

毛兴,王路军,唐志宇. 基于带电测试技术的变压器内部绝缘子缺陷检测方法研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 150-160.  
MAO Xing, WANG Lujun, TANG Zhiyu. Study on live-line testing technique-based method for detecting defect of transformer internal insulator[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 150-160.

# 基于带电测试技术的变压器内部绝缘子缺陷检测方法研究

毛兴<sup>1,2</sup>, 王路军<sup>1</sup>, 唐志宇<sup>1</sup>

- (1. 云南电网有限责任公司曲靖供电局, 云南 曲靖 655000;
2. 昆明理工大学, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 由于水电站变压器内部绝缘子缺陷情况复杂, 现有检测方法评价指标较为单一, 无法准确检测变压器内部绝缘子缺陷情况。为解决该问题, 提出新的基于带电测试技术的变压器内部绝缘子缺陷检测方法。获取变压器内部绝缘子缺陷的发热与温升关系, 利用环境温度与运行负载参量的顶层油温对电力变压器绕组热点温度进行计算, 设计绝缘子缺陷检测试验, 测试变压器内部绝缘子在测量距离不同时的电场强度, 分析变压器内部绝缘子导通性缺陷的影响。结果表明: 测量距离 20 cm 时得到的分布曲线接近 U 型分布, 并且较为光滑; 在裂缝距离接近于 0 时, 电场强度出现最大峰值; 理论结果与实际结果拟合度在 90%~100% 之间。绝缘子的测量距离不同电场强度也不同, 且绝缘子伞裙芯棒片数越多, 电场强度越弱。实际结果对比拟合度较高, 说明基于带电测试技术的水电站变压器内部绝缘子缺陷检测结果可靠性强。该方法能准确检测出绝缘子缺陷, 且操作简单, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 带电测试; 水电站变压器; 绝缘子; 缺陷检测; 试验; 影响因素

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TM281

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)12-0150-11



## Study on live-line testing technique-based method for detecting defect of transformer internal insulator

MAO Xing<sup>1,2</sup>, WANG Lujun<sup>1</sup>, TANG Zhiyu<sup>1</sup>

- (1. Qujing Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Qujing 655000, Yunnan, China;
2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, Yunnan, China)

**Abstract:** Due to the complexities of the defects of the internal insulator of transformer in hydropower station, the evaluation indexes for the existing detecting methods are relatively simple and then cannot correctly detect the defects of the transformer internal insulator. In order to solve this problem, a new live-line testing technique-based method for detecting the defect of transformer internal insulator is proposed herein. With this method, the relationship between the heating and temperature rise of the internal insulator defect of the transformer is obtained, the hot spot temperature of the winding of the power transformer is calculated with the temperature of the environment and the top oil temperature of the operating load parameters, and then an insulator

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707043)

作者简介: 毛兴(1986—), 男, 工程师, 学士, 主要从事电力设备高压试验、诊断与评估方面的技术研究。E-mail: maoxingmx2@163.com

defect detection test is designed for testing the electric field strengths of the internal insulator of the transformer with different measuring distances ,while the influence from the conductivity defect of the transformer internal insulator is analyzed as well. The results show that the distribution curve obtained at the distance of 20cm is close to the U-shaped distribution and is relatively smooth , while the electric field intensity reaches the maximum peak value when the fracture distance is close to 0 ,for which the fitting degrees between the theoretical results and the actual results are between 90% and 100%. The electric field strengths are different for different measuring distance of insulator ,while the more the number of the core rods of insulator shed is ,the weaker the electric field strength is to be. The fitting degree for the comparison with the actual measuring result is higher ,thus it is indicated that the reliability of the detecting result of the defect of the internal insulator of transformer in hydropower station made by the live-line testing technique-based method is strong. This method can correctly detect the insulator defect through a simple operation ,and has a better application prospect.

**Keywords:** live-line testing; transformer of hydropower station; insulator; defect detection; test; influencing factors

## 0 引 言

水力发电具有污染小、稳定性高、可靠性强的优点,成为全球电能的主要供应能源。大型水轮发电机内部结构较为复杂,呈现分支结构,一旦某一支结构出现故障,则会对该分支结构产生连续影响,定子绕组的对称性受到破坏。水轮发电机出现故障时,维修工作较为困难,会对发电机的运行状态产生影响,严重者会影响电力系统的稳定性以及可靠性。水力发电作为输变电系统重要设备,水电站变压器内部绝缘子缺陷及劣化,导致绝缘子出现发热及电流泄漏现象,导致经济损失,对水电站变压器运行安全性十分重要。绝缘子安装在导体与地电位或不同电位导体之间耐受机械应力与电压,是输变电设备中关键部分<sup>[1]</sup>。当绝缘子受电负荷条件和环境影响,易于出现水电站变压器应力失效,导致电路出现故障<sup>[2]</sup>。水电站变压器内部绝缘子缺陷会影响其轴向电场分量和表面径向,利用周围电场分布曲线的形状可用来检测绝缘子缺陷。如果绝缘子内部存在气隙,会对绝缘子电场强度产生影响,必须开展相关试验对绝缘子自身的性能进行检测,判断其是否达标。发电机装机容量逐年增加。绝缘子作为输电设备不可缺少的组成部分,与电力工业的发展密不可分。绝缘子安装在不同电位的导体之间或导体与地电位构件之间,能耐受电压和机械应力作巧的器件。绝缘子不应该由于环境和电负荷条件发生变化导致的各种机电应力而失效,一旦绝缘子发生故障甚至损坏,就会导致整条线路的故障。绝缘子巧障主要有以下几个方面:绝缘子内部出现裂缝、绝缘子表面破损、绝缘阻抗降低及污闪等。绝缘子种类不同,出现故障时所呈现的现象也不同。如:绝缘子串中存在不良绝缘子时,不良半导体绝缘子温度

变化可能较大,而玻璃绝缘子和普通釉绝缘子的温度变化较小。相应的高压绝缘子在线检测方法也多种多样,绝缘子分布的广泛性和安装点的特殊性更增加了绝缘子检测的难度。

文献[3]提出基于 PSPICE 软件的水电站变压器绕组绝缘子缺陷诊断方法,利用小波变换法找到绝缘子故障频率响应曲线的谐振点和幅值的变化情况,提取出特征向量,构造神经网络的训练样本,最终实现水电站变压器绕组绝缘子缺陷诊断。但是该方法存在试验结果不全面等问题,未深入研究绝缘子缺陷对其电场影响问题。文献[4]提出基于混合放电模型的水电站变压器内部绝缘子放电联合检测方法,采用复合信号采集系统实现水电站变压器内部绝缘子信号特性提取,实现多信号特征的综合分析,该方法的绝缘子故障局放信号辨识准确,可以满足监测要求,但该方法耗时较长。文献[5]提出采用统计工具 SPSS( statistical product and service solutions)对水电站变压器绝缘子缺陷进行检测,获取水电站变压器各参量之间关系,在此基础上得到参量关联度及对绝缘子健康指数的贡献值,结合统计方法确定量化权重,实现水电站变压器的绝缘子缺陷的检测。

