

Determination of Environmental Temperature and Humidity Correction Coefficients for Surge Arrester Resistive Current Testing

Tao Ma

Substation Maintenance Center, Yinchuan Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan, Ningxia, 750000, China

Abstract

To clarify the variation patterns of surge arrester resistive current under different environmental temperature and humidity conditions and determine effective correction coefficients, it is necessary to establish a quantitative correction method for the impact of environmental parameters on test results. This study selects zinc oxide surge arresters as test objects and conducts systematic testing under a constant temperature and humidity control system, setting the temperature range at 10°C to 50°C and relative humidity range at 30%RH to 90%RH. Subsequently, phase-synchronized Fourier algorithm is employed to extract resistive current components, and a bivariate nonlinear least squares method is applied to fit the functional relationship between resistive current and temperature/humidity, establishing a regression model for correction coefficients. Experimental results show that for every 10°C increase in temperature, resistive current increases by approximately 6.21%; for every 10%RH increase in humidity, resistive current rises by about 4.76%, demonstrating a significant positive correlation between the two. The fitting model has a coefficient of determination (R^2) of 0.974, with the corrected error range controlled within $\pm 2.8\%$. This study establishes a resistive current correction coefficient model applicable under various environmental conditions, enabling standardized conversion of measured data and improving the accuracy and comparability of surge arrester condition assessment.

Keywords

surge arrester; resistive current; temperature and humidity; correction factor; nonlinear regression

避雷器阻性电流测试环境温湿度修正系数确定

马涛

国网宁夏电力公司银川供电公司变电检修中心, 中国·宁夏 银川 750000

摘要

为明确避雷器阻性电流在不同环境温湿度下的变化规律并确定有效的修正系数, 需建立环境参数对测试结果影响的定量修正方法。研究选用氧化锌避雷器作为测试对象, 在恒温恒湿控制系统下, 设定温度范围为10°C至50°C、相对湿度范围为30%RH至90%RH, 进行系统测试, 接着采用相位同步傅里叶算法提取阻性电流分量, 运用双变量非线性最小二乘法拟合阻性电流与温湿度之间的函数关系, 建立修正系数回归模型。实验结果表明, 温度每升高10°C, 阻性电流相对增加约6.21%; 湿度每增加10%RH, 阻性电流相对上升约4.76%, 两者对阻性电流具有显著正相关性。拟合模型决定系数 R^2 为0.974, 修正后误差范围控制在 $\pm 2.8\%$ 。研究建立了适用于不同环境条件下的阻性电流修正系数模型, 实现对实测数据的标准化换算并提高了避雷器状态评估的准确性和可比性。

关键词

避雷器; 阻性电流; 温湿度; 修正系数; 非线性回归

1 引言

氧化锌避雷器是电力系统过电压保护的核心设备, 其阻性电流是反映阀片老化与绝缘状态的关键指标, 直接关联设备运行安全。实际现场测试中, 环境温湿度波动会显著改

变阀片电导特性, 导致阻性电流测量值偏离真实水平, 影响状态评估准确性与数据可比性。针对这一难题, 明确温湿度对阻性电流的影响规律并建立定量修正方法, 成为提升避雷器在线监测可靠性的迫切需求, 为后续精准评估设备健康状态奠定基础。

2 材料与方法

2.1 实验材料

为保证温湿度对避雷器阻性电流影响规律研究具备稳

【作者简介】马涛(1983-), 男, 回族, 中国宁夏吴忠人, 硕士, 工程师, 从事高压电气试验、变电一次设备检修研究。

定性、可重复性与广泛代表性,研究选用型号一致、性能稳定、具备明确参数规格的 10 kV 氧化锌无间隙避雷器作为实验样本,其内部核心元件采用掺杂 Bi_2O_3 、 MnO_2 、 Co_3O_4 等微量氧化物的 ZnO 阀片,在工频电压作用下表现出良好的非线性导电特性与稳定的电流响应。样品统一来自同一批次、相同生产厂家,并在使用前进行严格筛选,剔除存在外部污秽、机械损伤或初始电流异常的个体,同时所有避雷器在实验前于 25℃、45%RH 条件下干燥存放 48 小时,确保无吸湿效应干扰阻性电流响应特性。为保证试验中电流信号采集的准确性,在引线及接线端子处采用银涂层铜导体与低接触电阻夹具进行连接,以降低接触电压降并防止发热效应产生额外误差。所有实验样本在施加电压前均进行绝缘电阻检测,数值大于 10 GΩ,排除击穿隐患。其样本在标准状态下测得初始阻性电流范围集中于 140 μA 至 160 μA 之间,表明各样本性能一致,为对比不同环境条件下阻性电流的变化趋势及修正模型的建立提供了稳定材料。

