

避雷器在线泄漏电流监测与电气试验数据融合分析

马天乐 李嘉欣

国网中卫供电公司 宁夏回族自治区中卫市沙坡头区 755000

【摘要】避雷器作为变电站一次设备的核心过电压防护装置,其运行状态直接影响电网安全稳定。传统单一的电气试验或在线监测方式存在数据片面性问题,难以全面精准评估避雷器健康状况。本文以变电站一次设备电气试验为核心研究方向,提出融合避雷器在线泄漏电流监测数据与离线电气试验数据的分析方法。首先阐述避雷器在线泄漏电流监测原理及典型离线电气试验项目,明确两类数据的特征与互补属性;其次构建“数据预处理-特征提取-融合决策”的分析模型,通过归一化处理消除量纲差异,提取表征设备状态的关键特征参数,采用加权融合算法实现两类数据的有效整合;最后结合变电站实际案例,验证该融合分析方法的可行性与优越性。结果表明,相较于单一数据评估模式,融合分析方法可显著提升避雷器故障诊断准确率,为变电站一次设备状态检修提供可靠技术依据。

【关键词】避雷器;在线泄漏电流;电气试验;数据融合;变电站一次设备

Online Leakage Current Monitoring and Electrical Test Data Fusion Analysis for Surge Arresters

Ma Tianle Li Jiaxin

State Grid Zhongwei Power Supply Company, Shapotou District, Zhongwei City, Ningxia Hui Autonomous Region 755000

【Abstract】As core overvoltage protection devices in substation primary equipment, surge arresters directly impact grid safety and stability through their operational status. Traditional single-method approaches relying solely on electrical testing or online monitoring exhibit data incompleteness, hindering comprehensive health assessment of surge arresters. This study focuses on electrical testing of substation primary equipment and proposes an analytical method integrating online leakage current monitoring data with offline electrical test data. First, we elucidate the principles of online leakage current monitoring and typical offline electrical test parameters, clarifying the characteristics and complementary attributes of both datasets. Second, we develop an analytical model comprising "data preprocessing→feature extraction→fusion decision-making," employing normalization to eliminate dimensional discrepancies, extracting key status-indicating parameters, and implementing weighted fusion algorithms for effective data integration. Finally, practical substation case studies validate the feasibility and superiority of this fusion approach. Results demonstrate that compared to single-data evaluation methods, the integrated analysis significantly improves fault diagnosis accuracy for surge arresters, providing reliable technical support for condition-based maintenance of substation primary equipment.

【Key words】Surge arrester; Online leakage current; Electrical testing; Data fusion; Substation primary equipment

引言

避雷器是变电站一次设备中核心的过电压保护部件,其运行可靠性直接关系到电网安全。该设备长期服役后易出现绝缘老化等故障,一旦失效将引发严重停电事故。当前对避雷器状态评估主要依赖离线电气试验与在线泄漏电流监测两类数据:前者测量精度高,但试验周期长且无法实现实时监测;后者实时性突出,但易受环境干扰导致误判。为此,本文聚焦变电站一次设备电气试验领域,开展两类数据的融合分析研究,通过构建科学的融合模型发挥两类数据的互补优

势,提升故障诊断的准确性与时效性,为状态检修模式优化提供技术支撑。

1 避雷器在线泄漏电流监测与电气试验基础

1.1 在线泄漏电流监测原理与数据特征

避雷器正常运行时,其泄漏电流主要由电容电流与阻性电流构成,其中阻性电流是反映避雷器绝缘状态的核心指标。当避雷器发生绝缘老化、内部受潮等故障时,阀片非线性特性会发生改变,导致阻性电流显著增大。在线泄漏电流

监测装置通过电流传感器套接于避雷器接地引下线,实时采集全泄漏电流信号,经信号调理、A/D 转换后传输至后台监测系统;监测系统对采集信号进行滤波、相位分离等处理,提取阻性电流、容性电流及全电流峰值等关键参数。

在线监测数据具有实时性强、动态性好的特点,能够捕捉避雷器在负荷变化、天气波动等不同运行工况下的状态变化,但易受外部干扰影响。例如,雨天避雷器表面受潮会导致泄漏电流增大,电磁干扰会使监测信号产生杂波,这些因素均会影响数据准确性,需在后续分析中针对性处理。

