

基于局部放电测试技术的避雷器 状态诊断方法研究

江 熠, 金坤鹏, 钱锡颖, 任一舟
(宁波送变电建设有限公司, 浙江 宁波 315032)

摘要: 避雷器经过长时间使用或受到外界环境的影响, 可能会出现老化、损坏或失效的情况, 影响避雷器状态诊断准确性, 为保证避雷器状态的带电诊断性能, 提出基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法; 模拟内部气隙、尖刺、沿面等局部放电现象的产生过程, 确定不同局部放电状态下避雷器的运行特征, 以此作为避雷器状态诊断标准; 优化设计避雷器局部放电信号采集设备, 利用该设备采集避雷器的实时状态信号, 从统计和时频域两个方面, 提取避雷器运行状态特征; 利用局部放电测试技术, 计算避雷器放电参数, 通过特征匹配度和放电参数的比对, 得出避雷器状态的诊断结果; 实验结果表明, 在 200 kV 和 500 kV 避雷器中, 所提方法平均局部放电量诊断误差分别为 0.5 pc 和 1.0 pc, 局部放电相位幅值诊断误差 0.01 V 和 0.01 V, 状态诊断准确率平均值为 99.5% 和 99.6%。

关键词: 局部放电测试技术; 避雷器; 状态诊断; 特征匹配度; 放电参数

Research on Condition Diagnosis Method of Arrester Based on Partial Discharge Testing Technology

JIANG Yi, JIN Kunpeng, QIAN Xiying, REN Yizhou

(Ningbo transmission and transformation Construction Co., Ltd., Ningbo 315032, China)

Abstract: Due to longtime use or external environmental influences, there are the phenomena of aging, damage, or failure in lightning arresters, which affects the accuracy of lightning arrester status diagnosis. To ensure the live diagnosis performance of lightning arrester status, a lightning arrester status diagnosis method based on partial discharge testing technology is proposed. Simulate the generation process of internal air gap, spike, surface and other partial discharge phenomena, determine the operation characteristics of the arrester under different partial discharge conditions, which is taken as the diagnosis standard of the arrester status. Optimize the design of partial discharge signal acquisition equipment for lightning arresters, use this equipment to collect real-time status signals of lightning arresters, and extract operational status characteristics of lightning arresters from both statistical and time-frequency domain aspects. The partial discharge testing technology is used to calculate the discharge parameters of the lightning arrester, and obtain the diagnostic results of the lightning arrester status through the comparison of feature matching and discharge parameters. The experimental results show that in 200 kV and 500 kV lightning arresters, the average diagnostic errors of the proposed method for partial discharge quantity are 0.5pc and 1.0pc, respectively, the diagnostic errors for partial discharge phase amplitude are 0.01V and 0.01 V, and the average accuracy of state diagnosis is 99.5% and 99.6%.

Keywords: partial discharge testing technology; lightning arrester; status diagnosis; feature matching degree; discharge parameters

0 引言

避雷器是电力系统中重要的保护设备, 用于防止因雷电或过电压引起的设备故障和损坏。它有一定的续流时间, 通常也有一定的续流幅度。当电力系统正常运行时, 避雷器为高阻态, 只能流过微安级别的电流。在过电压和大电流的情况下, 其电阻会变得很低, 因此, 避雷器两端的残余电压就会受到限制。在电力系统中, 由于变电站大部分都分布在野外, 电气设备经常暴露在自然条件下, 极易被

雷电击中而受损, 给电网带来巨大的经济损失, 严重时还会引发灾难性事故。为此在电力系统中安装避雷器装置, 用来保护电网中的电气设备, 间接地确保电网的安全运行, 可以说避雷器的运行状态直接决定了电力系统的安全状态。

由于内部受潮、绝缘老化、环境污秽、人为破坏等原因, 导致避雷器运行故障, 电力系统应用存在故障的避雷器, 轻则造成对地泄漏电流增大, 增加了不必要的电力损耗, 重则直接导致短路, 引发非计划停电, 甚至导致避雷器爆炸, 造成巨大的经济损失。为保证避雷器的运行安全,

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-08-21。

作者简介: 江 熠(1985-), 男, 大学本科, 中级工程师。

通讯作者: 钱锡颖(1973-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 江 熠, 金坤鹏, 钱锡颖, 等. 基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 36-43.

间接地提高电力系统的安全性, 相关领域学者纷纷提出避雷器状态诊断方法。文献 [1] 提出基于贝叶斯网络的避雷器诊断方法, 通过主成分分析法提取对避雷器工作性能有重要影响的特征参数, 构建基于双层信息结构的故障诊断模型, 并结合实际数据, 对各类型故障进行分类概率估计, 最终实现对当前故障的诊断。文献 [2] 提出基于场路耦合的避雷器诊断方法, 以 500 kV 氧化锌避雷器为研究对象, 建立其阻容网络和有限元温场的数学模型, 分析其在不同工况下的漏电和温度场, 获得其故障特性和变化规律, 并根据故障特性与故障特性的匹配, 对其故障特性做出判别。文献 [3] 提出基于均值漂移聚类的异常诊断方法, 通过对局部放电探测数据进行离散性、平均距离百分数、集中度、最大波动性等指标的分析, 建立多维度特征数据库; 该方法采用平均漂移聚类算法, 自动寻找偏差值, 将其分为多个类别, 然后根据所给类别标记的隶属函数, 判断其是否为异常, 从而实现了多个类别中的开关拒绝缘状况的异常检测。然而由于避雷器的故障大多具有隐蔽性特征, 给设备状态的诊断工作带来较大难度, 为此引入局部放电测试技术。

在电力装备的绝缘体系中, 不同位置上的场强通常不均匀, 如果某一位置上的场强超过其击穿范围, 则会产生一次放电, 而这次放电并没有通过两根导线, 也就是说, 整个体系还没有被击穿, 这一现象称为局部放电。一般来说, 避雷器的故障状态与局部放电现象同时存在, 因此可以根据避雷器是否存在局部放电现象来判断元件设备的运行状态。本文利用局部放电测试技术对避雷器状态诊断方法进行优化设计, 设计了模拟局部放电现象、优化采集设备、特征提取与参数计算以及状态诊断结果等关键步骤, 具体如下。

