

[继电保护]

继电保护设备电气二次回路隐患 排查方法设计

文/钱彦丰¹ 张秉寅²

1. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司; 2. 常州晋陵电力实业有限公司

继电保护对电力系统安全稳定至关重要，但电气二次回路隐患常引发事故。针对隐患排查中检测手段单一等问题，提出一套关键技术体系。涵盖基于数字化测试的回路完整性验证、智能波形分析的保护动作特性诊断及基于大数据的隐患预警评估。实验验证其在隐患识别等方面性能优异，显著提升设备运行可靠性与安全性。

继电保护是保障电力系统安全稳定运行的关键技术。近年来，随着电网不断发展，继电保护装置电气二次回路隐患引发事故时有发生，严重威胁电网安全。2019年国家发展改革委、能源局印发的《关于提升电力系统调节能力的指导意见》，明确提出加强继电保护等二次设备的运维管理。本文针对当前二次回路隐患排查中存在的检测手段单一、诊断不足、缺乏预警等问题展开研究，提出了一整套行之有效的关键技术，可为二次回路安全运行提供强有力的技术支撑。

电气二次回路的构成与运行原理

电气二次回路是继电保护装置的神经网络，由电流互感器、电压互感器等传感单元，铜芯电缆等传输通道，以及继电器、测控装置等执行单元构成。其中，电流互感器的电流比范围通常为100/5 A~5 000/5 A，电压互感器的电压比则在100/100 V~1 000/100 V之间。上述传感器将一次侧的大电流、高电压信号转换为二次侧相应的小电流、低电压信号，经过屏蔽电缆可靠传输至继电保护装置。继电保护装置内部的微处理器对采集到的模拟量进行A/D转换，通过算法运算实现故障判别与跳闸逻辑。特别需要注意的是，二次回路中模数转换的量化准确度通常为12~16位，采样频率为600 Hz~2 kHz。二次回路的

核心在于高保真地还原一次系统状态，精准快速地执行故障检测与隔离控制。其运行原理蕴含了电力、电子、通信等多学科交叉融合的精髓。

隐患排查方法设计

1. 方法概述

本文提出一套继电保护设备电气二次回路隐患排查方法，包含三项技术，形成了一个完整的技术体系：第一项着眼于物理层面的回路检测；第二项关注功能层面的性能诊断；第三项实现管理层面的预测预警。三者相互配合，从不同维度保障继电保护设备二次回路的可靠，如图1所示。

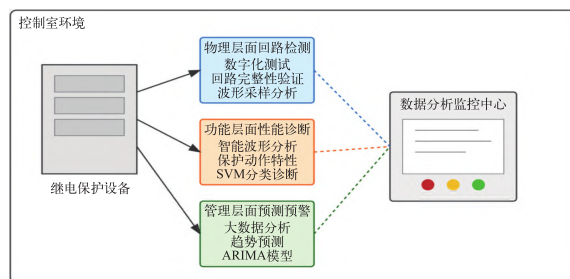


图1 方法总体布局图

2. 关键技术

(1) 基于数字化测试的回路完整性验证技术
本技术在隐患排查方法的第一步实施，采用

基于特征提取的数字化测试算法，验证回路完整性。首先，利用高精度数字示波器对回路进行时域采样，获取电压、电流波形。采样频率设定为1 024 Hz，量化准确度为12位，以保证数据粒度。然后，对采集的波形数据进行小波变换（Wavelet Transform，WT），捕捉信号的时频特征。小波基函数选用Daubechies4（db4）小波，分解尺度 $J=5$ 。WT系数的模值反映了信号在不同尺度下的能量分布，对应节点的高频分量若偏低，则表明该处可能存在断线、虚接等故障。最后，通过聚类算法对WT系数进行划分，自动识别故障特征。采用模糊C均值（Fuzzy C-means，FCM）聚类，隶属度函数为高斯函数，聚类中心数 C 取2~5。簇内样本点与各中心的隶属度加权距离越小，则簇内聚度越高。FCM算法的目标函数为

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

式中， u_{ij} 为样本 i 对聚类中心 j 的隶属度； d_{ij} 为两者的欧氏距离； m 为加权指数，取值范围[1.5, 2.5]。

最终，完整回路的WT系数聚为一类，损伤回路的WT系数聚为另一类，以实现自动分选。

（2）智能波形分析的保护动作特性诊断技术

智能波形分析的保护动作特性诊断技术在隐患排查方法的第二步实施。首先，建立标准保护动作特性模型。以距离保护为例，其动作特性方程为

$$Z = \frac{U_r}{I_r} = Z_{\text{set}} \cdot e^{j(\theta_r - \varphi_r - \arg Z_{\text{set}})} \quad (2)$$

