法更加适用于机器人检测的应用;文献^[16-20]提出一种基于空间电场法检测零值绝缘子的检测装置,但是该装置需要将绝缘子串的整串电场全部检测结束后再与完好绝缘子串的电场分布进行对比,检测效率较低;文献^[21-22]仿真分析绝缘子片出现零值时对绝缘子轴向电场的影响,得出在进行零值绝缘子检测时检测位置应尽可能贴近绝缘子的结论,文中在后续的研究中也充分考虑了这种情况。在此基础上,文中提出一种基于局部电场畸变特性的零值绝缘子片点测方法,首先采用塑料板模拟检测装置,基于COMSOL仿真研究了塑料板表面的电场畸变特性,得到了检测位置、零值片对电场畸变特性的影响,获得了零值绝缘子局部电场识别判据。继而研制了一种三阵列电场检测装置,并与仿真结果进行互相验证,实现了零值绝缘子的点测识别,点测识别实现了零值绝缘子的即检即测,相较于传统的电场检测法需完整测量整串电场才能识别零值绝缘子,大大提升了检测效率。文中研究成果可进一步应用于无人机^[23]、机器人^[24],实现超特高压零值绝缘子片的高效检测。

收稿日期:2024-01-13;修回日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077018);国家电网有限公司总部科技项目“输电线路通道资源保护利用与通道扩容技术研究”(5500-202118138A-0-0-00)

1 零值绝缘子局部电场畸变特征

1.1 零值绝缘子电场分布仿真模型

已有研究表明^[22,25],不同电压等级下绝缘子串周围电场分布特性相似,且当存在零值片时,整体分布曲线会发生相似的畸变现象。由上述研究可知电压等级只影响了零值绝缘子畸变电场的起始幅值,并不影响零值绝缘子局部电场畸变的特征,因此文中选取 14 片 XP-160 瓷质绝缘子为代表,通过静电场仿真获得其产生零值片后的局部空间畸变特征^[26-27],其中绝缘子的结构高度为 2 170 mm,盘径为 255 mm,钢帽长度为 100 mm,金具长度为 90 mm。零值绝缘子的三维模型如图 1 所示。

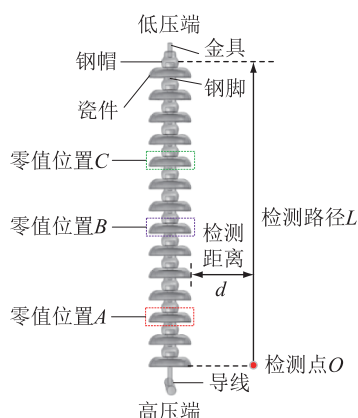


图 1 220 kV 瓷质绝缘子仿真模型

Fig.1 Simulation model of 220 kV porcelain insulators

其中电场的检测路径 L 为从高压端第一片最低端 O 点开始沿箭头方向进行,检测距离 d 为路径 L 上的点到瓷质绝缘子伞裙边缘平行位置的距离。

文中将瓷质绝缘子的钢帽、瓷件、钢脚进行贯穿处理,模拟存在零值的瓷质绝缘子。仿真模型中所需的不同材料的基本属性见表 1。

表 1 不同材料基本属性

Table 1 Basic properties of different materials

介质材料	相对介电常 ϵ	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
空气	1	10^{-13}
瓷	6	10^{-11}
水泥	14	10^{-11}
金具	1 000	5.998×10^6
导线	2 000	10^8

通过 COMSOL 有限元仿真软件求解瓷质绝缘子的电场分布特性,文中在仿真时按照表 1 中不同材料的相对介电常数以及电导率,为仿真模型不同区域设定表中对应材料的参数数值,边界条件的设置中对空气域和低压端的金具施加零电荷,对与瓷

质绝缘子相连的高压端导线和金具施加单相运行电压,幅值 179 kV^[28]。计及计算机的计算速度、精度,文中在仿真模型中对空气域部分的网格采用了较细化剖分,对绝缘子和装置仿真模型部分采用了极细化剖分。

1.2 绝缘子零值部位电场畸变特征

仿真时每次仅对绝缘子串设置一片零值绝缘子,将绝缘子串高压端第 3、7、10 片绝缘子按照上述方式分别设置为零值,检测距离 d 设置为 15 mm,零值位置在图 1 中体现为 A、B、C 处位置,通过 COMSOL 对绝缘子串进行静电场仿真,得到检测路径上瓷质绝缘子的沿串合成电场分布特性^[26]见图 2。

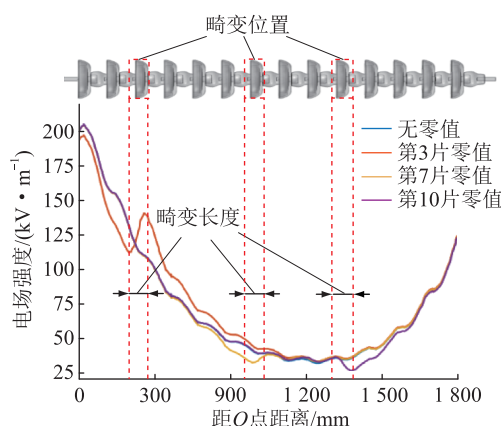


图 2 零值绝缘子电场分布曲线

Fig.2 Electric field distribution curves of zero-value insulators

由图 2 可知,当绝缘子串片处于零值状态时,零值绝缘子处的空间电场相较于完好绝缘子处的空间电场呈现“先降后升”的特征,且高压端和中压端畸变的位置正对钢脚,低压端畸变位置正对伞裙,畸变的长度为 110~120 mm。