1) 模拟局部放电现象: 描述了模拟内部气隙、尖刺、沿面等局部放电现象的产生过程, 并强调确定不同局部放电状态下避雷器的运行特征作为避雷器状态诊断标准的重要性。

2) 设计优化采集设备: 介绍了优化设计避雷器局部放电信号采集设备的目的和意义, 以提高避雷器实时状态信号的采集效果。

3) 特征提取与参数计算: 从统计和时频域两个方面, 说明了利用采集设备提取避雷器运行状态特征的方法。同时, 介绍了通过局部放电测试技术进行避雷器放电参数计算的原理。

4) 状态诊断结果: 说明了通过特征匹配度和放电参数的比对, 可以得出避雷器状态的诊断结果, 从而对避雷器的状态进行准确判断。

1 避雷器状态诊断方法

1.1 诊断方法总体框架

由于电气设备的电机系统不确定, 导致绝缘体各区域承受的电场不均匀, 这也是避雷器发生局部放电现象的原

因。当避雷器产生局部放电现象时, 导致避雷器两端的残余电压增大, 降低电力设备的避雷效果, 甚至影响避雷器工作电力系统的运行状态。根据避雷器的局部放电状态以及局部放电量, 判断当前避雷器的运行状态, 并判断当前避雷器是否存在异常故障。基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法总体框架如图 1 所示。

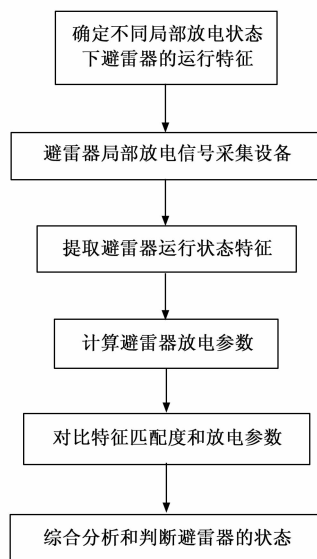


图 1 诊断方法总体框架

如图 1 所示, 基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法主要分为以下几个步骤:

1) 确定不同局部放电状态下避雷器的运行特征: 通过搭建合适的实验设备和环境模拟内部气隙、尖刺、沿面等局部放电现象的产生过程。针对不同局部放电状态下的避雷器, 观察和记录避雷器的运行特征, 如放电声音、电流等信号变化。通过分析和比对不同状态下的特征, 建立局部放电与避雷器状态的关联。

2) 优化设计局部放电信号采集设备: 根据实验需求和信号特征, 设计和改进局部放电信号采集设备, 以确保能够准确地采集避雷器的实时状态信号。可能需要选择合适的传感器、放大器、滤波器等设备, 以获取清晰且稳定的局部放电信号。

3) 提取避雷器运行状态特征: 利用采集到的实时信号, 以统计学和时频域两个方面, 提取避雷器运行状态特征。统计学特征包括局部放电数量、强度、频率、时长等, 用于量化和描述避雷器的状态。时频域特征则表示通过对信号进行时域和频域分析, 如峰值时间、频谱分布等, 来获取更详细的状态特征。

4) 计算避雷器放电参数: 通过局部放电测试技术, 对采集到的信号进行进一步处理和分析, 计算避雷器的放电参数, 如放电能量、幅值等。这些参数可以作为诊断避雷器状态的重要指标之一。

5) 特征匹配度和放电参数的比对: 将实时采集的避雷

器状态特征与预先确定的状态诊断标准进行比对, 通常使用特征匹配度或相似度算法, 如相关性、余弦相似度等。同时, 与计算得出的放电参数进行对比, 综合分析和判断避雷器的状态。

1.2 避雷器状态诊断标准设置

在正常工作状态下, 由于在避雷器的内部构造中采用了并联的均压电容, 在外面安装了一个均压环, 从而提高了各阀板的电势。避雷器内部不同位置的阀片电压的偏差应控制在 10% 之内。随着时间的推移, 高电势的阀片会发生劣化, 破坏原有的均衡, 从而导致有功损耗增大、温升上升、避雷器老化加剧等一系列问题, 最终导致避雷器的故障。在局部放电的初始阶段, 绝缘材料的特性并未彻底消失, 但随着绝缘状况的恶化和放电频率的增加, 将导致局部区域的击穿或绝缘特性彻底消失。优化设计方法通过模拟避雷器的故障与局部放电过程, 提取故障状态下避雷器的运行数据特征, 并以此作为避雷器状态的诊断标准。避雷器中产生的局部放电原理可以用 3 个电容的串并联模型来解释, 避雷器的局部放电类型包括内部气隙局部放电、尖刺局部放电、沿面局部放电、悬浮局部放电等类型, 以绝缘内部气隙放电等效电路为例, 如图 2 所示。

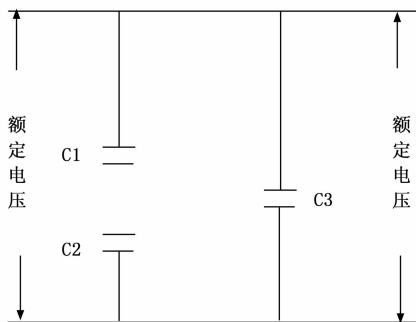


图 2 避雷器局部放电等效电路图

图 2 中变量 C_1 、 C_2 和 C_3 分别表示的是与气泡串联的绝缘体电容、因气泡产生局部放电部分绝缘体电容和正常绝缘体电容, 在局部放电状态下避雷器的等值介质电容 C_E 和气隙上电压 U_a 为:

$$\begin{cases} C_E = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \\ U_a = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} U_m \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_m 表示输入到避雷器两端的交流电压, ω 和 t 分别为避雷器运行角频率和时间。当避雷器电极间施加的交流电压上升到气泡放电临界值 U_0 时, 即满足放电电压要求后, 气泡 C_2 开始放电, 使得该气泡电压迅速减小, 当减小至熄灭电压时, 放电终止^[4]。熄灭电压 U_E 的计算公式如下:

$$U_E = \frac{U_i}{U_a} \cdot \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \cdot C_E \quad (2)$$