1.2 变电站一次设备避雷器典型电气试验

依据《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596-2021)要求,变电站一次设备避雷器离线电气试验主要包含三项核心项目:一是绝缘电阻测试,采用 2500V 及以上兆欧表测量避雷器绝缘电阻,通过与历史试验数据、同类型设备数据对比,判断内部绝缘是否存在受潮、劣化等问题,正常情况下绝缘电阻应不低于 1000M Ω ;二是直流 1mA 电压 (U_{1mA}) 及 0.75 U_{1mA} 下泄漏电流测试,该试验可有效反映避雷器阀片非线性特性, U_{1mA} 值变化反映阀片老化程度,0.75 U_{1mA} 下泄漏电流增大则表明阀片性能劣化或内部受潮,标准要求该工况下泄漏电流不大于 50 μ A;三是底座绝缘电阻测试,用于判断避雷器底座绝缘状况,避免因底座绝缘损坏导致泄漏电流测量失真。

离线电气试验数据具有准确性高、稳定性强的特征,可精准反映避雷器基础绝缘状态,但试验周期通常为 3 年,无法实时跟踪设备运行过程中的状态变化,且试验需停电开展,会影响电网连续供电。

1.3 两类数据的互补性分析

在线泄漏电流监测数据与离线电气试验数据在采集方式、数据特征及状态反映侧重点等方面存在显著差异,同时具有较强互补性。时间维度上,离线试验数据为特定时间点的静态数据,可反映设备基础状态;在线监测数据为连续动态数据,能捕捉设备状态实时变化。精度维度上,离线试验在标准环境下完成,数据精度高、干扰小;在线监测数据虽实时性强,但易受外部环境干扰。状态反映侧重点上,离线试验数据主要体现设备绝缘基础性能,在线监测数据主要反映设备实际运行工况下的动态状态。通过两类数据融合,可实现优势互补,全面覆盖避雷器状态评估需求,提升评估准确性。

2 数据融合分析模型构建

2.1 数据融合分析流程

本文构建的避雷器在线泄漏电流监测与电气试验数据

融合分析模型,核心流程包含数据预处理、特征提取、数据融合及状态决策四个环节。首先对采集的在线监测数据与离线试验数据进行预处理,消除干扰与异常值,统一数据格式;其次从预处理后的数据中提取表征避雷器状态的关键特征参数;再采用加权融合算法对两类特征参数进行融合,得到综合状态评估指标;最后结合预设阈值与故障诊断规则,实现对避雷器运行状态的精准判断。

2.2 数据预处理

数据预处理是保障融合分析准确性的基础,主要包括异常值剔除、数据标准化及量纲统一三个步骤。针对在线泄漏电流监测数据,采用 3 σ 准则剔除电磁干扰、设备故障导致的异常值,即当数据偏离均值超过 3 倍标准差时,判定为异常值并剔除;针对离线电气试验数据,重点核查试验过程规范性,剔除因操作不当产生的异常数据。

由于在线监测数据(如泄漏电流单位为 μ A)与离线试验数据(如绝缘电阻单位为 M Ω)量纲差异较大,需进行标准化处理。采用 min-max 归一化方法将两类数据映射至[0, 1]区间,公式为: $x' = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$,其中 x 为原始数据, x_{min} 为数据最小值, x_{max} 为数据最大值, x' 为归一化后数据。通过归一化消除量纲差异对融合分析的影响,确保两类数据具备可比性。

2.3 特征参数提取

结合避雷器工作原理与故障特征,从预处理后的两类数据中提取关键特征参数。在线泄漏电流监测数据提取的特征参数包括:阻性电流峰值、容性电流峰值、全泄漏电流峰值、阻性电流占比(阻性电流峰值与全泄漏电流峰值的比值);离线电气试验数据提取的特征参数包括:绝缘电阻值、 U_{1mA} 值、0.75 U_{1mA} 下泄漏电流值。这些特征参数可全面覆盖避雷器绝缘状态、阀片性能等关键信息,为后续融合分析提供可靠数据支撑。

2.4 加权融合算法设计

采用加权融合算法对提取的特征参数进行融合,核心思路是根据不同特征参数对避雷器状态评估的重要程度分配不同权重,通过加权求和得到综合评估指标。权重确定采用层次分析法(AHP),通过构建判断矩阵计算各特征参数的权重系数,保障权重分配的科学性。

具体融合过程为:设从在线监测数据中提取 m 个特征参数,权重分别为 w_1, w_2, \dots, w_m ,归一化后特征值分别为 x_1, x_2, \dots, x_m ;从离线试验数据中提取 n 个特征参数,权重分别为 $w_{m+1}, w_{m+2}, \dots, w_{m+n}$,归一化后特征值分别为 $x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_{m+n}$;则综合评估指标 $S = \sum (w_i \times x_i)$ ($i=1, 2, \dots, m+n$),其中 $\sum w_i=1$ 。根据综合评估指标 S 的数值,结合预设阈值(正常状态阈值、注意状态阈值、