2.2 实验设备

研究为实现避雷器在不同环境温湿度条件下阻性电流的准确测量与参数回归,构建了一套高精度、多功能的实验系统,包含环境调控设备、工频电压源、泄漏电流采集系统及信号处理模块。环境调控设备采用智能型恒温恒湿试验箱,具备 PID 闭环控制功能,可在温度 10℃至 50℃、相对湿度 30%RH 至 90%RH 范围内进行精准调节,温湿波动范围分别控制在 ±0.3℃与 ±2%RH,可以维持单组实验条件的稳定性满足对阻性电流微小变化的响应监测。工频电源系统由隔离变压器与线性调压模块组成,额定输出 220 V,频率稳定在 49.95 ~ 50.05 Hz 之间,谐波含量小于 1%,可保障电压波形的正弦纯净性,有利于傅里叶变换提取阻性分量。电流采集模块由高精度电流互感器、24-bit A/D 转换器及带通滤波器构成,采样频率为 10 kHz,量程为 0 ~ 10 mA,精度优于 ±0.5 μA,具备实时基波提取与相位同步分析功能。数据采集与处理平台基于 LabVIEW 系统集成开发,实现电压与电流信号的同步采集、实时曲线显示、数据存储与预处理,为建立阻性电流与温湿度的数学关系模型提供稳定的实验数据支撑基础,整个系统接地电阻小于 1 Ω,满足泄漏电流精密测量的抗干扰要求。

2.3 实验方法

为分析温湿度因素对氧化锌避雷器阻性电流的影响特性并建立准确的环境修正系数,实验设计采用单变量控制原则,将温度与湿度分别作为独立变量设定多个梯度,在各稳态条件下采集对应阻性电流,排除交叉干扰。在温度影响实验中,设定湿度恒定为 60%RH,调控温度分别为 10℃、20℃、30℃、40℃与 50℃五个等级。在湿度影响实验中,设定温度固定为 20℃,调控相对湿度为 30%RH、50%RH、70%RH、90%RH 四个等级,每组实验开始前将避雷器放置于目标环境中稳定 60 分钟以确保热湿平衡,再施加工频电

压进行电流采集。测量采用相位同步傅里叶算法,获取电压与电流之间相位差,提取电流基波分量计算阻性成分,其表达式为:

$$I_r = I \cdot \cos \theta$$

其中 I 为测得的总泄漏电流有效值, θ 为电压与电流之间的相位差,阻性电流为功率因数分量,在保证相量同步的条件下具备高度准确性。每个环境工况下测量重复 3 次,记录平均值作为有效结果,并实时监测电压稳定性及环境漂移情况,排除非稳态数据。所有数据均编号分类储存,为模型拟合提供高质量实验数据。

2.4 数据处理

为建立避雷器阻性电流对环境温湿度变化的数学响应模型,实验所得数据需经多层处理流程,以确保模型建立的准确性与工程适用性。首先对实验数据进行一致性检验,剔除电压漂移超标、环境波动超限或采样中断产生的异常数据,接着采用三倍标准差法识别并清除离群点,统一以标准工况 (20℃, 60%RH) 下的阻性电流 I_0 为基准值,对不同环境条件下的阻性电流增量进行归一化处理。在此基础上,选取温度 T 、湿度 H 为双自变量,阻性电流 I_r 为因变量,建立非线性多项式回归模型,其表达式为:

$$I_r = I_0 \cdot (1 + aT + bH + cTH)$$

其中 a 、 b 、 c 分别为温度影响系数、湿度影响系数及交互作用系数,代表温湿度对阻性电流的综合影响。模型拟合采用最小二乘法计算各系数,基于多元回归统计模块进行系数显著性分析与残差分布评估,利用 R^2 决定系数衡量模型拟合程度,目标为 R^2 不低于 0.95,同时在拟合后引入实验外数据验证模型的泛化能力,计算预测误差与相对误差,确保修正模型具有高精度与稳定性,最终获得适用于工程现场阻性电流修正的参数方程。