式中, U_i 为外界电压的瞬时值。对已停止放电的绝缘子再施加一次外电压, 使其两端的电压随外电压升高而升高, 达

到一定的放电电压后, 再进行, 直至其降到熄灭电压以下为止^[5]。所以, 放电脉冲持续时间为气泡上的电压在临界电压和熄灭电压之间变动的的时间, 通过外电压升降产生的脉冲电流反映避雷器的内部气隙局部放电现象。同理可以得出尖刺、沿面等其他局部放电类型的产生机理, 根据不同局部放电现象的运行原理, 设置避雷器不同状态下的标准特征, 内部气隙、尖刺、沿面、悬浮局部放电状态下的标准特征的具体设置结果如下:

$$\begin{cases} \tau_a = A_1 e^{-t-t_0/U_E} \\ \tau_s = A_2 (e^{-1.3(t-t_0)/U_E} - e^{-2.2(t-t_0)/U_E}) \\ \tau_C = A_3 e^{-t-t_0/U_E} \sin(2\pi f_c t) \\ \tau_d = A_4 (e^{-1.3(t-t_0)/U_E} - e^{-2.2(t-t_0)/U_E}) \sin(2\pi f_c (t-t_0)) \end{cases} \quad (3)$$

式中, τ_a 、 τ_s 、 τ_C 、 τ_d 分别为内部气隙、尖刺、沿面、悬浮局部放电状态下的标准特征, e 为放电负荷量, t_0 和 t 分别表示避雷器的初始运行时间和测试时间, A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 对应的是 4 种故障状态下局部放电信号的波动幅值, f_c 为放电信号的波动频率^[6]。上述 4 种状态下, 避雷器运行信号的标准特征如图 3 所示。

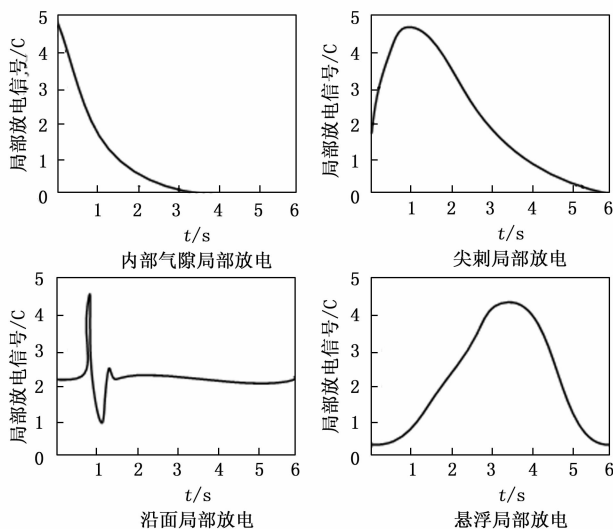


图 3 避雷器局部放电信号波动标准特征示意图

图 3 表示特征即为避雷器实时状态的诊断标准。

1.3 避雷器局部放电信号采集设备内部结构设计

为满足局部放电测量技术对硬件设备的要求, 装设局部放电信号采集设备, 采集设备的内部结构设计情况如图 4 所示。

采用高精度的有源零磁通电流测量仪采集了避雷器漏电信息, 并对漏电信息进行了处理, 得到漏电信息并经程序控制放大。将该信号分为两个部分, 一部分输入到 A/D 变换器, 一部分输出到频率变换器, 另一部分经过信号调节后输出到频率方波变换器^[7]。此外, 还采用了一种防雷传感器, 来监控防雷装置的漏电流, 从而获得防雷装置的防雷效果。采用有源零磁通电流测试仪与闪电测试仪相结合的方式, 形成了一种双“AT”型的数据采集方式。将

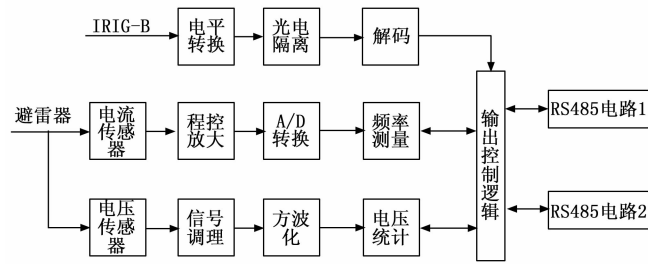


图 4 避雷器局部放电信号采集设备内部结构图

IRIG-B 码用作授时时钟, 可以实现 100 ns 的异地同步采样, 这种方法具有非常高的对时精度和处理速度, 可以保证采集结果的准确性和可靠性。为提高避雷器局部放电信号的采集质量, 需要对设备进行内部抗干扰处理。设备内干扰的频段以 2 MHz 为主, 对于主要分布在 2~10 MHz 频段的低频干扰可以利用带通滤波器加以去除^[8]。对于一些诸如空间脉冲干扰等干扰, 由于其存在着通过外壳、天线、地线等的耦合效应, 导致其频谱范围较广, 因此可以考虑拓宽其探测带宽, 在超高频段对其进行探测, 以避免干扰。