为解决传统方法存在的问题,研究基于带电测试技术的水电站变压器内部绝缘子缺陷检测方法。带电检测指在设备带电运行时,检测其现场状态量,观察设备故障中异常现象,能够及时对潜在的设备运行故障进行检测,具有较强实用性。带电检测技术可以作为发现电力设备潜在故障的主要技术,可以通过该技术对设备的状态量进行获取,对设备状态加以评估,对潜在事故进行预防,最大程度降低故障损失,提高水电站工作效率。封闭式气体绝缘组合电器 GIS( Gas Insulated Switchgear)由于其较好的绝缘性能,不仅在高压、超高压领域被广泛应用,在特高压领域也被

高度重视; 此外, 由于 GIS 具有检修周期长、环境适应能力强、可靠性高、配置灵活等优点, 其在电力系统中的应用越来越广泛。通过获取变压器内部绝缘子缺陷的发热与升温关系, 利用环境温度与运行负载参量的顶层油温对电力变压器绕组热点温度进行计算, 设计绝缘子缺陷检测试验, 测试变压器内部绝缘子在测量距离不同时的电场强度, 分析变压器内部绝缘子导通性缺陷的影响。

### 1 水电站变压器内部绝缘子的缺陷劣化分析

绝缘子缺陷主要包括两个方面, 分别为表面缺陷以及内部缺陷, 表面缺陷包括绝缘伞裙的侵蚀、裂缝等, 外表面层出现侵蚀、芯棒出现外漏等, 内部缺陷主要包括材质缺陷、绝缘子内部出现气泡以及裂缝。水电站变压器内部绝缘子的劣化通常表现为绝缘子瓷柱断裂或出现裂纹。以上情况容易导致水电站变压器内部绝缘子串出现“零值”, 减少绝缘子串爬电距离, 增加绝缘子闪络概率。当带“零值”的水电站变压器绝缘子发生污闪时, 电流会通过“零值”绝缘子, 水电站变压器内部短路电流出现热效应会使绝缘子的钢帽脱开, 导致出现水电站变压器内部绝缘子串断串事故。

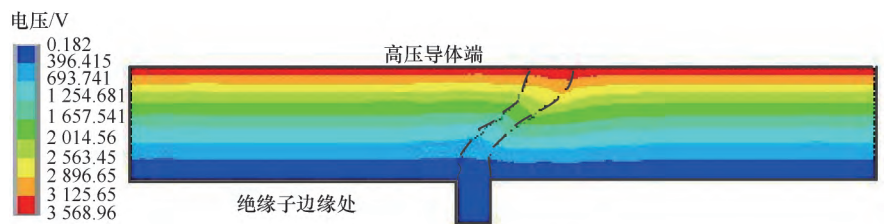
在不设置任何缺陷的情况下, 仿真得电压及电场分布云图如图 1 所示。

由图 1 电场疏密程度的变化可以看出, 在高压导体一端, 可以发现绝缘子的电场强度较高, 在绝缘子边缘处, 电场强度出现减弱的现象, 由此, 可以判断出, 相比于母线处的电场强度, 绝缘子表面的电场强度较低, 符合绝缘子结构设计条件, 保证试验结果的可靠程度。

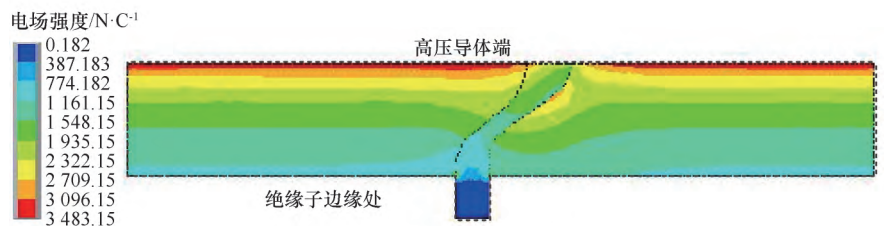
绝缘子内部出现气泡缺陷, 导致电场强度出现变化, 设置气泡缺陷模型如图 2 所示。由图 2 可以看出, 电场强度整体呈现较为均匀分布规律, 图中红色圆

圈表示气泡缺陷, 可以发现缺陷处的电场强度呈现最高, 且气泡附近的电场强度较其他部位变化较大。

水电站变压器内部绝缘子缺陷、劣化受多种因素的影响, 分析如下: (1) 在制作绝缘子时, 材料不当或制造原料不均匀, 会导致绝缘子产生吸湿气孔; 绝缘子内部结构设计的不合规矩, 或者受力不均的情况, 会对绝缘子内部应力产生一定的影响, 内部应力会在绝缘子运行过程中对其结构做出改变, 使绝缘子产生裂纹, 在载荷的作用下出现断裂现象<sup>[6]</sup>。通常情况下, 若采用水泥作为胶合剂, 进行绝缘子的制备, 由于水泥会受到水分的影响, 会出现反复融解和冻结的现象, 从而加速绝缘子的劣化<sup>[7]</sup>。(2) 铁、水泥、陶瓷相结合构成的绝缘子,



(a) 整体电压分布云图



(b) 整体电场分布云图

图1 电压及电场分布云图

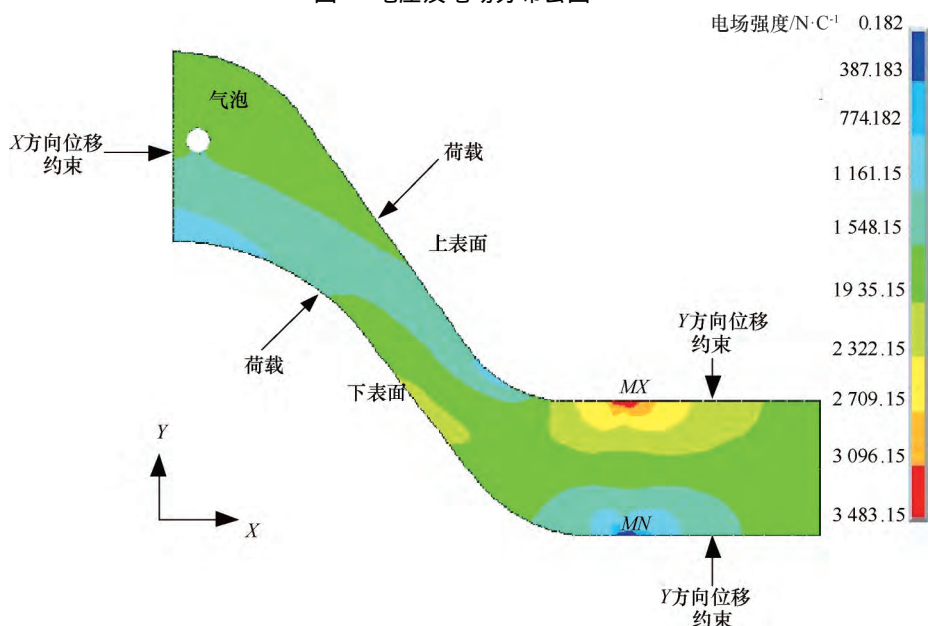


图2 气泡缺陷下绝缘子轴截面

在水电站变压器使用过程中,受自然条件的作用会出现冷热及吸湿变化。由于三种材料的导热与热膨胀系数不同,使绝缘子出现不均匀结构应力。其材料会自然老化,吸湿严重会使绝缘子材料中胶合剂老化。经过日晒和降雨,水电站变压器内部绝缘子的各个组成部分不能及时胀缩,使绝缘子头部将承受较大机械应力,甚至开裂。根据运行经验得出,质量较差绝缘子经过夏季暴晒与暴雨后,其劣化率高于冬季<sup>[8-9]</sup>。(3)水电站变压器内部绝缘子受长期运行电压作用,在潮湿地区会出现电晕,导致绝缘子龟裂、局部发热。同时,绝缘子在运行过程中长期受到机械负荷作用,受到机械负荷越大劣化率越大,产生缺陷越多。