3 结果与分析

根据实验方法,分别在控制湿度为 60%RH 的条件下设置温度为 10℃、20℃、30℃、40℃、50℃五个水平,以及在控制温度为 20℃的条件下设置湿度为 30%RH、50%RH、70%RH、90%RH 四个水平,接着使用相位同步算法提取阻性电流有效值,完成实验数据采集。为保证测量结果的稳定性,每组实验均测量三次并取平均值。在湿度恒定为 60%RH 时,阻性电流随温度升高而显著增大,由 10℃时的 139.9 μA 上升至 50℃时的 197.5 μA,总增幅达 41.1%,表现出近似线性增长趋势,且温度每上升 10℃,阻性电流平均增加约 14.4 μA。在温度恒定为 20℃的条件下,阻性电流随湿度增加亦有明显增长,由 30%RH 时的 147.7 μA 上升至 90%RH 时的 178.4 μA,增幅为 20.8%,平均每增加 10%RH 湿度,阻性电流上升约 5.1 μA。为定量建立阻性电流与温湿度之间的数学关系,依据所设模型形式,以 20℃、60%RH 条件下的阻性电流 160.1 μA 作为基准电流

I_0 ，进行归一化处理与多元非线性最小二乘回归，拟合参数结果如下：温度系数 $a=0.0061$ ；湿度系数 $b=0.0047$ ；温湿交互系数 $c=0.00013$ ；决定系数 $R^2=0.974$ 。阻性电流修正模型

$$I_r = I_0 \cdot (1 + 0.0061T + 0.0048H + 0.00013TH)$$

同时，进一步将该模型应用于未参与拟合的验证组数据，在设定条件为 35°C 、 $70\%RH$ 下测得阻性电流为 $180.3 \mu\text{A}$ ，模型预测值为 $179.8 \mu\text{A}$ ，误差为 $0.5 \mu\text{A}$ ，验证模型具备良好外推能力与稳定性。

4 结论与讨论

本研究以 10 kV 氧化锌无间隙避雷器为对象，在温度 10°C 至 50°C 、相对湿度 $30\%RH$ 至 $90\%RH$ 的恒温恒湿控制条件下，通过单变量梯度实验与相位同步傅里叶算法提取阻性电流，结合双变量非线性最小二乘回归建立环境温湿度修正模型，系统揭示了温湿度对阻性电流的影响机制、量化了修正系数并验证了模型工程适用性，为现场数据标准化与状态评估精准化提供了科学依据。核心结论表明，氧化锌阀片阻性电流对环境温湿度具有显著正相关性，温度每升高 10°C 平均相对增加 6.21% ，湿度每增加 $10\%RH$ 平均相对上升 4.76% ，这一规律源于阀片电导特性的物理化学本质：温度升高加剧本征载流子热激发，使阻性漏电流呈近似线性增长。实验中 10°C 至 50°C 区间总增幅达 41.1% （从 $139.9 \mu\text{A}$ 至 $197.5 \mu\text{A}$ ）验证了载流子迁移率随温度升高的指数级提升效应，而湿度增加则通过阀片表面吸附水分子形成弱导电通道，或微增晶界层电导率，导致 $30\%RH$ 至 $90\%RH$ 区间总增幅 20.8% （从 $147.7 \mu\text{A}$ 至 $178.4 \mu\text{A}$ ），其影响虽弱于温度但不可忽略，尤其在南方高湿地区需重点补偿。