1.4 避雷器实时状态信号采集

利用设计的避雷器局部放电信号采集设备, 采集避雷器的实时运行状态信号, 根据避雷器的工作原理和内部结构, 确定避雷器实时状态信号的采集位置。从组成结构方面来看, 避雷器的内部使用玻璃纤维布带缠绕、环氧树脂固化来实现芯体的紧固, 取代了瓷外壳氧化锌避雷器芯体所用的绝缘杆和金属夹板, 用环氧绝缘筒和合成橡胶制作的绝缘外套来取代瓷外壳, 在避雷器组装后, 在其腔内填满双组份室温硫化填充胶^[9]。将优化设计的信号采集设备安装在阀片以及金属调整块位置上, 采集电压、电流等状态信号。避雷器电压和电流信号的采集结果为:

$$\begin{cases} I(t) = \sqrt{\frac{P(t)}{R_l}} \\ U(t) = I(t) \cdot R_l \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P(t)$ 为 t 时刻避雷器的功率值, R_l 为避雷器内部总电阻值, $I(t)$ 和 $U(t)$ 对应的是 t 时刻避雷器电流和电压信号的采集结果。在避雷器信号采集过程中, 避雷器设备周围存在大量干扰, 具体包括窄带周期性干扰、白噪声干扰、脉冲干扰等^[10]。考虑的噪声干扰只有窄带周期性干扰 n_n 和白噪声 n_w , 其量化表达式如下:

$$\begin{cases} n_n = A_n \sum_{f=1}^{n_n} \sin 2\pi f_n t \\ n_w = A_w \times y_r(U(t) \otimes I(t)) \end{cases} \quad (5)$$

式中, n_n 为避雷器状态信号采集量, f_n 为窄带周期性干扰频率, $y_r(\cdot)$ 为取整函数, A_n 和 A_w 分别对应的是两种干扰噪声信号的幅值^[11]。为保证初始采集避雷器状态信号质量, 需对初始采集信号进行过滤处理, 处理过程可以描述为:

$$U_f(t) = \frac{\exp\left\{-\frac{U(t)^2 + (n_n + n_w)^2}{2\sigma^2}\right\}}{2\pi\sigma^2} \quad (6)$$

式中, 变量 σ 表示高斯核, 将公式 (4) 和公式 (5) 的求解结果代入到公式 (6) 中, 即可得出满足质量要求的电压信号采集结果, 同理可以得出避雷器电流以及其他状态信号的采集结果^[12]。

1.5 避雷器运行状态特征提取

以采集的避雷器实时状态信号为处理对象, 从统计特征、时频域特征两个方面, 提取避雷器的运行状态特征。统计特征主要是利用二维谱图中的统计特性来刻画二维谱图中的几何形态变化, 并利用互相关系数和修正的互相关系数来描述二维谱图的轮廓差异^[13]。统计特征中偏斜度特征向量 τ_α 和陡峭度特征向量 τ_β 分别描述了频谱图状相对于高斯曲线的形态所引起的偏差和凸出的程度。上述特征向量的提取结果为:

$$\begin{cases} \tau_\alpha = \sum_{i=1}^{n_p} (U_i - v_U)^3 \cdot \frac{p_i \Delta G}{\delta_U^3} \\ \tau_\beta = \sum_{i=1}^{n_p} (U_i - v_U)^4 \cdot \frac{p_i \Delta G}{\delta_U^4} - 3 \end{cases} \quad (7)$$

式中, 变量 n_p 为工频半周谱图内的相窗个数, p_i 表示的是谱图中第 i 个相窗内的纵坐标概率, ΔG 对应的是相窗宽度, v_U 和 δ_U 分别为避雷器电压信号的均值和标准差。同理将公式 (7) 中的电压信号转换成电流信号, 即可得出避雷器电流统计特征向量的提取结果^[14]。按照上述方式可以得出统计特征中互相关系数和修正的互相关系数向量的提取结果。对采集到的局部放电时域和频域波形信号进行分析, 时域波形特征主要包括: 瞬时频率、时域脉冲的上升时间、下降时间、50%幅值持续时间、10%幅值持续时间、脉冲总持续时长、脉冲最大幅值、等效时长、二次等效时宽等, 而频域脉冲特征参数主要包括频域波形的等效频宽、二次等效频宽等, 从时域和频域两个方面对采集到的局部放电信号展开分析, 时域波形特征具体包含了以下内容: 瞬时频率、时域脉冲的上升时间、下降时间、50%幅值持续时间、10%幅值持续时间、脉冲总持续时长、脉冲最大幅值、等效时长、二次等效时宽等, 而频域脉冲特征参数主要包含了频域波形的等效频宽、二次等效频宽等^[15]。时域特征方面, 避雷器局部放电信号的瞬时频率特征提取结果为:

$$\tau_f = \frac{1}{2\pi} \frac{dU(t)}{dt} \quad (8)$$

公式 (8) 计算得出的特征提取结果为避雷器局部放电信号电压瞬时频率, 同理以采集运行信号为数据支持, 可以得出信号其他时域特征的提取结果。另外, 信号频域特征中等效频宽特征向量的提取过程如下:

$$\tau_E = \left[\frac{(\tau_f - f_d)^2 \cdot \beta^2(\tau_f)}{\beta^2(\tau_f)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中, β 为初始采集避雷器运行状态信号的傅里叶变换结果, f_d 表示频率期望值。按照上述方式可以得出避雷器运行状态特征分量的提取结果, 根据实时运行状态信号采集结果的动态变化特征, 实现实时状态特征提取结果的实时更新^[16]。最终对所有的特征分量进行融合处理, 融合过程可以描述为:

$$\tau_{con} = \omega_1 \tau_s + \omega_2 \tau_a + \omega_3 \tau_f + \omega_4 \tau_E + \dots \quad (10)$$

式中, ω_i 分别表示内部气隙、尖刺、沿面、悬浮局部放电状态特征分量的融合权重值, 这里选用特征选择方法对不重要或冗余的特征进行筛选, 再对所选特征分量赋予合适的权重。这种方法可以减少特征数量和维度, 提高融合的效果。由此得出避雷器运行状态综合特征的提取结果。

1.6 基于局部放电测试判定避雷器运行状态

利用局部放电测试技术计算避雷器在运行过程中产生的放电量, 综合放电量以及运行特征匹配度两个方面, 确定当前避雷器的运行状态。图 5 表示的是局部放电测试技术原理。