造成绝缘子缺陷和劣化原因较多,为避免有缺陷、劣质绝缘子在水电站变压器中运行,防止事故发生<sup>[10-12]</sup>,需要检测水电站变压器内部绝缘子缺陷,分析带电测试技术在其检测中的应用。

## 2 基于带电检测技术的绝缘子缺陷检测

### 2.1 带电检测技术

带电检测技术具有检测时间短、检测灵活性高的优点,被广泛应用于保电相关工作中。在电力设备状态处于行程运行状况时,通过该技术对设备状态量进行获取,停电等突发状况产生的影响不大,因此检测周期可以灵活安排,对于电力设备的隐患可以做到及时检测,并对隐患变化趋势做出准确判断。在水电站变压器设备带电运行条件下,对设备状态量进行现场检查,重点监测“振动、超声波、电磁波、发热”等参数。

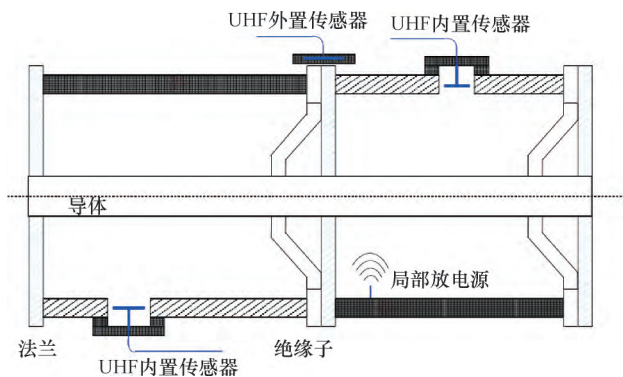


图3 特高频法示意

封闭式气体绝缘组合电器 GIS ( Gas Insulated Switchgear) 内部局部放电产生的特高频信号在 GIS 腔体内以横向电磁波方式传播,在 GIS 上只有无金属法兰的绝缘子、观察窗、接地开关的外露绝缘件,内置

CT、PT 二次接线盒等部位测量信号, SWS-50 A 特高频传感器需安置在该处,传感器需要与绝缘子紧密接触,且放置于两根禁锢盆式绝缘子螺栓的中间,减少螺栓对于内部电磁波的屏蔽及传感器与螺栓产生的外部静电干扰。

特高频传感器主要使用高通滤波器做成,根据以往局部放电故障的已有数据,来判断局部放电的类型,通过坐标图对特高频检测出来的数据进行显示,如图4所示。

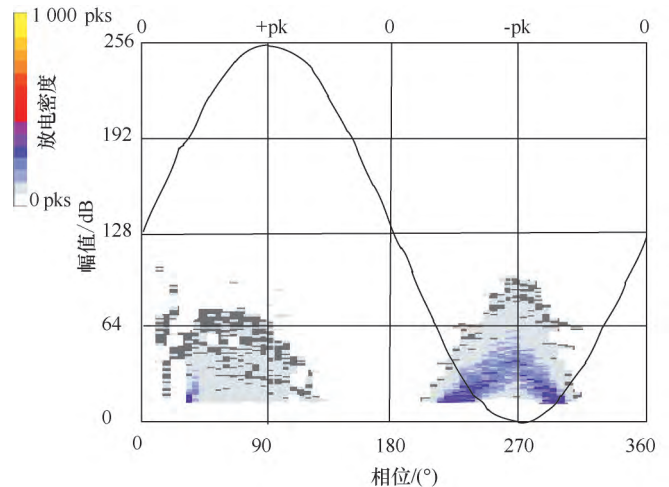


图4 特高频检测结果坐标

通过特高频检测结果坐标图,可以分析特高频信号的相位、幅值以及放电密度之间的变化。

对 110 kV 变压器铁芯接地及中性点接地位置进行特高频检测,发现两处接地处均出现异常高频信号。具体现象为: 1 簇脉冲信号出现在工频相位下,明显具有非对称性,脉冲的数量受到限制,脉冲信号的最大值为 32 dB。

通过特高频检测结果,对电力设备的健康状态加以判断,由此观察设备是否存在异常状况。

### 2.2 水电站变压器内部绝缘子发热故障检测

绝缘子发热故障检测主要包括对绝缘子故障处温度的识别以及其分布特征变化的检测,绝缘子发热理论如下。

#### 2.2.1 极化效应导致发热

在不同交流电压环境下,水电站变压器绝缘子会产生极化效应,对绝缘子的发热功率产生影响。其发热功率可以表示为

$$p_1 = U_d^2 \omega C \delta \quad (1)$$

式中,  $p_1$  为绝缘子的发热功率(W);  $U_d$  为绝缘子的发热电压(V)。

同时,可以得到水电站变压器内部绝缘子表面相

对于环境的温升

$$\Delta\theta_1 = \theta_s - \theta_a = \frac{U_d^2 \omega C \delta}{hA} \quad (2)$$

$$h = h_c + 4T_s^3 \quad (3)$$

式中,  $\theta_s$  为水电站变压器内部绝缘子的表面温度(°C);  $\theta_a$  为环境温度;  $U_d$ 、 $C$  分别为水电站变压器内部绝缘子的分布电压、等值电容;  $\omega$  为电压角的频率;  $\delta$  为介质损耗因数;  $A$ 、 $T_s$  分别为水电站变压器内部绝缘子的表面面积、热力学温度;  $h$  为散热系数, 包括辐射散热和流散热的总贡献。