因此,可通过局部的电场畸变特性来识别零值绝缘子片,而不需要通过整串的电场分布。在对局部电场进行检测时,首先考虑检测传感器本身对电场分布的影响,由上文仿真结果可知,传感器的检测长度应大于 120 mm 才能确保检测装置在检测时能够完整获取电场分布的畸变区间,因此首先将检测装置简化为一块长 130 mm、宽 100 mm、厚 10 mm 的有机塑料板,如图 3 所示,并根据图 2 的结果,设置检测塑料板位置处于高压端零值片的伞裙边缘,通过仿真来初步获得点测零值片时的局部电场畸变情况。

由于文中研究的是采用点测方式检测零值绝缘子,故不考虑检测距离的影响,仿真时统一设置检测距离 d 为 15 mm,得到当塑料板介入后,绝缘子的沿串电场分布特性如图 4 所示。图中 E_1 、 E_2 、 E_3

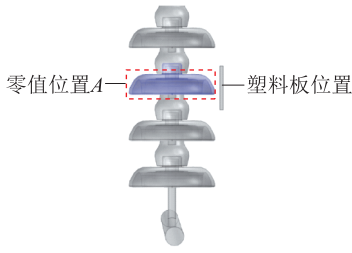


图3 塑料板放置具体位置

Fig.3 Specific placement of plastic panels

分别为无零值时塑料板顶部、中部、底部表面电场强度, E'_1 、 E'_2 、 E'_3 分别为零值时塑料板顶部、中部、底部电场强度。

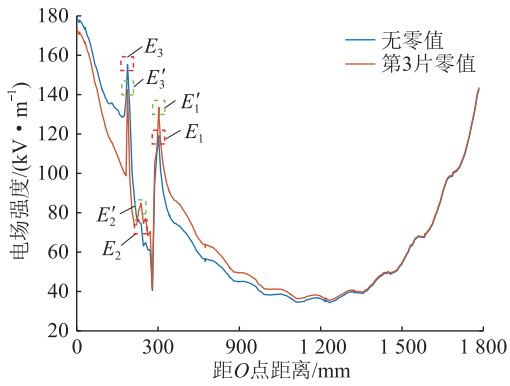


图4 放置塑料板后绝缘子沿串电场分布

Fig.4 Distribution of electric field along the string of insulators after placing plastic plates

由图4可知,当在绝缘子片外部放置塑料板时,塑料板表面的电场发生严重凹陷,通过绘制塑料板表面的电场云图进一步分析,如图5所示。由图5可知,当塑料板处于绝缘子片外部时,塑料板两端场强明显高于塑料板中部(图5中1和3处及1'和3'处的电场强度明显高于中部电场强度2和2'处)。在绝缘子零值与非零值状态下,塑料板两端的电场强度有明显差异,体现在靠近高压侧的一端降低,靠近低压侧的一端抬升,该差异是由图2中的零值片电场基本畸变特性所导致。

根据图4及图5中的3个典型位置的电场变化特性,计算局部电场变化率 η_{13} 和中部电场偏差率 η_2 , 分别如式(1)和式(3)所示。

$$\eta_{13} = \frac{|E_1 - E_3|}{\max(E_1, E_3)} \quad (1)$$

$$\eta'_{13} = \frac{|E'_1 - E'_3|}{\max(E'_1, E'_3)} \quad (2)$$

$$\eta_2 = \frac{|E_2 - \max(E_1, E_3)|}{\max(E_1, E_3)} \quad (3)$$

$$\eta'_2 = \frac{|E'_2 - \max(E'_1, E'_3)|}{\max(E'_1, E'_3)} \quad (4)$$

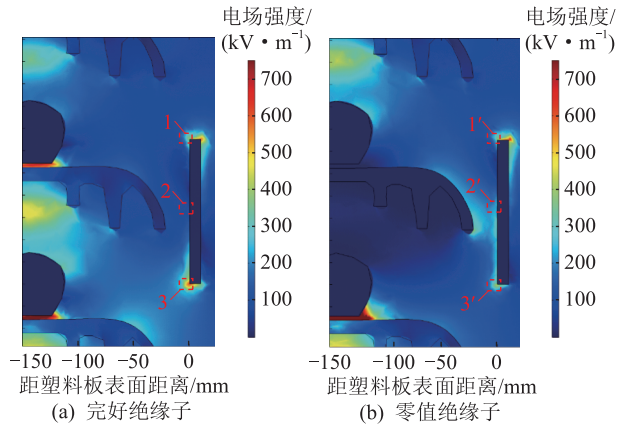


图5 绝缘子不同状态塑料板表面电场云图

Fig.5 Cloud diagram of electric field on the surface of plastic plates in different states of insulators