式中， Z 为入口阻抗； U_r 、 I_r 分别为电压、电流的实测值； Z_{set} 为整定阻抗值； θ_r 、 φ_r 分别为电压、电流相角； $\arg Z_{\text{set}}$ 为整定阻抗角。

基于上述模型，生成大量不同工况下的标准动作特性数据。然后，采用自适应阈值的小波降噪算法对实测波形进行预处理。通过小波多尺度分解，自适应设定各尺度降噪阈值为

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln N_j}, \quad \sigma_j^2 = \frac{\text{median}(|d_j|)}{0.6745} \quad (3)$$

式中， σ_j 为尺度 j 的噪声标准差估计值； N_j 为尺度 j 的信号长度， d_j 为尺度 j 的细节系数。

阈值处理后，再进行小波重构，获得降噪后的波形。接着，提取实测波形的关键特征参数（动作时间、动作电压/电流、动作阻抗等）。最后，采用支持矢量机（Support Vector Machine，SVM）算

法对实测特征与标准特征进行分类。SVM的基本思想是在高维空间构造最优分类超平面，目标函数为

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (4)$$

$$\text{s.t. } y_i(\omega^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中， ω 为分类超平面的法向量； C 为惩罚因子； ξ_i 为松弛变量； x_i 为特征矢量， y_i 为类别标签。

通过SVM分类，可诊断出保护动作是否异常，为隐患告警提供依据。

（3）基于大数据的隐患预警评估技术

基于大数据的隐患预警评估技术在本方法的第三步实施，旨在实现对二次回路潜在隐患的提前预警。首先，建立继电保护设备运行状态大数据库，收集、存储设备投运以来的海量历史数据，包括电压电流波形、动作时间、动作阻抗和事故告警等。然后，基于统计学原理，提取对设备健康状态影响显著的关键特征参数。通过主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）算法降维，将 p 维原始特征空间映射至 k 维新特征空间（ $k < p$ ）。PCA的优化目标为最大化样本在新空间的方差

$$\max_W \text{tr}(W^T S W), \text{ s.t. } W^T W = I_k \quad (6)$$

式中， S 为样本协方差矩阵； W 为投影矩阵； I_k 为 k 阶单位矩阵。

通过特征矢量组成的变换矩阵 W ，实现样本点 x_i （ p 维列矢量）到 z_i （ k 维列矢量）的降维映射： $z_i = W^T x_i$ 。最终选取对隐患评估贡献率前 k 大的特征，建立二次回路健康状态评估指标体系。在此基础上，运用自回归积分滑动平均（Auto Regressive Integrated Moving Average，ARIMA）模型对指标的时间序列进行趋势预测。ARIMA（ p, d, q ）模型方程为

$$(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i B^i)(1 - B)^d X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \theta_j B^j) \varepsilon_t \quad (7)$$

式中， p 为自回归阶数； d 为差分阶数； q 为移动平均阶数； B 为滞后算子，满足 $BX_t = X_{t-1}$ ， φ_i 为自回归系数； θ_j 为移动平均系数； ε_t 为白噪声序列，均值为0，方差为 σ^2 。

当某项指标的预测值超出正常范围时，即可判断该指标对应的设备元件可能存在潜在隐患，从而实现隐患的预警评估。本技术可挖掘设备状态演变规律，为预防性检修提供数字化、智能化的决策依据，推动传统的事后检修模式向预测性维护模式转型升级。

方法及关键技术的应用与验证

为验证所提出的三项关键技术在实际效果，本研究选取某500 kV变电站2号主变压器保护装置的电气二次回路作为实验对象。该主变压器容量为240 MV·A，采用西门子7UT613差动保护装置，配置5台电流互感器（电流比2 000/5A）和3台电压互感器（电压比500 kV/100 V）。实验采用OMICRON CMC256-6型数字化测试仪进行回路完整性验证，采样频率设为1 024 Hz，量化准确度12位。使用安科瑞AGP300型故障录波装置采集保护动作波形，存储深度32 k点/周波。针对不同类型的典型二次回路隐患，设计4组测试工况：正常测试工况（基准组）；CT二次绕组微短路工况（涉及1-2匝