所建双变量非线性回归模型以 20°C 、 $60\%RH$ 为基准工况（阻性电流 $160.1 \mu\text{A}$ ），纳入温度一次项、湿度一次项及温湿交互项，通过最小二乘拟合得到温度系数 0.0061 、湿度系数 0.0047 、交互系数 0.00013 ，决定系数 R^2 达 0.974 ，表明模型可解释 97.4% 的阻性电流变化，残差分布于 $\pm 3 \mu\text{A}$ 内，满足工程精度需求。外推验证中， 35°C 、 $70\%RH$ 条件下实测阻性电流 $180.3 \mu\text{A}$ 与模型预测值 $179.8 \mu\text{A}$ 误差仅 $0.5 \mu\text{A}$ ，修正后整体误差控制在 $\pm 2.8\%$ ，较同类研究经验公式（通常 $\pm 5\%$ 以上）显著提升，证实模型对复杂环境的鲁棒性。该模型突破传统经验补偿的模糊性，实现实测数据向基准工况的精准还原，例如现场测得某避雷器在 32°C 、 $65\%RH$ 时阻性电流为 $185 \mu\text{A}$ ，可通过模型反推基准值约 $168 \mu\text{A}$ ，与标准状态（ $140\sim 160 \mu\text{A}$ ）直接比对，若修正后值接近上限则提示阀片老化加速，需结合历史数据跟踪趋势，避免单一环境干扰导致的误判。

根据实验结果可知，温湿度耦合效应的量化是模型关键，交互系数 0.00013 表明高湿高温环境下阻性电流增幅

略高于单因素叠加，如 50°C 、 $90\%RH$ 时理论增幅较单因素和增约 1.2% ，这与水分子在高温下更易渗透阀片晶界、增强离子导电的微观机制一致。模型优势在于双变量结构更贴合实际环境，较单变量模型（如仅考虑温度）减少约 15% 的系统误差，且以同批次避雷器为样本（初始阻性电流 $140\sim 160 \mu\text{A}$ ）确保参数稳定性，其银涂层铜导体引线、低接触电阻夹具及 24-bit A/D 转换器的硬件配置，从源头降低接触压降与采样噪声对数据的干扰^[1]。

但该实验仍存在以下局限性：一、实验温湿度范围覆盖我国多数地区常态环境，但极端条件（如 $>50^\circ\text{C}$ 高温导致阀片热崩溃、 $<10^\circ\text{C}$ 低温使表面结露或冰阻断导电通道、 $>90\%RH$ 高湿引发严重受潮）下，载流子迁移率与表面吸附机制可能发生突变，导致系数失效，需后续在极端工况箱开展补充实验；二、样本限定于 10 kV 无间隙避雷器，不同电压等级（如 35 kV 阀片厚度增加，温度敏感性可能降低）、结构（带间隙避雷器间隙介质受湿度影响更复杂）或老化阶段（严重受潮时表面电导主导，湿度系数或显著增大）的设备，其电导特性差异可能影响普适性，建议按电压等级、结构类型建立细分模型库^[2]。三、实验排除了污秽、机械损伤等干扰，实际现场需结合红外测温识别热点、外观检查，避免表面泄漏电流叠加导致的阻性电流虚高，例如污秽等级 III 级时，需先清洗表面再测量，或引入污秽修正因子与温湿度模型联用^[3]。

综上，该模型的价值在于将环境干扰从“不可控因素”转化为“可计算参数”，推动避雷器在线监测从定性观察转向定量评估。在工程应用中，可嵌入区域电网监测系统，自动调用模型校正各站点数据，实现跨区域、跨季节的趋势对比，为差异化运维提供依据，如某区域夏季修正后阻性电流普遍较冬季高 12% ，属正常环境波动，无需过度检修，而某站点修正后值连续三月上升 8% ，则需列为重点监测对象。相较于国际标准 IEC 60099-5 推荐的简化修正公式，本模型纳入湿度与交互效应，修正精度提升约 40% ，可为行业标准修订提供数据支撑。未来研究可探索温湿度与老化状态的协同影响（如老化阀片温度敏感性是否增强），或结合机器学习算法（如随机森林）优化模型自适应能力，进一步提升复杂场景下的泛化性能，最终服务于电网设备全生命周期健康管理。

参考文献

- [1] 靳英,朱丽媛,李文庆,等. 考虑滞回特性的避雷器阻性电流测量方法[J].电瓷避雷器,2025,(02):49-55+65.
- [2] 陈尉,吴立炜,郭彩虹,等. 避雷器阻性泄漏电流在线监测系统研究与开发[J].海峡科学,2025,(03):55-59.
- [3] 王星.金属氧化物避雷器的阻性电流干扰抑制方法研究[D].四川大学,2021.