式中: E_1 、 E_3 为检测装置两端(包括塑料板两端)检测无零值时的电场强度; E_2 为检测装置中间位置(包括塑料板中间位置)检测无零值时的电场强度; E'_1 、 E'_3 为检测装置两端(包括塑料板两端)检测零值时的电场强度大小; E'_2 为检测装置中间位置(包括塑料板中间位置)检测零值时的电场强度; η_{13} 为检测装置端部(包括塑料板两端)检测无零值时的局部电场变化率; η'_{13} 为检测装置端部(包括塑料板两端)检测零值时的局部电场变化率; η_2 为检测装置中部(包括塑料板中部)检测无零值时的电场偏差率; η'_2 为检测装置中部(包括塑料板中部)检测零值时的电场偏差率。

计算得到,零值片下塑料板两端的局部电场变化率为4.84%,远低于绝缘子完好时塑料板两端的局部电场变化率28.06%。基于此,提出通过塑料板表面、两端和中间3个位置的电场强度大小来识别零值绝缘子片,首先通过识别凹陷程度来判断数据的有效性,继而通过判断两端电场变化率来判定是否为零值片。

2 检测装置对局部电场畸变特征的影响

由前文可知,在绝缘子串外部放置塑料板时绝缘子零值状态和完好状态的电场分布差异性较为明显,且3个点位的电场值均可以反映这种状态。在此基础上考虑研制三阵列电场检测装置,并进一步仿真研究检测装置实际本体对局部电场畸变造成的影响。

2.1 检测装置仿真模型

检测装置主要由检测探头、硅板、外壳组成。装置的外壳采用塑料,具有良好的绝缘性能,能够有效防止测量高压电极附近绝缘子发生放电现象。初步设计检测装置的外壳尺寸:长130 mm,宽100

mm,高 40 mm;检测探头尺寸:长 15 mm,宽 7 mm,高 2 mm;电路板尺寸:长 120 mm,宽 90 mm,高 2 mm。检测装置的三维模型如图 6 所示。

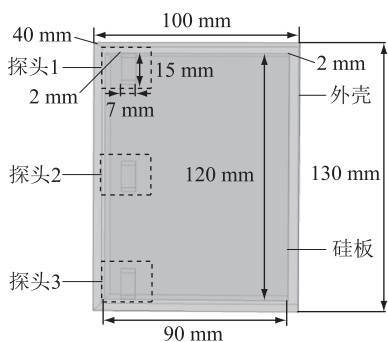


图 6 检测装置三维模型

Fig.6 3D model of detection devices

检测探头的布置位置为探头 1 和探头 3,处于装置最上端和最下端,探头 2 的布置位置位于装置中间。仿真示意如图 7 所示。由于传感器外壳采用方形结构,方形结构存在棱角情况,文中在仿真建模时已考虑棱角因素。

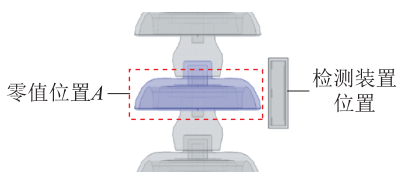


图 7 装置检测绝缘子时放置位置

Fig.7 Position of the device when detecting the insulator

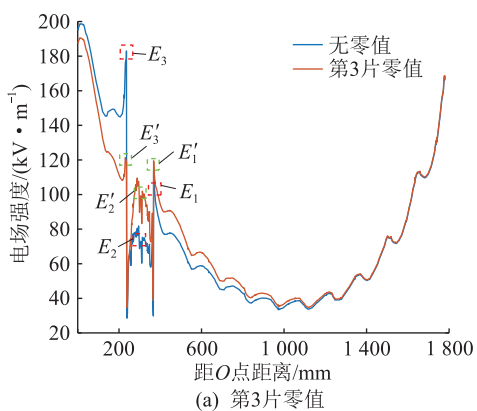
2.2 仿真结果及分析

按照前文每次仿真仅设置一片零值绝缘子的原则,分别将绝缘子串的高压端第 3、7、10 片绝缘子(对应图 1 的 A、B、C 处)设置为零值,得出含装置情况下绝缘子串的电场分布曲线,即图 8。由图 8 可知,当零值位置处于绝缘子串的高、中、低压端时,检测部位的电场畸变特征一致,即探头 2 位置电场强度较低,探头 1、3 位置的电场强度会因零值片的存在而得到不同程度的抬升或降低,从而使探头 1、3 电场强度值相当并且装置的引入对绝缘子串电场分布影响和前文塑料板引入对电场分布影响类似。

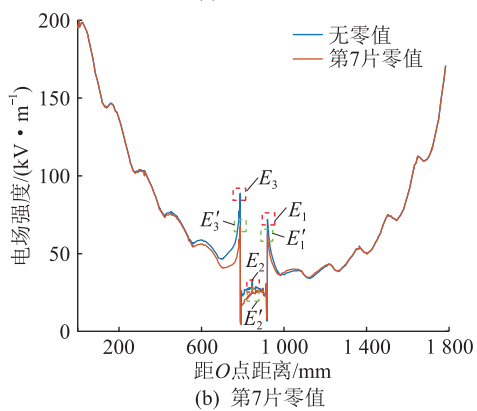
计算得到 3 个零值片情况下的探头 1、3 电场变化率和探头 2 的偏差率如表 2 所示。由表 2 可知,当绝缘子处于零值状态时, $\eta'_{i3} < 10\%$, $\eta'_2 < 50\%$ 。因此,基于 3 个探头测量的 3 个点位的电场强度可以有效识别零值绝缘子。