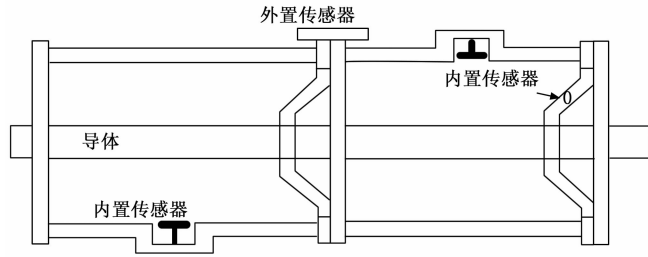


图 5 局部放电测试技术原理图

利用图 5 表示的局部放电测试原理, 得出避雷器局部放电量的测试结果:

$$Q = I \cdot t_l \quad (11)$$

式中, I 和 t_l 分别为测试得出避雷器局部放电电流和时间^[17]。综合考虑局部放电量 and 状态特征匹配度两个方面, 得出避雷器运行状态的判断结果。公式 (12) 为避雷器运行状态的判定条件:

$$\begin{cases} Q \geq Q_0 \\ \vartheta \geq \vartheta_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, ϑ 为避雷器运行状态相似度, Q_0 和 ϑ_0 对应的是避雷器局部放电量 and 特征匹配度的设置阈值, 变量 ϑ 的计算公式如下:

$$\vartheta = \frac{\tau_{con} \cdot \tau_{set}}{\|\tau_{con}\| \cdot \|\tau_{set}\|} \quad (13)$$

式中, τ_{set} 为设置的避雷器运行状态标准特征, 将公式 (10) 得出的融合特征提取结果代入到公式 (13) 中, 即可得出特征匹配度的计算结果, 最终将 ϑ 的具体取值代入到公式 (12) 中, 将实时运行数据、特征与公式 (12) 表示的判定条件进行比对, 若公式 (12) 表示条件成立, 则说明当前避雷器处于异常、故障状态, 否则证明当前避雷器运行正常。

1.7 避雷器状态诊断

避雷器状态的最终诊断结果以可视化的形式输出, 为了给避雷器的维修工作提供有效数据参考, 除状态诊断结果外, 还需要输出避雷器的局部放电表征参数以及局部放电点定位结果。局部放电的状态可以用多个表征参数来描述, 其中放电量、放电相位、放电重复频率、起始放电电压、放电熄灭电压等为局部放电表征参数, 通过局部放电

测试可以得出上述表征参数的计算结果^[18]。避雷器中局部放电定位结果为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_l \cdot t_p \pm x_m}{2} \\ \frac{v_l \cdot t_p \pm y_m}{2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中, v_l 和 t_p 为避雷器内部电流的传播速度和传播时间, (x_m, y_m) 为局部放电测试端的装设位置^[19]。综合上述参数计算结果, 最终以可视化的形式输出避雷器状态的最终诊断结果。

2 诊断性能测试实验分析

为了测试优化设计的基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法的诊断性能, 在不同的实验环境下, 对不同电压等级、不同运行状态的避雷器进行实验。在电力系统中, 避雷器是防止因雷击而引起的设备损坏和停电的重要设备。通过局部放电测试技术可以对避雷器的状态进行实时监测, 及判断避雷器是否需要维修或替换, 以确保电力系统的可靠稳定运行, 提高供电可靠性。在新能源领域中, 如风力发电场、太阳能电站等, 避雷器也是非常重要的设备。通过局部放电测试技术进行避雷器状态的实时监测和诊断, 可以预防因雷击等天气原因造成的设备损坏和停电, 提高新能源系统的稳定性和可靠性。

此次实验的具体内容包括: 获取避雷器的局部放电测试结果, 根据局部放电的测试结果确定当前避雷器的实时运行状态。为保证实验结果的可行性, 采用白盒测试的方式对测试实验进行设计, 即采用人为控制与调节的方式设置避雷器的实际运行状态, 以此作为避雷器状态的预期诊断结果, 通过输出结果与设置预期结果的对比, 体现出优化设计方法在诊断性能方面的优势。

2.1 避雷器样品选择

此次实验选择 Y10W2-200 和 Y10W2-500 两种型号的氧化锌避雷器作为诊断对象, 两种型号避雷器的内部结构与工作原理均相同, 额定电压分别为 200 kV 和 500 kV, 在标称放电电流下的最大残差均为 520 mA^[20]。选用的内部主要组件有: 绝缘底座, 端子排, ZnO 非线性电阻。在出厂前, 采用 HRMS 检漏仪对避雷器的主要零件进行了密封检验。该避雷器具有释放压力的功能。在出现异常状况下, 产品内部压力上升时, 能迅速释放内部压力, 防止陶瓷外壳爆裂, 并改善了泄放装置的密封性能。通过避雷器质量检测, 保证初始选择的避雷器样品无明显磨损与故障现象。为保证实验结果的可信度, 实验共设置 100 个避雷器样品, 电压等级为 200 kV 和 500 kV 的避雷器样品均有 50 个。

2.2 避雷器运行环境配置

选择电压值为 200 kV、500 kV 和 1 000 kV 的电力系统作为避雷器的运行环境。在避雷器运行环境中添加一个信号发生器, 保证电力系统输出两路幅值相位均可调的正弦波来模拟泄漏电流信号和母线电压信号, 由 W9006C 时钟系统输出 IRIG-B 码信号, 触发同步采样。根据避雷器