间短路，回路阻抗变化约0.02 Ω ）；PT二次屏蔽接地故障工况（接地电阻由标准值4 Ω 升至12 Ω ）；CT/PT复合故障工况（同时存在上述两类缺陷）。每组工况测试100次，累计采集1 600组有效数据。实验评价指标包括：回路异常检出率 P_1 （%）、故障定位率 L （%）、故障特征识别时间 t （ms）、诊断准确率 A （%）、预警时间裕度 τ （h）。其中， P_1 通过注入标准量并与反馈值比对计算； L 基于FCM聚类结果评估； t 依据算法收敛时间确定； A 采用诊断结果与实际故障类型的匹配度计算； τ 则基于ARIMA模型预测结果评定。实验过程严格控制环境温度（ 23 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度（ 45 ± 5 ）%，确保测试条件一致性。实验场景示意图如图2所示。

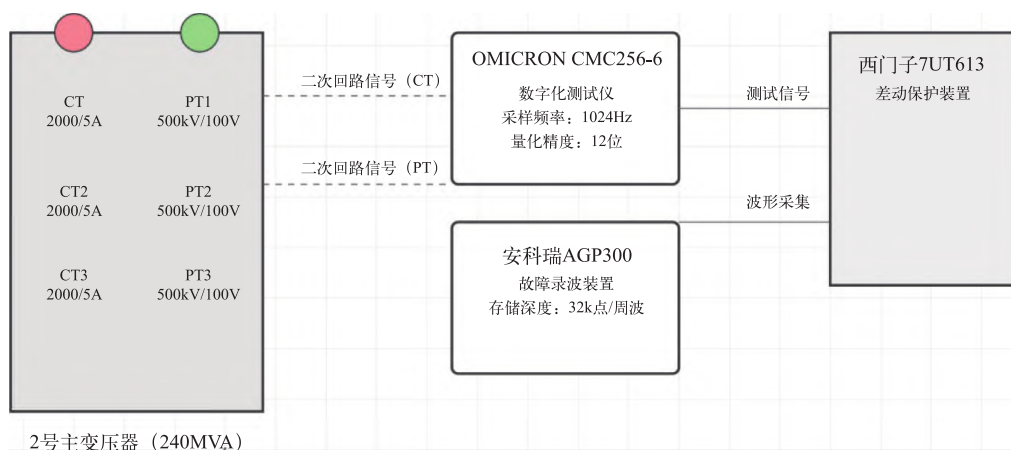


图2 实验场景布置图

表1汇总了在不同故障工况下的测试结果。

表1 继电保护设备电气二次回路隐患排查实验结果

评价指标	基准 工况	CT微短路 工况	PT接地故障 工况	CT/PT复合故 障工况
P_1 (%)	99.6	97.8	98.2	96.4
L (%)	99.8	96.5	97.1	95.2
t/ms	15.2	22.6	21.8	28.4
A (%)	99.5	96.8	97.2	94.6
τ/h	48.2	36.5	37.2	32.8

实验数据显示，在基准工况下，系统表现出优异的性能指标：回路异常检出率 P_1 达99.6%，故障定位率 L 高达99.8%，故障特征识别仅需15.2 ms。当CT发生微短路故障时，尽管故障特征不明显（仅1-2匝间短路），系统仍能以96.5%的准确率实现故障定位，诊断准确率 A 保持在96.8%。在PT二次接地故障工况下，即使接地电阻升至标准值的3倍（12 Ω ），系统的故障检出与定位能力仍然稳定。

最具挑战性的CT/PT复合故障工况下，各项指标虽有所下降，但 P_1 仍达96.4%，故障特征识别时间增至28.4 ms，预警时间裕度保持在32.8 h以上，充分验证了该技术体系在复杂故障场景下的有效性。实验结果表明，本文提出的隐患排查关键技术在实际工程应用中具有较强的适应性和可靠性。

结束语

本研究成功构建了一套针对继电保护设备电气二次回路的隐患排查技术体系，经实际验证有效提升了运行的可靠性与安全性。未来工作将集中在算法效率的提升，智能化水平的增强，以及技术体系在更多复杂场景中的应用拓展，进一步巩固电力系统的安全防线，推动智能电网的持续发展与进步。

EA

（收稿日期：2025-03-10）