### 2.2.2 穿透性泄漏电流导致发热

水电站变压器内部绝缘子穿透性泄漏电流会引起绝缘子发热, 其发热功率为

$$p_2 = U_d I_g \quad (4)$$

此时水电站变压器内部绝缘子钢帽温升的表达式如下

$$\Delta\theta_2 = \theta_c - \theta_a = \frac{U_d I_g}{hA} \quad (5)$$

式中,  $\theta_c$  为水电站变压器内部绝缘子顶帽的温度(°C);  $I_g$  为泄漏电流, 该电流利用带电测量技术进行测量。

通过构建热点温度计算模型, 对热点温度的数值加以求解, 具体如图 5 所示。

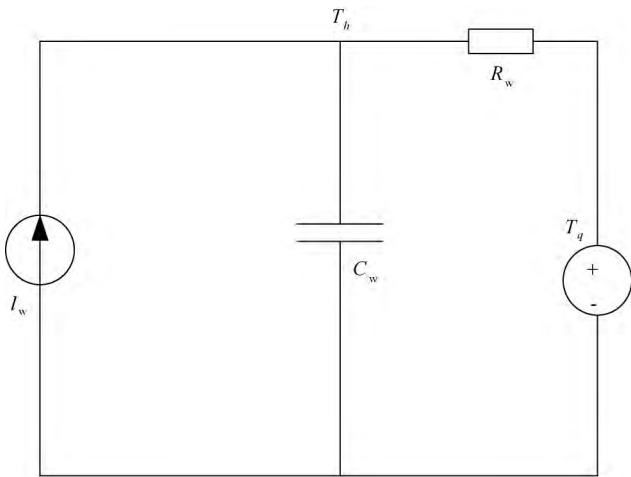


图 5 热点温度计算模型

图 5 中,  $I_w$  表示绕组的损耗,  $C_w$  表示集总热容,  $R_w$  表示集总热阻,  $T_h$  表示最终热点温度,  $T_q$  表示求得的顶层油温。热点温度计算模型可以通过绕组损耗进行描述, 具体表达式为

$$I_w = C_w \frac{dT_h}{dT} + \frac{\lambda_h}{R_w} \quad (6)$$

热阻  $R_w$  可通过热传递理论得出, 公式描述为

$$R_w = \frac{\lambda_h}{l_w} \quad (7)$$

式中,  $\lambda_h$  为热点温度与顶端温度升高的变化(°C),  $\lambda_h = T_h - T_q$ ;  $T$  用于描述油道内某处油温。根据传热理论, 对传热系数  $k$  进行求解, 具体求解方式为

$$k = \frac{C_w \times \eta}{D} \cdot \left[ \left( \frac{c_r \times v}{\eta} \right) \cdot \left( \frac{D^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \alpha \cdot \lambda_h}{v^2} \right) \right]^\gamma = C \cdot \left( \frac{\lambda_h}{v} \right)^\gamma \quad (8)$$

式中,  $D$  为油道长度(m);  $\rho$  为油密度;  $c_r$  为油流比热容;  $g$  为重力加速度;  $\alpha$  为油膨胀系数;  $\eta$  为油热导率;  $v$  为油黏度。

综上, 变压器的顶层温度对于其绕组热点温度起关键性作用, 可以通过环境温度与运行负载参量之间的关系, 对热点温度进行计算。

### 2.2.3 表面爬电泄漏电流导致发热

绝缘子表面爬电泄漏电流所产生的发热功率可表示为

$$p_3 = U_d I_{gs} \quad (9)$$

水电站变压器内部绝缘子的表面温升公式为

$$\Delta\theta_3 = \theta_s - \theta_a = \frac{U_d I_{gs}}{hA} \quad (10)$$

式中,  $I_{gs}$  为带电检测技术测得的爬电泄漏电流(A)。

固态变压器电源切换故障点定位时, 评价函数不同, 其具有的容错性也存在差异, 且判断结果之间也会出现不同。判断结果的优劣与评价函数的选择具有重要的关联。为了防止一值多解的情况出现, 导致误判, 可以对评价函数进行改进, 本文依据最小值概念, 改进评价函数, 改进后的表达式为

$$F(S_B) = A - \sum_{j=1}^N |I_j - I_j^*(S_B)| - w \times \sum_{i=1}^M |x(i)| \quad (11)$$

式中,  $A$  为适应度值为正数的数值, 转换评价函数最小值问题, 使其转变为最大值求解问题;  $F(S_B)$  为每个解对应的适应度;  $S_B$  为智能电网下固态变压器电源设备状态;  $N$  为智能电网固态变压器电源的开关总数;  $I_j$  为第  $j$  个开关的实际状态, 当该值为 1 时, 故障电流传输受到限制, 在该值为 0 时, 表示此时没有电流经过;  $I_j^*(S_B)$  为第  $j$  个开关的期望状态, 可以表示为电网固态变压器设备状态相关的开关期望函数;  $M$  为智能电网固态变压器电源设备总数;  $x(i)$  为第  $i$  个智能电网下固态变压器电源设备状态, 取值为 1 表示智能电网固态变压器电源设备故障状态, 取值为 0 表示设备正常状态;  $w$  为智能电网固态变压器电源切换故障设备总数的权重, 取

值为小于 1 的正数。依据评价函数，由电网固态变压器电源设备状态得到期望开关状态，计算获取与实际开关状态之间的差值变化，依据权重字数与设备故障总数之间的乘积结果，保障不出现误判。

通过电网固态变压器电源设备的状态信息采集情况，引入开关函数求解开关期望状态，通过开关下游的设备状态进行数值大小的判定，开关函数表达式为

$$I_j^*(S_B) = \prod_i x(i) \quad (12)$$

式中， $\prod_i x(i)$  表示逻辑或。

在单电源智能电网中，1 表示进线断路器，2 到 4 表示分段开关， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别表示智能电网固态电压器内的电源设备，设备和设备状态对应关系如表 1 所列。

表 1 设备和设备状态之间的对应关系

设备	设备状态
$S_1$	$x(1)$
$S_2$	$x(2)$
$S_3$	$x(3)$
$S_4$	$x(4)$

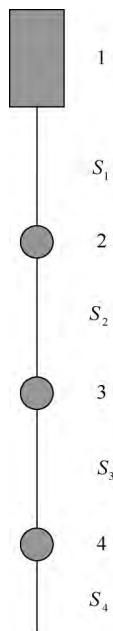


图 6 单源辐射电网

开关 1 的开关函数如式(13)所示，其他开关函数以此类推。

$$I_1^*(S_B) = x(1) \prod x(2) \prod x(3) \prod x(4) \quad (13)$$

通过上述计算可知，绝缘子三部分的发热均与电压分布有关。发热不同产生的温升也不同，说明水电

站变压器内部绝缘子运行时的温升与分布电压有直接关系。其分布电压与自身电容、绝缘电阻以及杂散电阻有关<sup>[13-14]</sup>。在水电站变压器内部绝缘子结构中，表面温度的变化与绝缘电阻之间存在一定的关联，根据绝缘子表面温度变化的检测结果，可以获取水电站变压器绝缘子结构的缺陷信息。

### 2.3 水电站变压器内部绝缘子缺陷的发热与温升关系

在以上绝缘子表面温度分析基础上，研究水电站变压器内部绝缘子缺陷发热与温升关系。水电站变压器内部绝缘子串的缺陷绝缘子随绝缘电阻值减小，分布电压与温升随着电阻减小产生相对应的变化情况。对于绝缘子缺陷来说，绝缘子分布电压与温升随电阻值的变化如图 7 所示。