型号及其运行环境的配置结果, 将性能测试实验分为 3 个部分。

2.3 局部放电测试设备装设

为满足局部放电测试技术的运行要求, 将设计的局部放电测试设备与选择的避雷器样品相连。图 6 为局部放电测试设备的安装实景。

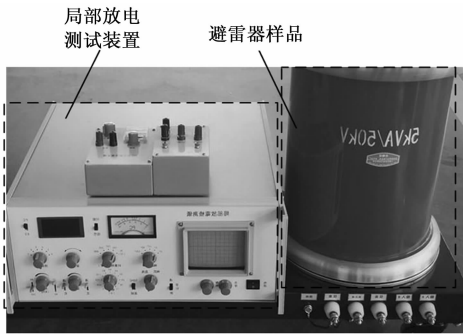


图 6 局部放电测试设备安装实景

装设的局部放电测试设备主要由主要包括升压段, 局部放电探测段, 避雷器局部放电模型, 示波器等部分组成。其中, 升压是通过 5 kVA/200 kV 升压交流发生器与柱式调压器来实现的, 局部放电测试设备内置 200 kV/100 pF 的分压电容和 TAWF400/100 的耦合电容, 以及 10 KΩ 的保护电阻和检测阻抗, 示波器型号为 Tektronix7000, 示波器采样率设置为 10 MS/s, 高频电流传感器型号为 HFCT-49。在试验中, 避雷器的核心部分为高电压的交流电源, 外部为铜外壳的接地装置。高压导线采用 10 毫米外直径的铝制导线, 且其表面不得有任何凸起或气泡。为避免避雷器产生的电晕效应, 对传感器的信号收集造成干扰, 需将直径 20 毫米的铝制导线封盖在电缆的两端。为保证传感器 HFCT 所获得的数据只是避雷器的部分放电, 而非试验线路的部分放电, 应在实验开始之前对设备内部电路进行放电预处理。

2.4 避雷器状态期望诊断值设定

为了给避雷器的状态诊断提供参考标准, 采用人为控制的方式对避雷器的状态及状态参数进行设定, 具体设定情况如表 1 所示。

表 1 避雷器状态预期诊断值设定数据表

避雷器样品类型	200 kV 避雷器	500 kV 避雷器
运行状态	内部气隙局部放电	尖刺局部放电
局部放电量	252 pc	269 c
局部放电相位幅值	0.55 V	0.62 V
局部放电重复次数	5	6
起始放电电压	212 V	525 V
放电熄灭电压	198 V	499 V
局部放电位置	绝缘底座	接线盖板

同理可以得出实验准备的所有避雷器样品的期望诊断值设置结果。

2.5 诊断性能测试实验过程

将运行状态设置完成的避雷器样品装设在电压等级相同的电力系统中, 并同时将电力系统和避雷器调整至运行状态。利用编程工具实现对优化设计基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法的开发, 将对应避雷器及其局部放电测试设备接入到状态诊断方法中, 作为诊断方法运行的硬件支持。通过局部放电信号采集设备得出避雷器局部放电的测试结果以及状态诊断结果。图 7 表示的是 200 kV 避雷器输出结果。

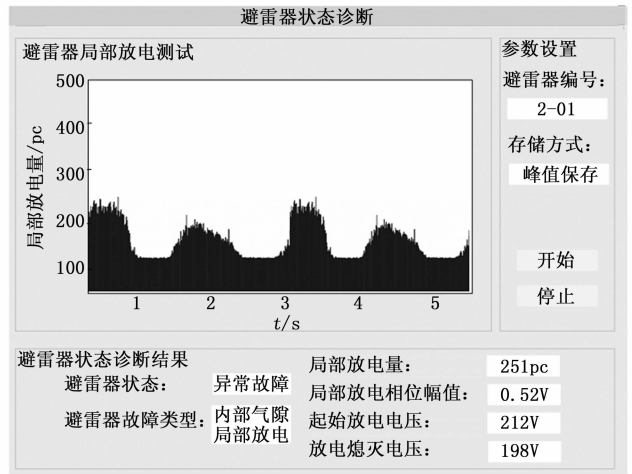


图 7 避雷器状态诊断结果

重复上述操作可以得出实验中准备的所有避雷器的局部放电测试与状态诊断结果。为体现出优化设计方法在诊断性能方面的优势, 设置两种传统诊断方法作为实验的对比方法, 对比方法分别为文献 [1] 提出的基于贝叶斯网络的避雷器诊断方法、文献 [2] 提出的基于场路耦合的避雷器诊断方法和文献 [3] 提出的基于均值漂移聚类的异常诊断方法, 文献方法的工作参数与优化设计方法一致, 具体如表 1 所示。在相同的实验环境下完成对两种对比方法的开发, 并得出相应的状态诊断结果。

2.6 诊断性能测试指标设置

根据表 1 设定的避雷器状态预期诊断值数据, 通过公式 (10) 可得出, 种故障下状态综合特征值为 0.758。为实现对避雷器状态诊断性能的量化、对比测试, 分别从状态参数诊断误差和状态诊断准确率两个方面设置量化测试指标, 其中状态参数诊断误差测试指标具体包括: 局部放电量诊断误差 ϵ_Q 、局部放电相位幅值诊断误差 ϵ_ψ 以及局部放电位置诊断误差 ϵ_p , 其中指标 ϵ_Q 和 ϵ_ψ 的数值结果如下:

$$\begin{cases} \epsilon_Q = |Q_{\text{diagnosis}} - Q_{\text{desire}}| \\ \epsilon_\psi = |\psi_{\text{diagnosis}} - \psi_{\text{desire}}| \end{cases} \quad (15)$$

式中, 变量 $Q_{\text{diagnosis}}$ 和 Q_{desire} 分别为避雷器局部放电量的诊断值和期望值, $\psi_{\text{diagnosis}}$ 和 ψ_{desire} 对应的是避雷器局部放电相位幅值的诊断值和期望值。另外局部放电位置诊断误差的计算公式为:

$$\epsilon_p = |x_{\text{diagnosis}} - x_{\text{desire}}| + |y_{\text{diagnosis}} - y_{\text{desire}}| + |z_{\text{diagnosis}} - z_{\text{desire}}| \quad (16)$$

式中, $(x_{\text{diagnosis}}, y_{\text{diagnosis}}, z_{\text{diagnosis}})$ 和 $(x_{\text{desire}}, y_{\text{desire}}, z_{\text{desire}})$ 对应的是避雷器局部放电位置三维坐标的诊断值和期望值。另外状态诊断准确率指标的计算公式如下:

$$\eta_{\text{accurate}} = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{all}}} \times 100\% \quad (17)$$