3 基于局部电场畸变的零值绝缘子点测试研究

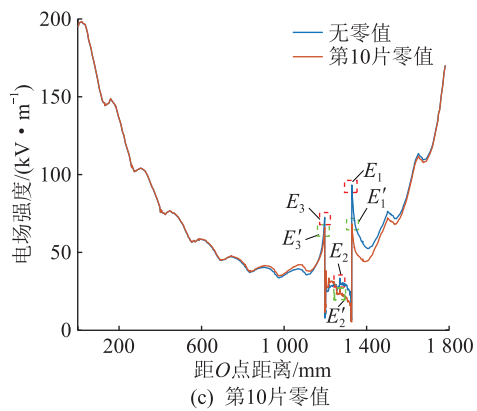
由前文的仿真可知,当瓷质绝缘子发生零值时,



(a) 第3片零值



(b) 第7片零值



(c) 第10片零值

图 8 典型位置零值含检测装置电场分布

Fig.8 Typical position zero-value including electric field distribution of detection devices

表 2 不同位置处装置检测变化率

Table 2 Change rate of device detection at different positions

检测位置	是否零值	探头 1 测量场强/(kV·m ⁻¹)	探头 3 测量场强/(kV·m ⁻¹)	变化率/%	偏差率/%
A 处	是	119.52	121.34	1.49	24.99
	否	113.83	183.01	37.80	55.19
B 处	是	62.50	67.40	7.27	45.50
	否	72.08	88.87	18.89	57.88
C 处	是	68.41	66.07	3.42	45.72
	否	93.32	72.54	22.27	58.88

通过局部电场特征可以有效识别检测,由此文中研制出一种三阵列式电场检测装置,通过检测瓷质绝

缘子的局部电场变化率来识别零值绝缘子。

3.1 检测装置工作原理

文中的电场检测装置是建立在静电感应的基础上进行研制。如图 9 所示,电场检测装置主要包括 7 个模块,分别为探头检测模块、信号处理放大模块,中央电场处理单元模块、无线通信模块、逆变处理模块、外部电源模块以及数据接收终端模块。空间电场检测装置的电路构造如图 10 所示。

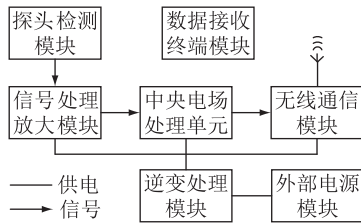


图 9 电场检测装置组成模块

Fig.9 Composition module of electric field detection devices

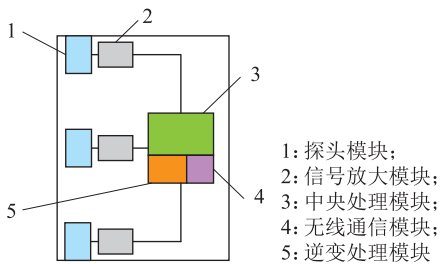


图 10 空间电场检测装置电路构造

Fig.10 Circuit structure of space electric field detection devices

3.2 试验平台及原理图

文中测量零值绝缘子所搭建的现场试验平台如图 11 所示,试验接线原理如图 12 所示。将 14 片 XP-160 瓷质绝缘子垂直悬挂在横担上,电场检测装置通过 2 根绳索固定。由图 12 可知,试验电源通过 2 台串级变压器经保护电阻施加在瓷质绝缘子的高压端,2 台串级变压器、支撑瓷质绝缘子横担及瓷质绝缘子低压端均实现可靠接地,空间电场检测装置与数据接收终端通过天线模块实现通信连接,试验检测时将检测装置紧贴绝缘子串用以控制每次检测距离相同。

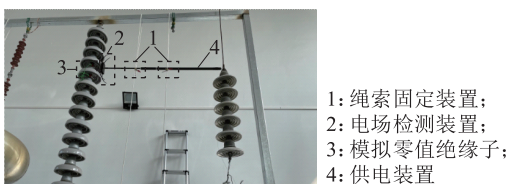
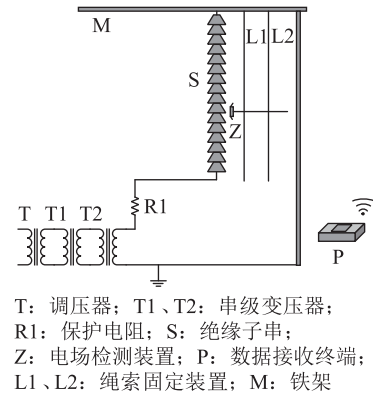


图 11 试验平台

Fig.11 The test platform



T: 调压器; T1、T2: 串级变压器;
R1: 保护电阻; S: 绝缘子串;
Z: 电场检测装置; P: 数据接收终端;
L1、L2: 绳索固定装置; M: 铁架