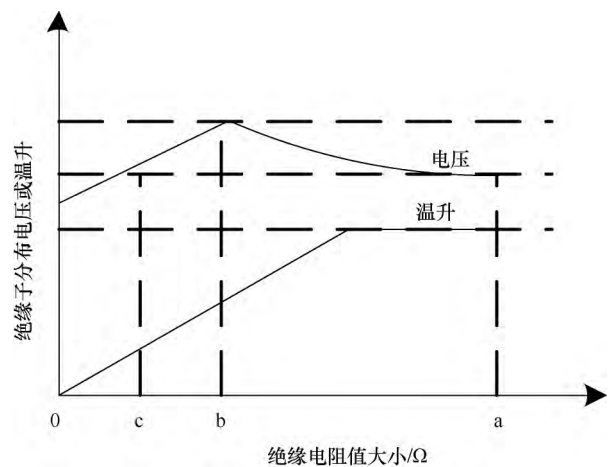


图 7 绝缘子的分布电压和温升随电阻值的变化

从图 7 可以看出，绝缘电阻  $R \geq a$  水电站变压器内部为良好绝缘子，给定位置绝缘子的分布电压近似于恒定值，并且与电阻值无关<sup>[15-16]</sup>，则水电站变压器内部绝缘子的表面与温升也为近似恒定，可以由式(2)来确定。

绕组直流损耗与温度变化呈现正相关，温度升高，绕组直流损耗增加，绕组涡流损耗与温度变化呈现反向变化关系，随着温度的升高而降低。负载损耗随温度的变化情况为

$$W_l(T_h) = W_d \times \left( \frac{\lambda_h + \Delta\lambda}{\lambda_{h,r} + \Delta\lambda} \right) + W_e \times \left( \frac{\lambda_{h,r} + \Delta\lambda}{\lambda_h + \Delta\lambda} \right) \quad (14)$$

式中， $\Delta\lambda$  为温度校正因子(单位回复：无单位)； $W_d$  为绕组直流损耗随温度变化因子； $W_e$  为绕组涡流损耗随温度变化因子。

得出热点温度计算方程为

$$\{ K^2 \times W_l(T_h) \} (v_b \cdot \lambda_{h,r})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = (T_h - T_q)^{\frac{1}{\gamma}} + t_{h,r} (v_b \cdot \lambda_{h,r})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \frac{dT_h}{dT} \quad (15)$$

式中,  $t_{h,r}$  为变压绕组的时间常数( min ), 一般取值范围为 70~90 min;  $K$  为负载系数;  $\gamma$  为经验系数, 其取值与冷却方式有关。

表 1 描述的是不同情况冷却方式下  $\gamma$  取值情况。

当水电站变压器内部绝缘子出现缺陷后, 并且  $b \leq R < a$  时, 此时  $R$  较大。分布电压需要通过杂散电压值来决定, 分布电压不变, 电阻减小, 其发热功率逐渐增加, 说明  $b \leq R < a$  范围内水电站变压器内部绝缘子温升会随阻值的减小增加。

当绝缘子的电阻值在  $c < R < b$  之间时,  $R$  较小, 分布电压受  $R$  的影响, 该情况下缺陷绝缘子电压下降, 良好绝缘子电压呈上升趋势。电阻减小缺陷绝缘子温升随之降低, 直到  $R = c$ , 缺陷绝缘子与良好绝缘子温升接近, 其温度近似相等时, 无法使用带电测试技术检测水电站变压器内部绝缘子的缺陷<sup>[17-20]</sup>。

当绝缘子的电阻值  $R < c$  时, 绝缘电阻决定了分布电压, 此时温度较低、分布电压也很小, 当绝缘子的电阻值  $R = 0$  时, 水电站变压器内部的绝缘子短路, 此时绝缘子的温升、发热功率以及电压均为零。 $c < R < a$  范围内的绝缘子为低值绝缘子,  $0 < R < c$  范围内的绝缘值为零值绝缘子, 其阻值分别约为 10~300 M $\Omega$  和 0~5 M $\Omega$ 。

综上所述, 由以上分析可以得出结论: 利用带电测试技术对绝缘子缺陷发热现象进行测试, 且通过得到水电站变压器内部绝缘子缺陷发热与温升关系, 利用绝缘子的温度与阻值可以对其实现缺陷检测。

### 3 绝缘子缺陷检测试验与分析

水电站变压器内部绝缘子缺陷检测在高压实验大厅内进行, 试验条件: 220 kV 电压等级绝缘子串, 18~25 片伞裙, 在单相导线上悬挂, 加载电压为 125 kV, 温度为 4~6  $^{\circ}\text{C}$ , 湿度为 37%。绝缘子带电检测装置主要包括探头、连接柄以及托架, 由图 8 显示可以看出, 连接柄以及探头均安装在托架上, 探头与连接柄相邻, 探头体积较小, 外部安装有金属表面, 将探头放置在附件上, 与托架相连, 具体实物图如图 8 所示。

绝缘子带电检测装置主要包括探头、连接柄以及托架三个部分, 通过检测单元、信号传输单元以及缺陷分析单元几部分构成。

采用单相 GIS 模型, 其结构剖视图如图 9 所示, 选择其中一个腔体进行试验。真空泵选用德国

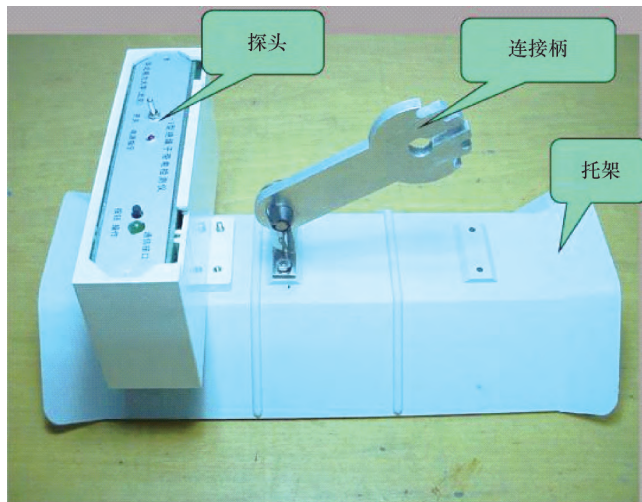


图 8 TN-DL-1 型绝缘子带电检测装置

BUSCH R5 系列真空泵, 真空计选用数字皮拉尼真空计。

通过红外热像仪, 检测在绝缘子故障状态下, 绝缘子表面的辐射红外信号变化, 红外热状态信息如图 10 所示。

由绝缘烧损故障图可以看出, 绝缘子故障处会产生局部过热, 以及温度明显升高的状况。

#### 3.1 试验一

试验一主要检测水电站变压器内部绝缘子在测量距离不同情况的电场强度。

试品要求: 无缺陷电压, 120 kV, 测量距离分别为 20 cm、30 cm 和 40 cm。

电场分布测量绝缘子的数据如表 2 所列, 变化如图 11 所示。

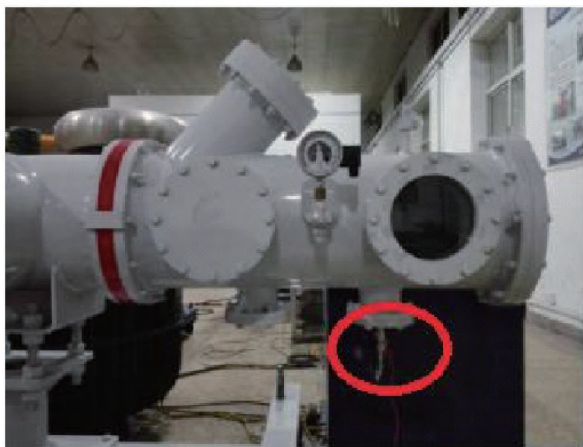
表 2 降压运行水电站变压器内部绝缘子电场分布数据

低压端	电场强度/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$		
	测量距离 20 cm	测量距离 30 cm	测量距离 40 cm
1	190	95	70
2	140	116	84
3	100	117	90
4	82	116	94
5	71	115	96
6	63	116	94
7	61	119	105
8	61	124	111
9	65	133	119
10	72	144	130