其中: N_{correct} 和 N_{all} 分别表示状态诊断正确的避雷器样本数量以及准备的避雷器样本总数量。最终计算出局部放电电量、局部放电相位幅值和局部放电位置诊断误差取值越小, 状态诊断准确率测试结果越高, 证明对应方法的状态诊断性能越优。

2.7 诊断性能测试结果与分析

2.7.1 200 kV 避雷器状态诊断结果

通过输出避雷器状态参数的统计, 得出 200 kV 避雷器状态参数诊断误差指标的测试结果, 其中局部放电量和局部放电相位幅值诊断误差的测试结果如表 2 所示。

表 2 200 kV 避雷器状态参数诊断误差测试数据表

200 kV 避雷器样本编号	基于贝叶斯网络的避雷器诊断方法		基于场路耦合的避雷器诊断方法		基于均值漂移聚类的异常诊断方法		基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法	
	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc
2-01	247	0.48	250	0.56	248	0.49	251	0.52
2-02	245	0.47	254	0.57	249	0.48	252	0.55
2-03	256	0.49	255	0.59	250	0.46	252	0.54
2-04	257	0.50	254	0.51	249	0.47	251	0.55
2-05	248	0.59	248	0.52	251	0.49	252	0.54
2-06	258	0.61	247	0.50	248	0.50	253	0.53
2-07	255	0.62	250	0.51	250	0.51	252	0.53
2-08	245	0.61	248	0.50	251	0.52	253	0.55

将表 2 中的数据代入到公式 (15) 中, 计算得出 3 种对比方法的平均局部放电电量诊断误差分别为 5.1 pc、3.0 pc 和 1.5 pc, 局部放电相位幅值诊断误差的平均值分别为 0.06 V、0.04 V 和 0.03 V, 而优化设计方法得出 ϵ_Q 和 ϵ_V 的平均值分别为 0.5 pc 和 0.01 V。通过相关数据的统计和公式 16 的计算得出局部放电位置诊断误差的测试对比结果如图 8 所示。

从图 8 中可以直观看出, 与两种传统方法相比, 优化设计方法的局部放电位置诊断误差更低, 约为 0.08 mm, 3 种对比方法的位置诊断误差约为 0.63 mm、0.58 mm 和 0.56 mm。另外状态诊断准确率指标的测试结果, 如表 3 所示。

通过公式 (16) 的计算, 得出 3 种对比方法的状态准确率平均值分别为 92.8%、96.8% 和 95.0, 所设计方法的状态准确率平均值为 99.5%。

2.7.2 500 kV 避雷器状态诊断结果

测试 500 kV 避雷器样品状态部分参数诊断误差, 测试结果如表 4 所示。

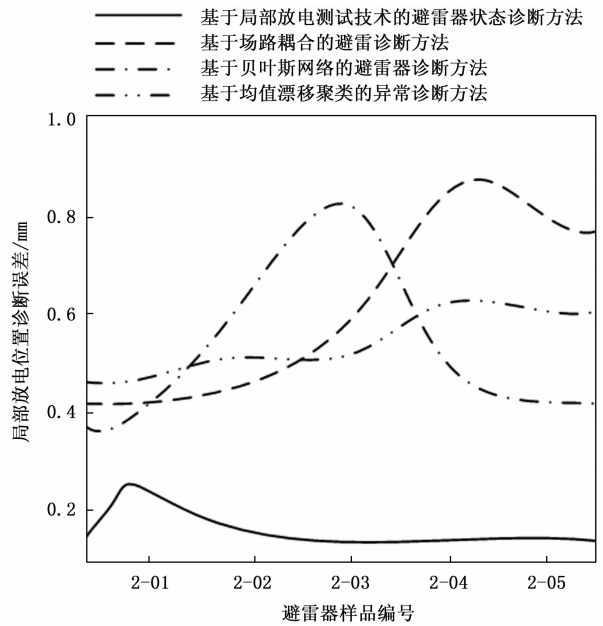


图 8 局部放电位置诊断误差对比曲线

表 3 200 kV 避雷器状态诊断准确率测试数据表

200 kV 避雷器样本编号	基于贝叶斯网络的避雷器诊断方法正确诊断避雷器样本数量/个	基于场路耦合的避雷器诊断方法正确诊断避雷器样本数量/个	基于均值漂移聚类的异常诊断方法/个	基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法正确诊断避雷器样本数量
2-01	48	49	48	50
2-02	45	48	47	49
2-03	46	50	49	50
2-04	46	48	47	50
2-05	45	50	48	50
2-06	45	47	48	50
2-07	50	48	47	50
2-08	46	47	46	49

表 4 500 kV 避雷器参数诊断误差测试结果

避雷器样本编号	基于贝叶斯网络的避雷器诊断方法		基于场路耦合的避雷器诊断方法		基于均值漂移聚类的异常诊断方法		基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法	
	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V	局部放电电量/pc	局部放电相位幅值/V
5-01	261	0.55	264	0.58	265	0.59	268	0.60
5-02	262	0.56	265	0.60	266	0.59	267	0.61
5-03	263	0.67	264	0.65	263	0.60	266	0.62
5-04	261	0.66	263	0.64	267	0.64	269	0.61
10-01	294	0.79	295	0.77	296	0.70	298	0.72
10-02	292	0.70	296	0.71	297	0.71	299	0.75
10-03	294	0.70	295	0.73	294	0.72	298	0.73
10-04	291	0.79	297	0.78	298	0.73	299	0.74

通过公式 (15) 的计算, 得出 3 种对比方法局部放电电量

诊断误差的平均值分别为 6.3 pc、3.6 pc 和 2.4 pc, 局部放电相位幅值的平均诊断误差分别为 0.05 V、0.03 V 和 0.02 V, 而优化设计方法的局部放电量及局部放电相位幅值的诊断误差平均值分别为 1.0 pc 及 0.01 V。通过公式 (16) 和公式 (17) 的计算, 得出 500 kV 避雷器局部放电位置诊断误差和状态诊断准确率的测试结果, 如图 9 所示。