故障状态阈值),完成对避雷器运行状态的分类判断。

3 实例验证

3.1 实例背景

选取某 220kV 变电站 110kV 母线侧 Y10W-108/281 型金属氧化物避雷器作为研究对象,该避雷器已运行 5 年。按照预防性试验规程,每年开展一次离线电气试验,同时配备在线泄漏电流监测装置实时采集数据。本次实例选取该避雷器 2024 年 1-6 月在线监测数据与 2024 年 6 月离线电气试验数据进行融合分析,验证模型有效性。

3.2 数据采集与预处理

从在线监测系统提取该避雷器 2024 年 1-6 月的监测数据(含全泄漏电流峰值、阻性电流峰值、容性电流峰值等参数),采用 3σ 准则剔除异常值后,统计分析得到各参数平均值;同时采集 2024 年 6 月离线电气试验数据(含绝缘电阻、 U_{1mA} 值、 $0.75U_{1mA}$ 下泄漏电流等参数)。对两类数据进行 min-max 归一化处理,得到标准化特征参数,具体数据如表 1 所示(注:表中数据为归一化后数据)。

表 1 标准化后的特征参数表

特征参数	数据类型	标准化值	权重系数
阻性电流峰值	在线监测数据	0.32	0.20
容性电流峰值	在线监测数据	0.28	0.15
阻性电流占比	在线监测数据	0.35	0.25
绝缘电阻值	离线试验数据	0.85	0.20
$0.75U_{1mA}$ 下泄漏电流值	离线试验数据	0.22	0.20

3.3 融合分析与结果验证

采用层次分析法确定各特征参数权重系数,具体分配如表 1 所示。根据加权融合算法计算综合评估指标 S : $S=0.32 \times 0.20 + 0.28 \times 0.15 + 0.35 \times 0.25 + 0.85 \times 0.20 + 0.22 \times 0.20 = 0.4265$ 。

结合该类型避雷器状态评估阈值(正常状态: $S \leq 0.6$; 注意状态: $0.6 < S \leq 0.8$; 故障状态: $S > 0.8$),综合评估指标 $S=0.4265 \leq 0.6$,判定该避雷器处于正常运行状态。为验

证结果准确性,对该避雷器开展现场巡检及进一步离线检测,未发现绝缘老化、受潮等故障,运行状态良好,与融合分析结果一致。

同时,分别采用单一在线监测数据与单一离线试验数据对该避雷器状态进行评估。单一在线监测数据评估中,阻性电流占比等参数均在正常范围,判定为正常状态;但在另一组存在轻微绝缘老化的避雷器试验中,单一在线监测数据因受环境干扰误判为正常状态,而融合分析结合离线试验数据精准判定为注意状态,后续停电检修证实该避雷器存在轻微绝缘老化。由此可见,融合分析方法可有效提升状态评估准确性,规避单一数据评估的局限性。

4 结论与展望

4.1 结论

针对变电站一次设备避雷器状态评估中单一数据的局限性,本文开展在线泄漏电流监测与电气试验数据融合分析研究,得出以下结论:(1)在线泄漏电流监测数据与离线电气试验数据具有显著互补性,在线数据的实时性与离线数据的精准性相结合,可全面覆盖避雷器状态评估需求;(2)构建的数据融合分析模型通过数据预处理、特征提取、加权融合等环节,能有效消除数据干扰与量纲差异,实现两类数据的科学融合;(3)实例验证表明,相较于单一数据评估模式,融合分析方法可显著提升避雷器故障诊断准确率,为避雷器状态评估提供可靠依据。

4.2 展望

未来可进一步优化数据融合算法,引入支持向量机、神经网络等机器学习算法,提升特征参数权重分配的智能化水平;同时扩大研究样本范围,涵盖不同类型、不同运行年限的避雷器,完善状态评估阈值体系;此外,可将融合分析模型与变电站状态检修管理系统对接,实现避雷器状态的实时评估与故障预警,推动变电站一次设备状态检修模式的全面升级。

参考文献

- [1]DL/T 596-2015, 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2]赵智大. 高电压技术[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [3]李庆民, 王钢, 李清泉. 金属氧化物避雷器在线监测与状态评估技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1876-1886.
- [4]张宏杰, 刘军, 王磊. 避雷器在线泄漏电流与离线试验数据融合分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 145-152.
- [5]陈维江, 沈其工, 李立涅. 电力系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.