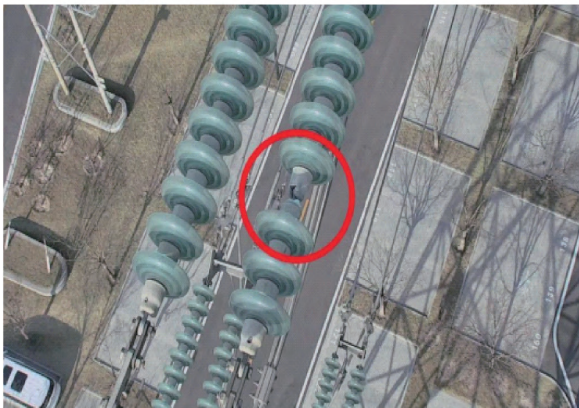
分析图 11 可知, 测量距离 20 cm 时得到的分布曲线接近 U 型分布, 并且较为光滑。测量距离越远, 电场分布受绝缘子的影响越小, 有单调上升的规律。



(a) 实体模型



(b) UHF天线安装位置



(c) 试品工作情景平面设计

图9 试验装置实物

绝缘子内部出现缺陷的原因有很多方面,包括绝缘子制作、输送、组装以及运行过程,出现缺陷过大,会出现电气设备故障,有必要对绝缘子的电场强度加以分析,结合裂缝的不同宽度以及长度进行分析。在绝缘子内部设置长度为 120 mm、宽度为 2 mm 的裂缝,绝缘子轴截面的电压、电场强度变化情况如图 12 所示。

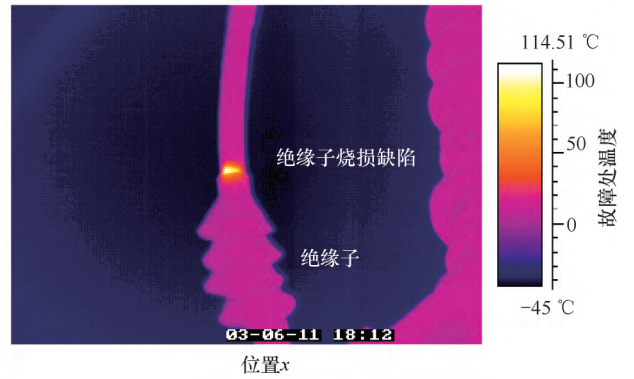


图 10 某水电站变压器绝缘烧损缺陷故障

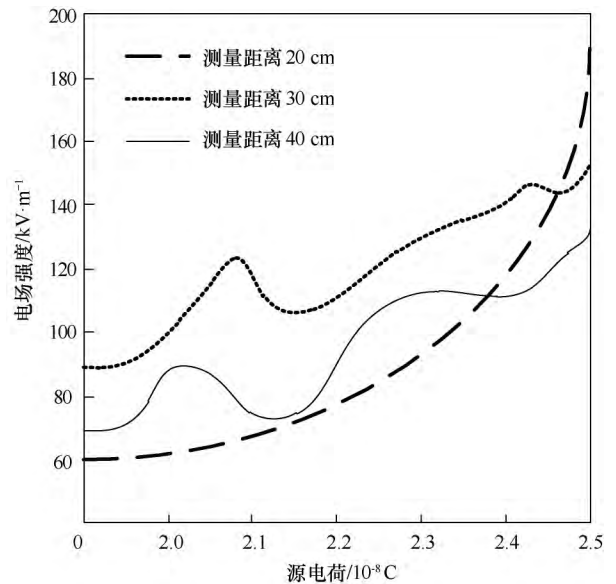


图 11 绝缘子不同测量距离电场分布情况

由图 12 可以看出,若裂缝出现缺陷,则绝缘子的电场强度会产生较大的异常反应,在裂缝以及裂缝周围,变化的最为明显,不包括裂缝两端,对电场强度进行分析发现,靠近高压导体处的电场强度更大,且随着与高压导体之间距离的增大,电场强度逐渐减小。

由图 13 可以看出,保证裂缝宽度为 2 mm,在高压导体端,裂缝的位置以及方向均保持不变,在此前提下,对裂缝长度加以变化,并观察不同裂缝长度下电场强度的变化曲线。可以发现,在长度发生变化的情况下,裂缝两端出现的电场强度波动较为明显,对于其他的裂缝部位的影响并不大,因而可以得出如下结论,电场强度的异常变化与裂缝长度的变化关联不大,不同长度的裂缝两端及其附近的电场畸变较明显。