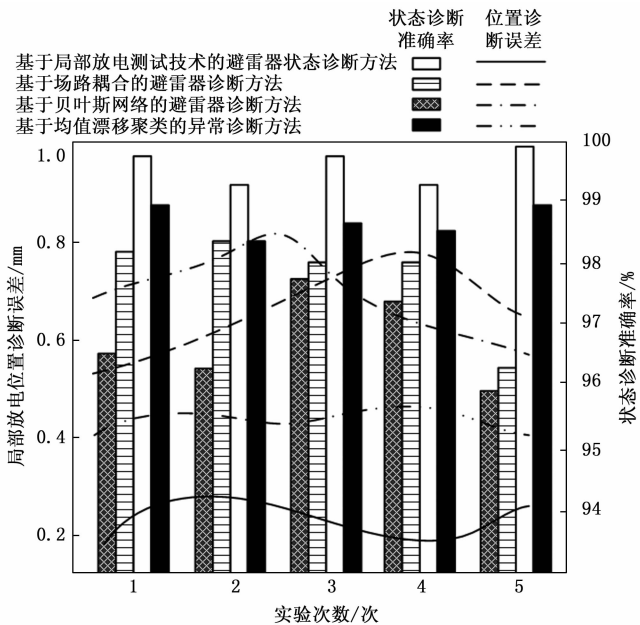


图 9 避雷器放电位置和状态诊断准确率测试结果

从图 9 中可以看出, 与 3 种传统方法相比, 优化设计方法的局部放电位置诊断误差更小, 平均值为 0.20 mm, 同时避雷器状态诊断准确率更高, 平均值为 99.6%。

综上所述, 基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法适用于各种工程领域, 可以保障设备的安全可靠运行, 减少设备损坏和停电的风险, 提高生产效率和供电可靠性, 降低维护成本。

3 结束语

避雷器局部放电量是一项考核制造工艺水平的重要指标, 同时也是衡量避雷器状态的指标。设计基于局部放电测试技术的避雷器状态诊断方法。通过模拟内部气隙、尖刺、沿面等局部放电现象的产生过程, 确定了不同局部放电状态下避雷器的运行特征。基于优化设计的采集设备, 从统计和时频域两个方面提取避雷器运行状态特征。利用局部放电测试技术, 计算避雷器的放电参数。通过特征匹配度和放电参数的比对, 可以得出避雷器状态的诊断结果。从实验结果中可以看出, 优化设计方法具有良好的诊断精度, 平均局部放电量诊断误差和局部放电相位幅值诊断误差都相对较小, 状态诊断准确率平均值高达 99.5% 和 99.6%。对于避雷器生产质量的提升以及设备元件维修工作具有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 田雨鑫, 樊友平. 基于贝叶斯网络的避雷器缺陷诊断 [J]. 水

电能源科学, 2023, 41 (1): 202-206.

- [2] 刘 尉, 肖集雄, 金 硕, 等. 基于场路耦合的 500 kV 氧化锌避雷器受潮缺陷分析 [J]. 电瓷避雷器, 2022 (1): 118-125.
- [3] 黎阳羊, 胡金磊, 赖俊驹, 等. 基于均值漂移聚类的开关柜局部放电异常检测 [J]. 电气传动, 2022, 52 (10): 63-69.
- [4] 李一鸣, 田付强, 刘雪梅, 等. 氧化锌避雷器绝缘老化与检测技术实验研究 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (11): 139-146.
- [5] 韩雪源. 基于 LSTM 算法的高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49 (12): 41-46.
- [6] 丁 毅, 王亚林, 李文艺, 等. 基于 SHF 信号采集和下混频技术的方波下局部放电测试方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48 (3): 1133-1141.
- [7] 张 川, 胡长猛, 王 辉, 等. 一起 GIS 避雷器带电检测案例分析 [J]. 电瓷避雷器, 2022 (5): 42-47.
- [8] 徐友刚, 陈敬德, 陆敏安, 等. 基于随机矩阵理论的局部放电脉冲快速检测方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (25): 10732-10736.
- [9] 张聪聪, 王 刚, 高 栋, 等. 基于卷积网络的 GIS 局部放电缺陷诊断方法与应用 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (3): 72-80.
- [10] 陈阳阳, 舒胜文, 吴 涵, 等. 金属氧化物避雷器缺陷诊断的反距离加权改进 KNN 算法 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (5): 635-641.
- [11] 齐庆周, 石 英, 徐腊梅, 等. 基于改进 SSA 的避雷器泄漏电流信号降噪算法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43 (6): 76-82.
- [12] 李亚锦, 刘英男, 于大洋. 基于小样本及贝叶斯推理的避雷器缺陷分类技术 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (11): 56-63.
- [13] 刘 健, 林大杰, 郭英强, 等. 动车组避雷器受潮故障特征量的变化特性研究 [J]. 机车电传动, 2023 (1): 131-137.
- [14] 黄海宏, 金春阳, 郝韩兵, 等. 氧化锌避雷器泄漏电流的全相位 FFT 分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (7): 210-216.
- [15] 陈起超, 张伟超, 白仕光, 等. 非本征光纤法一维传感器局部放电电检测研究进展 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (5): 1305-1320.
- [16] 司文荣, 傅晨钊, 卜 剑, 等. 基于多孔式敏感膜片的 MEMS 光纤珪珀传感器及其局部放电检测 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (11): 2613-2621.
- [17] 李晓霞, 张启宇, 冯志新, 等. 采用混沌振子和新相态判别法的局部放电检测 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (12): 156-162.
- [18] 段 昊, 程 林, 江 翼, 等. 基于高频及超声联合的换流变压器局部放电检测研究 [J]. 变压器, 2022, 59 (6): 48-52.
- [19] 周 秀, 吴旭涛, 汲胜昌, 等. 基于空间电容耦合原理的局部放电检测方法及其传感器研究 [J]. 高压电器, 2022, 58 (4): 63-69.
- [20] 邓 琨, 温启良, 张渊渊. 基于超声红外热像的电缆终端局部放电缺陷检测方法 [J]. 红外技术, 2022, 44 (9): 972-978.