图 12 试验接线原理示意

Fig.12 Schematic diagram of the test wiring principle

3.3 试验结果及分析

3.3.1 零值瓷质绝缘子模拟方法

文献[29]指出,当绝缘子为零值状态时其阻值低于 10 MΩ。文中以通过导线将瓷质绝缘子的钢帽和钢脚相互连接的方式模拟零值绝缘子^[30]。为验证合理性,首先使用 ZC-7 型兆欧表测试现场真实零值绝缘子,测得该绝缘子的阻值约为 3 MΩ。使用导线连接正常绝缘子钢帽和钢脚模拟零值并将模拟零值绝缘子放置在待测绝缘子串高压端第一片,将三阵列检测装置放置在模拟零值片处,现场实物如图 13(a) 所示。在高压端施加 127 kV 工频交流电压测试阵列装置检测零值数据。接着选取实际零值绝缘子,将实际零值绝缘子放置在待测绝缘子串高压端第一片,将三阵列检测装置放置在真实零值片处,现场实物如图 13(b) 所示。在高压端施加 127 kV 工频交流电压测试阵列装置检测零值数据。

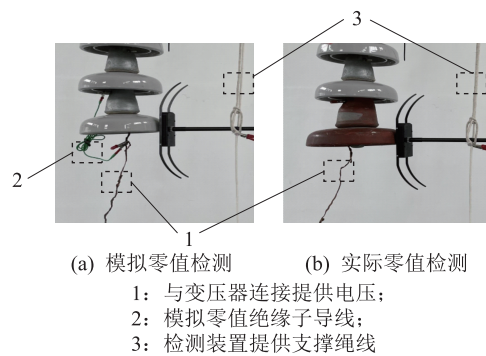


图 13 零值绝缘子检测

Fig.13 Zero-value insulator detection

通过一组对比试验验证使用短接法能否模拟零值绝缘子,对比试验检测数据如表 3 所示。由表 3 可知,在高压端施加 127 kV 工频交流电压,使用短接法模拟零值绝缘子片检测数据与真实零值绝缘子片检测数据误差小于 5%,且检测装置检测模

拟零值绝缘子所得规律与真实零值绝缘子片相同,因此使用导线短接绝缘子的钢帽和钢脚可以模拟零值绝缘子。

表3 真实与模拟零值检测数据

Table 3 Real and analog zero detection data

探头	真实零值场强/ (kV·m ⁻¹)	模拟零值场强/ (kV·m ⁻¹)	误差/%
1	215.82	207.57	3.82
2	117.76	113.53	3.59
3	217.73	210.50	3.32

文中试验采用绝缘子型号为 XP-160。试验过程中首先将装置外接电源和空间电场检测装置连接,使电场检测装置处于带电工作状态;接着将2根绳索悬挂在铁架上并使用绳夹将空间电场检测装置固定在待测绝缘子边缘,通过调节绳夹以及绳索来实现移动电场检测装置检测具体位置;每次检测试验时确保检测装置紧靠着待测绝缘子片,用以统一检测距离。试验时在绝缘子高压端施加 127 kV 工频交流电压用以模拟 220 kV 线路零值绝缘子的检测。

3.3.2 试验结果及识别判据验证

文中在检测时首先将待测绝缘子片模拟零值,然后将检测装置依次放置在待测零值绝缘子片的3处位置进行检测,接着将模拟零值导线去除,将检测装置放置在完好待测绝缘子片处,记录检测结果。按照上述方法逐片测量整串绝缘子,其中检测装置放置的3处位置分别为检测装置正对上方钢帽、检测装置正对绝缘子伞裙及检测装置正对钢脚处,检测装置放置位置示意如图14所示,并记录零值位置处测量数据,检测数据记录了每片绝缘子装置的最佳检测位置以及最佳检测位置时检测装置的探头数据,检测结果如表4所示。