由图 14 可以看出,在矩形裂缝所处位置不变的情况下,只对裂缝宽度做出改变,电场强度会随着

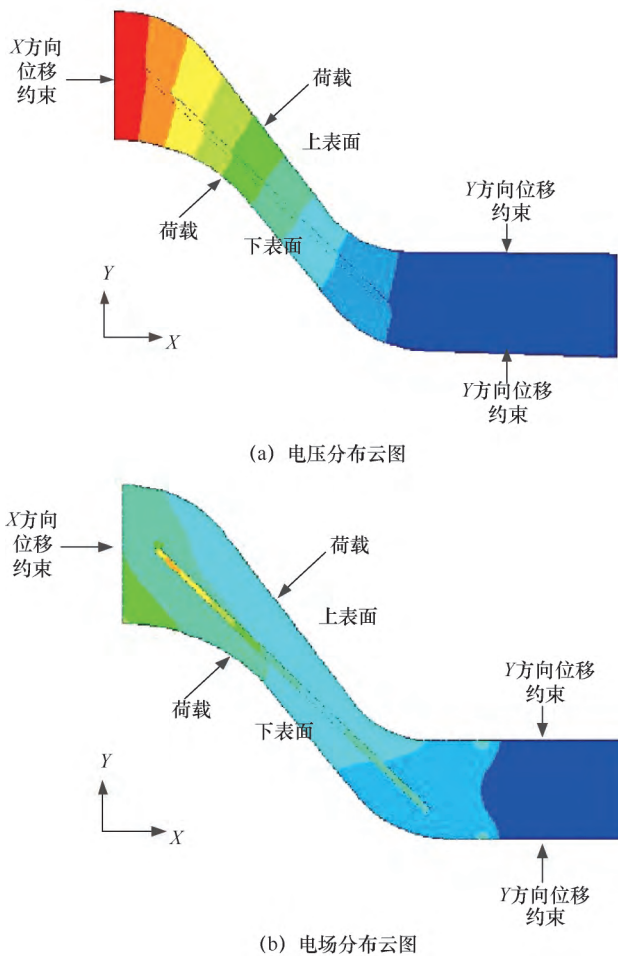


图 12 裂缝缺陷下绝缘子仿真结果云图

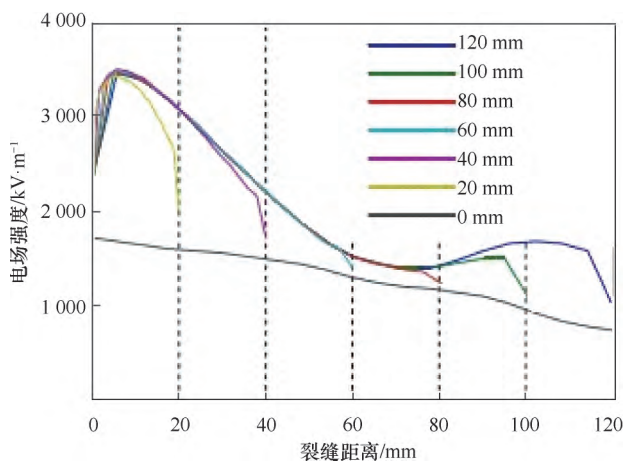


图 13 不同长度裂缝下电场强度变化

裂缝距离出现一定的波动情况。由电场强度的变化曲线可以看出, 绝缘子电场强度在裂缝处的数值出现较为显著的波动, 在裂缝的两端, 电场强度波动变化最为明显, 在裂缝距离接近于 0 时, 电场强度出现最大峰值。

若出现内部气隙缺陷状况, 电场强度的异常变

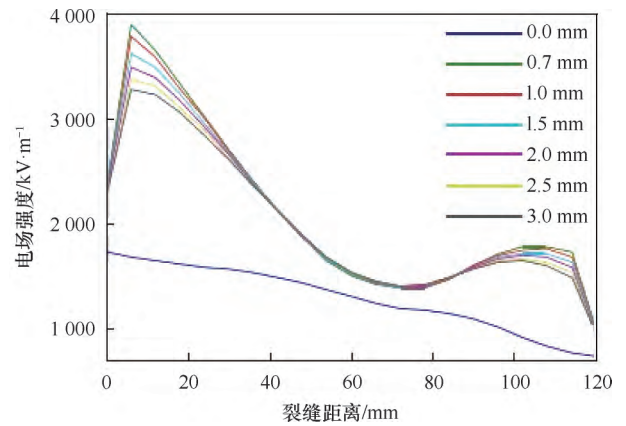


图 14 不同宽度裂缝下电场强度对比

化范围主要在缺陷以及缺陷周围处, 因此, 可以通过检测缺陷周围处的电场异常变化的分析, 可以发现, 在研究的范围内, 气隙缺陷的大小对于电场强度产生异常的决定作用并不大, 决定性因素主要是缺陷所处的位置以及缺陷本身的大小, 绝缘子电场强度较大的位置出现气隙缺陷时, 电场会产生空气电离的情况。

水电站内运行的绝缘子由于长期处于电场、机械应力、环境等多重因素的影响, 导致绝缘子的绝缘性能和机械性能产生很大幅度的下降, 极易变为零值或低值绝缘子, 即劣化绝缘子。利用 matlab 编程实现了绝缘子串中心线温度的提取, 以实现检测劣化绝缘子的目标。利用描点法绘制出绝缘子串的投影图并在纵坐标上显示出温度轮廓, 如图 15 所示。图中右侧为接地端,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别表示电场强度、电压、温升, 由图 15 可以看出, 串顶部靠近接地端的第二片温升较高, 可以判定为劣化绝缘子。

### 3.2 试验二

试验二分析水电站变压器内部绝缘子的导通性缺陷影响。

(1) 试品要求: 导通性缺陷, 采用锡箔纸将六片伞裙的芯棒包住。测试数据如表 3 所列。

表 3 绝缘子六片伞裙电场强度检测

低压端	电场强度/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
1	430
2	300
3	203
4	123
5	81
6	62
7	68
8	77
9	69
10	79

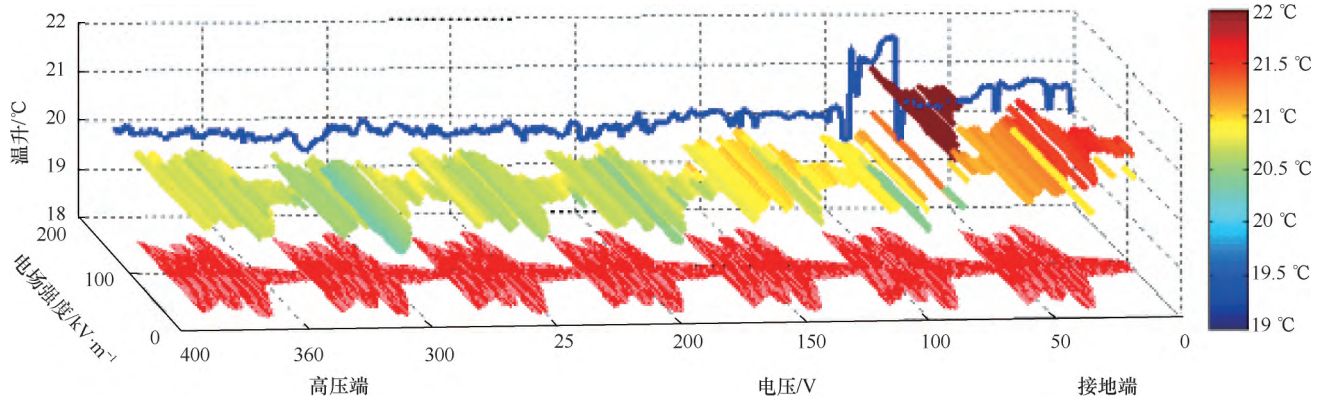


图 15 绝缘子串中心线温度

(2) 试品要求: 导通性缺陷, 采用锡箔纸将十九片伞裙的芯棒包住。测试数据如表 4 所列。

表 4 绝缘子十九片伞裙电场强度检测

低压端	电场强度/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
1	280
2	194
3	157
4	116
5	95
6	75
7	67
8	62
9	42
10	35

通过上述试验可知: 采用锡箔纸制造的水电站变压器内部绝缘子导通性缺陷影响了其表面的电场分布情况, 绝缘子的缺陷位置对应了电场局部凹陷情况。采用锡箔纸将六片伞裙的芯棒包住时绝缘子的电场强度在  $62 \sim 430 \text{ kV/m}$  之间, 采用锡箔纸将十九片伞裙的芯棒包住时绝缘子电场强度在  $35 \sim 280 \text{ kV/m}$  之间, 包住绝缘子伞裙芯棒片数越多, 其电场强度越弱。说明水电站变压器内绝缘子存在伞裙侵蚀、粗糙、开裂等缺陷。

根据上述试验分析结果, 进一步测试理论结果与实际结果的拟合度情况, 测试结果如图 16 所示。

分析图 16 可知, 6 次测试中, 得到理论结果与实际结果拟合度在  $90\% \sim 100\%$  之间, 理论结果与实际结果的拟合度较高, 说明带电测试技术在水电站变压器内部绝缘子缺陷检测中具有重要作用。

根据带电检测情况, 结合绝缘子缺陷检测试验结果, 可以确认水电站变压器内部绝缘子缺陷的原因为导通性缺陷。说明绝缘伞裙有侵蚀、粗糙、开裂, 内部缺陷有材质不过关, 并且水电站变压器绝缘介质的极化效应会引起绝缘子介质损耗发热, 导

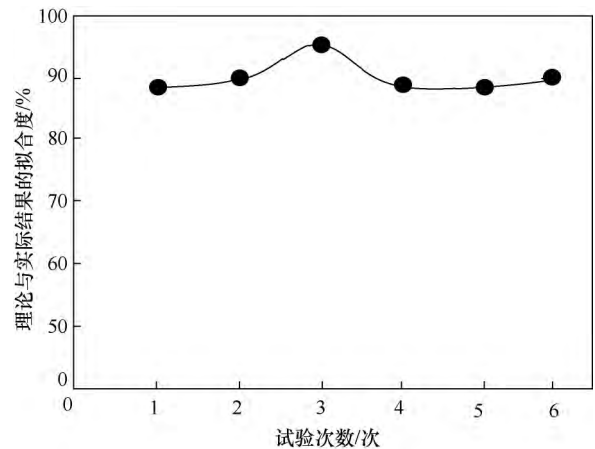


图 16 研究方法的理论结果与实际结果的拟合度结果

致温升出现异常。

## 4 结 论

绝缘子结构长时间暴露在室外环境下, 受到自然恶劣环境的影响, 雨水、雾气等, 在绝缘子表面留下水渍以及污垢等, 在得不到及时清理的情况下, 绝缘子电阻将会受到影响, 会出现电阻减小的状况, 导致污闪状况的出现, 从而影响绝缘子自身的绝缘质量, 严重者会对电力系统的安全性能造成影响。本文通过探讨绝缘子发热与温升的关系, 结合环境温度与运行负载参量的顶层温度, 计算变压器热点温度, 通过得到水电站变压器内部绝缘子缺陷发热与温升关系可知, 利用绝缘子的温度与阻值可以实现对其缺陷检测。

(1) 水电站变压器内部绝缘子受天气的影响, 经过暴晒和暴雨过后, 会出现泄漏电流的现象, 引起绝缘阻发热, 为水电站变压器内部绝缘子缺陷检测提供了依据。

(2) 水电站变压器内部绝缘子缺陷是通过带电测试技术发现的, 通过带电测试验证绝缘子缺陷存在,

并且对造成缺陷的原因进行分析,原因为导通性缺陷,绝缘伞裙有侵蚀、粗糙、开裂。

(3) 带电测试技术能准确检测出绝缘子缺陷,且操作简单。

(4) 绝缘子缺陷会威胁到水电站变压器的安全,应该进一步加强绝缘子的设备和生产,提高绝缘子的质量。

由于人工规划特征具有一定的局限性,后续研究方向应该在依据绝缘子特征进行故障检测方面,通过精准匹配绝缘子特征进行检测。可以通过缺陷模型的优化设计,对绝缘子内部应力以及电场的异常变化进行及时检测,发现变化规律。相对于实际的绝缘子来说,构造的模型在材料以及结构上均会出现一定的不同,这会导致在实验结果上出现偏差,因此,需要对缺陷检测模型加以优化,从而精准发现绝缘子内部电场异常变化规律。

参考文献:

[1] 邓红雷,陈力,鲁强,等. 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.

[2] 许焕清,马君鹏,王成亮,等. GIS设备典型缺陷的X射线数字成像检测技术[J]. 电网技术,2017,41(5): 1697-1702.

[3] 王文山,邹竟成,田源,等. 变压器绕组缺陷诊断系统仿真与实例验证[J]. 智慧电力,2017(12): 90-96.

[4] 金天一,魏本刚,任晓明. 基于混合放电模型的变压器内部放电联合检测方法研究[J]. 电测与仪表,2018,55(18): 102-108.

[5] 王建,朱文兵,辜超,等. 基于健康指数的电力变压器状态评估[J]. 高压电器,2018(5): 248-253.

[6] 唐念,乔胜亚,李丽,等. HF和H<sub>2</sub>S作为气体绝缘组合电器绝缘缺陷诊断特征气体的有效性[J]. 电工技术学报,2017,32(19): 202-211.

[7] 胡雨濛,吴功平. 高压输电线路绝缘子清扫与检测机器人的研究[J]. 机床与液压,2017,45(5): 1-4.

[8] 胡淋波,李唐兵,姚建刚,等. 一起劣化悬式瓷质高压绝缘子红外检测案例分析[J]. 红外技术,2016,38(7): 622-626.

[9] 陈庆,闫斌,叶润,等. 航拍绝缘子卷积神经网络检测及自爆识别研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(6): 942-953.

[10] 赵振兵,徐磊,戚银城,等. 基于Hough检测和C-V模型的航拍绝缘子自动协同分割方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(2): 395-403.

[11] 徐俊良,曹建,杨凯斌. 基于局部均值的绝缘子图像分割算法设计[J]. 计算机工程,2016,42(9): 262-267.

[12] 房俊龙,王金霞,杨柳,等. 基于红外热像的瓷绝缘子污秽等级检测方法[J]. 农业工程学报,2016,32(15): 175-181.

[13] 王永强,胡芳芳,谢军,等. GIS盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J]. 绝缘材料,2016,49(1): 40-45.

[14] 郭翠娟,杨明珠,荣锋,等. 基于振动响应分析的盆式绝缘子损伤检测系统[J]. 传感技术学报,2016,29(10): 1606-1612.

[15] 刘社民,叶强,黄桥林,等. 弧形核磁共振传感器设计及其在复合绝缘子老化状态检测中的应用[J]. 波谱学杂志,2017,34(2): 223-230.

[16] TAN P, LI X F, XU J M, et al. Catenary insulator defect detection based on contour features and gray similarity matching[J]. Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering, 2020, 21(1): 64-73.

[17] KRUMMENACHER G, ONG C S, KOLLER S, et al. Wheel defect detection with machine learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 4(19): 1176-1187.

[18] WU Y, GUO D, LIU H, et al. An end-to-end learning method for industrial defect detection[J]. Assembly Automation, 2019, 40(1): 31-39.

[19] JING J F, MA H, ZHANG H H. Automatic fabric defect detection using a deep convolutional neural network[J]. Coloration Technology, 2019, 135(3): 213-223.

[20] YANG S J, LI X, JIA X D, et al. Deep learning-based intelligent defect detection of cutting wheels with industrial images in manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 48: 902-907.

(责任编辑 王海锋)