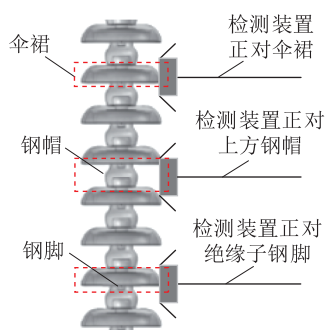


图14 检测装置放置位置示意

Fig.14 Schematic diagram of detection device placement

通过表4数据可得,当空间电场检测装置处于待测绝缘子串的钢脚,被检测绝缘子串中出现零值

表4 检测装置实测数据

Table 4 Measured datas of detection device

绝缘子	有无零值	探头检测场强/(kV·m ⁻¹)			变化率/%	偏差率/%	最佳位置
		探头1	探头2	探头3			
1	有	224.11	116.76	216.46	1.79	46.06	钢脚
	无	203.46	114.07	234.71	13.31	51.40	钢脚
2	有	203.97	109.32	206.66	1.30	47.10	钢脚
	无	177.24	95.57	213.37	16.93	55.21	钢脚
3	有	184.71	98.12	187.35	1.41	47.63	钢脚
	无	169.62	87.42	197.40	14.07	55.71	钢脚
4	有	165.53	87.32	169.58	2.39	48.51	钢脚
	无	146.61	74.63	177.97	17.62	58.07	钢脚
5	有	146.26	79.47	150.88	3.06	47.33	钢脚
	无	137.93	73.15	169.27	18.51	56.79	钢脚
6	有	126.15	67.19	129.76	2.78	48.21	钢脚
	无	113.15	61.17	137.79	17.88	55.61	钢脚
7	有	107.98	59.67	109.62	1.50	45.57	钢脚
	无	97.77	52.12	117.66	16.90	55.70	钢脚
8	有	88.67	47.46	90.57	2.10	47.60	钢脚
	无	72.65	44.98	107.95	32.70	58.33	钢脚
9	有	70.53	37.78	72.83	3.15	48.13	钢脚
	无	57.23	32.84	80.63	29.02	59.27	钢脚
10	有	53.37	28.82	54.61	2.27	47.23	伞裙
	无	48.23	23.92	67.34	28.38	64.48	伞裙
11	有	38.09	20.67	39.13	2.66	47.18	伞裙
	无	29.51	20.02	49.92	40.89	59.90	伞裙
12	有	25.09	14.56	25.87	3.02	43.72	伞裙
	无	22.36	14.47	34.75	35.65	58.36	伞裙
13	有	16.91	10.82	21.19	20.19	48.94	伞裙
	无	17.16	11.31	24.96	31.25	54.69	伞裙
14	有	11.96	11.31	17.16	30.30	34.09	伞裙
	无	11.96	8.71	21.06	43.21	58.64	伞裙

绝缘子时,探头1和探头3的实测电场强度出现了不同程度的抬升或降低,与前文仿真结果趋势相同,受试验环境影响绝缘子第13片和第14片零值时其电场强度较小,检测效果有所欠缺,后续将进一步完善检测装置。当绝缘子串高压端和中压端即绝缘子串中间部分出现零值绝缘子时,通过计算探头1和探头3的电场变化率及探头2的偏差率,得出当待测绝缘子片为零值绝缘子时,探头1和探头3的电场变化率低于10%,且探头2测得的电场强度与探头1和探头3中较大值的偏差率小于50%,与前文仿真结果相同。检测装置在检测绝缘子串高压端和中压端时检测效果较好且精度较高。

由上述检测数据可知当电场检测装置检测的绝缘子处于零值状态时, $\eta'_{13} < 10\%$, $\eta'_2 < 50\%$ 。装置的实测效果与前文仿真所得结果一致,验证了检测装置的有效性。后续将会进一步将检测装置

与无人机结合形成配套装置并实现现场应用。

4 结论

文中基于 COMSOL 静电场变仿真,提出基于零值绝缘子局部电场畸变识别零值绝缘子的方法,在此基础上研制了一种三阵列空间电场检测装置,通过试验验证检测装置的有效性,得出主要结论如下:

(1) 绝缘子存在零值状态时,其电场分布曲线相较于完好状态绝缘子发生明显畸变,对于文中研究对象,其畸变长度在 110~120 mm 之间,高压端和中压端畸变位置正对钢脚,低压端畸变位置正对绝缘子伞裙。

(2) 当检测装置的长度大于 120 mm 时,检测装置表面电场分布呈现两端高中间凹陷的特征,且在零值状态下,检测装置处于零值片位置时,其两端电场大小接近。

(3) 通过三阵列电场检测的方式可以获得局部电场畸变特征,从而识别绝缘子串零值片。对于文中研究对象,检测装置的长度应大于 120 mm,高压端与中压端最佳检测位置为正对钢脚,低压端最佳检测位置为正对伞裙,且零值的识别判据为 $\eta'_{13} < 10\%$, $\eta'_2 < 50\%$ 。

参考文献:

- [1] 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):28-29,33.
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):28-29,33.
- [2] 赵建坤,王森,安凯月,等. 盘形悬式瓷绝缘子炸裂事故原因分析及防范措施[J]. 内蒙古电力技术,2019,37(1):94-97.
ZHAO Jiankun, WANG Sen, AN Kaiyue, et al. Analysis of burst accident of ceramic cap and pin insulator and its preventive measures[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(1):94-97.
- [3] 周学明,尹骏刚,胡丹晖,等. 超-特高压长串瓷绝缘子温度分布曲线拼接方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):199-205.
ZHOU Xueming, YIN Jungang, HU Danhui, et al. Temperature distribution curve splicing method for EHV-UHV long string porcelain insulators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(3):199-205.
- [4] ZHENG T, ZHOU C, ZHOU L, et al. Fault analysis for lightning stroke-caused string fracture of 500 kV line porcelain insulators[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020), Online Conference. Institution of Engineering and Technology, 2021:15-18.
- [5] 王万昆,周学明,胡丹晖,等. 220 kV 悬式瓷绝缘子零值原因研究[J]. 湖北电力,2019,43(5):27-32.
WANG Wankun, ZHOU Xueming, HU Danhui, et al. Research

- on zero-value cause of 220 kV suspension porcelain insulator[J]. Hubei Electric Power, 2019,43(5):27-32.
- [6] 邱刚,陈杰,张迺龙,等. 基于 YOLOv3 和 HSV 颜色空间的绝缘子低/零值故障诊断研究[J]. 高压电器,2023,59(1):148-153.
QIU Gang, CHEN Jie, ZHANG Nailong, et al. Research of low/zero defect diagnosis of porcelain insulator based on YOLOv3 and HSV color space image processing technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(1):148-153.
- [7] 雷海洋,周玉龙. 输电线路绝缘子故障分析与检测方法综述[J]. 山东工业技术,2018(8):167.
LEI Haiyang, ZHOU Yulong. Summary of insulator fault analysis and detection methods for transmission lines[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(8):167.
- [8] 周学明,阚毅,李籽剑,等. 便携式特高压零值绝缘子检测装置设计与研究[J]. 湖北电力,2021,45(1):20-27.
ZHOU Xueming, KAN Yi, LI Zijian, et al. Design and research of portable UHV zero-value insulator detection device[J]. Hubei Electric Power, 2021,45(1):20-27.
- [9] 程洋,夏令志,孙昊,等. 基于电场分布曲线的瓷质绝缘子零值检测技术研究[J]. 高压电器,2023,59(11):74-83.
CHENG Yang, XIA Lingzhi, SUN Hao, et al. Research on zero-value detection technology of porcelain insulator based on electric field distribution curve[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(11):74-83.
- [10] 吴启进,刘继承,汤正汉,等. 光传感器中劣化绝缘子非接触式检测技术研究[J]. 自动化与仪器仪表,2020(1):177-180.
WU Qijin, LIU Jicheng, TANG Zhenghan, et al. Research on non-contact detection technology of degraded insulators in optical sensors[J]. Automation & Instrumentation, 2020(1):177-180.
- [11] 裴少通. 基于红外紫外成像检测技术的绝缘子运行状态分析与评估[D]. 北京:华北电力大学,2019.
PEI Shaotong. Analysis and evaluation of insulator operation status based on infrared and ultraviolet imaging detection technology[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2019.
- [12] HE H Y, HU Z, WANG B Z, et al. A contactless zero-value insulators detection method based on infrared images matching[J]. IEEE Access, 2020,8:133882-133889.
- [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] 张博禹. 瓷质劣化绝缘子串非接触式电场检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
ZHANG Boyu. Study on non-contact electric field detection method of porcelain deteriorated insulator string[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2022.
- [15] 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(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 (2):141-147.
- [16] 许义,路健,朱先启,等. 一种非接触式零值绝缘子检测方法及装置[J]. 广东电力,2021,34(3):130-136.
- XU Yi,LU Jian,ZHU Xianqi, et al. A non-contact zero-value insulator detection method and device[J]. Guangdong Electric Power,2021,34(3):130-136.
- [17] 王典浪,曹鸿,李国良,等. 500 kV GIL 三支柱绝缘子隐患分析及整治[J]. 高压电器,2023,59(3):195-203.
- WANG Dianlang,CAO Hong,LI Guogen, et al. Analysis and treatment of hidden trouble for 500 kV GIL three-pillar insulator[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(3):195-203.
- [18] 高黎明. 基于轻量化目标检测的绝缘子缺陷识别[J]. 高压电器,2023,59(12):239-244.
- GAO Liming. Insulator defect identification based on light-weight object detection[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(12):239-244.
- [19] 王力农,简思亮,宋斌,等. 基于电场分布测量法的输电线路劣化绝缘子检测研究[J]. 电瓷避雷器,2019(4):199-205,212.
- WANG Linong,JIAN Siliang,SONG Bin,et al. Research on the detection of faulty insulator in transmission line based on electric field distribution measurement [J]. Insulators and Surge Arresters,2019(4):199-205,212.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王平,李抗,耿江海,等. 110 kV 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.
- WANG Ping,LI Kang,GENG Jianghai, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57 (14):93-98.
- [23] 张志猛,李抗,刘杰,等. 基于无人机巡检平台的劣化绝缘子带电检测技术[J]. 科学技术与工程,2020,20(21):8616-8621.
- ZHANG Zhimeng,LI Kang,LIU Jie, et al. Live detection technology of deteriorated insulator based on unmanned aerial vehicle inspection platform[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(21):8616-8621.
- [24] 王海涛,郑雷,李健,等. 500 kV 瓷绝缘子串的分体式低/零值检测机器人优化设计与实测[J]. 高电压技术,2020,46(9):3035-3043.
- WANG Haitao,ZHENG Lei,LI Jian, et al. Optimization design and measurement test of a split low/zero insulator detection robot for 500 kV porcelain insulator strings [J]. High Voltage Engineering,2020,46(9):3035-3043.
- [25] 范强,罗浩,曲锴,等. 500 kV 输电线路低零值绝缘子对绝缘子串电压分布的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(12):74-78.
- FAN Qiang,LUO Hao,QU Kai, et al. Influence of low and zero resistance insulators on voltage distribution of insulator string in 500 kV transmission lines [J]. Insulating Materials,2018,51(12):74-78.
- [26] 何柏娜,孔杰,姜仁卓,等. 盆式绝缘子金属丝缺陷下电场分布仿真研究[J]. 绝缘材料,2021,54(1):39-44.
- HE Baina,KONG Jie,JIANG Renzhuo, et al. Simulation research on electric field distribution of basin insulators with metal wire defect [J]. Insulating Materials,2021,54(1):39-44.
- [27] 赵洲峰,薛志祥,邹君文,等. 基于激光超声表面波的盆式绝缘子表面开口缺陷成像与定量[J]. 高压电器,2023,59(2):127-132.
- ZHAO Zhoufeng,XUE Zhixiang,ZOU Junwen, et al. Imaging and quantification on insulating spacer surface opening defect based on laser ultrasonic surface wave [J]. High Voltage Apparatus,2023,59(2):127-132.
- [28] 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.
- YU Yang. Research on deterioration detection method of insulators in high voltage transmission lines [D]. Shenyang:Shenyang Insitute of Engineering,2019.
- [29] 曲金. 不同状态下绝缘子电场分析与检测研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- QU Jin. Research on electric field analysis and detection of insulators in different states [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2020.
- [30] 张东东,万武艺,刘欣,等. 基于无人机的绝缘子带电零值检测技术[J]. 电力工程技术,2023,42(1):234-242.
- ZHANG Dongdong,WAN Wuyi,LIU Xin, et al. Live zero value detection technology of insulator string based on UAV [J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(1):234-242.

作者简介:



张东东

张东东(1991),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:zhangdd@njit.edu.cn);

常泽中(1997),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

万武艺(1998),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术。

Zero-value insulator detection technology based on local electric field

ZHANG Dongdong¹, CHANG Zezhong¹, WAN Wuyi¹, ZHANG Zhijin², CHEN Jiulin³

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The zero-value piece of insulator string can be detected by measuring its electric field strength. The traditional way is always by measuring the electric field distribution curve of the whole string to judge out the zero-value piece position, which is inefficient and difficult to operate in field. In this paper, an improved method of identifying zero-value insulator by just measuring the partial electric field of insulator unit is proposed. Firstly, the simulation model of insulator string zero-value unit detection is established, and the partial electric field distortion characteristic caused by zero-value piece is analysed. Then the partial electric field variation criterion for zero-value identifying is obtained basing on the simulation result. Finally, the identification method is verified by designing the detection device and carrying out the point to point zero-value piece evaluating experiments. The results show that the point to point zero-value insulator detection can be realized using the three-array-probe electric field measuring method. The length of the array should be larger than the length of the electric field distortion interval, which can be taken as 130 mm for the research object in this paper. The identification criteria is that the deviation between probe 1 and 3 is less than 10%, and the deviation between probe 2 and the average is less than 50% at the same time. When detecting zero-value piece at the high-voltage and medium-voltage end, the best position for the sensor device identification is directly facing the steel foot, while for the low-voltage end, the best position is facing the shed edge. The results of the study can provide theoretical support for the intelligent operation and maintenance of external insulation in power transmission and distribution.

Keywords: electrified detection; insulator; zero-value; electric field; array sensors; finite element

(编辑 钱悦 方晶)

(上接第 192 页)

Reaction mechanism of winding corrosion induced by thiophene inactive sulfur in mineral insulating oil

GAO Sihang, HUANG Cong, WANG Rui, WEI Hao, LUO Xiaoting, HE Weisheng

(Chongqing University of Posts and Telecommunications (Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control Ministry of Education), Chongqing 400065, China)

Abstract: Strong corrosive active sulfur in the mineral insulating oil has been considered to be the main culprit to induce the insulation failures of oil-immersed power equipment. In order to protect the oil-paper insulation from sulfur corrosion, active sulfur is cleared in the refining process of crude oil. Some inactive sulfur with high antioxidant is still retained in the mineral oil to improve the oxidation stability of oil. However, the activation of inactive sulfur under the operating condition of oil-immersed power equipment is not gained attention. This paper focuses on the reaction mechanism of winding corrosion induced by non-active thiophene sulfide in mineral insulating oil. The thermal pyrolysis products of thiophene sulfide are investigated by the material phase analysis method, and the activation energy changes of thiophene sulfide at different heating rates are analyzed in combination with the pyrolysis kinetics analysis method, and the experimental study of inactive thiophene sulfide under the action of oil paper insulation thermal field is carried out. The results of gas chromatography, mass spectrometry and Fourier transform infrared spectroscopy show that the main activation product of thiophene sulfide (thiophene, benzothiophene, dibenzothiophene) during pyrolysis is H_2S , which is highly corrosive and volatile. The thermogravimetric and differential thermogravimetric curves of thiophene sulfides are basically the same at different pyrolysis rates, and thiophene is the most prone to pyrolysis, followed by benzothiophene and dibenzothiophene. Under the condition of low temperature superheating of oil paper insulation, due to the continuous accumulation of system energy, the inactive thiophene sulfide will be activated and then generate low molecular highly corrosive sulfide, which intensifies the corrosivity of oil products and leads to sulfur corrosion of oil paper insulation.

Keywords: mineral insulating oil; inactive sulfur; thiophene sulfide; activation mechanism; pyrolysis; sulfur corrosion

(编辑 方晶)