

[差动保护]

二次回路状态监测技术在差动保护系统中的应用研究

文/王辉

陕西德源府谷能源有限公司

探讨二次回路状态监测技术，利用智能传感器选型确保信号采集准确度，引入边缘技术实现实时数据处理提升系统响应速度；构建自适应故障诊断模型实现对故障特征动态识别；设计云平台集成通信协议保障数据的快速传输；设立多级预警机制分级响应不同故障情况对比实验验证该技术在故障检测准确率、响应时间、停机次数和维护成本方面的显著提升，为电力系统的智能化管理提供实践依据。

电力系统不断发展，差动保护系统也在电力设备安全保护方面提供保障。二次回路作为差动保护系统核心部分，其稳定性和可靠性直接影响保护性能。传统二次回路监测方法依赖人工巡检和简单设备反馈，难以满足现代电力系统实时智能化需求。对二次回路状态监测技术不断创新具有极大研究意义。本文讨论二次回路状态监测技术在差动保护系统的应用，分析其实施过程中的关键技术改进，为电力设备安全保护提供技术参考。

二次回路状态监测技术

1. 智能传感器选型

二次回路状态监测系统中，首先对系统需求进行详细分析，确定传感器需满足的具体参数要求。根据电压等级、测量范围和准确度需求，依次筛选适合的传感器类型。初步选型时，基于系统的电压范围和信号类型，先确定传感器的初步规格。对多家供应商产品的性能参数和稳定性测试数据进行对比，进一步缩小选择范围。在小范围内选择候选设备后，进行现场测试，以验证传感器在实际工况下的适应性。测试内容涵盖信号采集准确度、抗干扰能力和长期稳定性等。测试合格的传感器需通过系

统兼容性检查，确保其输出信号能无缝接入监测系统。根据测试结果和安装调试情况，选择一款或多款传感器作为系统的监测装置，完成选型工作。

2. 基于边缘计算的实时数据处理

为实现数据的高效处理，引入基于边缘计算的架构，将数据处理和分析任务部署在靠近传感器的边缘节点。该方法分层处理，将传感器采集的数据实时进行初步筛选与分析，优化数据传输流程并提升系统的实时响应能力。首先在边缘节点上配置数据清洗模块，负责过滤传感器数据中的异常值与噪声，提高数据质量。利用数据压缩技术对数据进行降维处理，去除冗余信息。为便于后续特征提取，采用快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）将时间域信号转换为频域信号，假设输入数据为，其频域表达式为

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

频域转换后的数据经过降维处理，以减小数据冗余并提高传输效率。常用的降维方法是主成分分析（Principal Component Analysis, PCA），将高维数据压缩至低维特征空间，同时保留信号的主要信息。假设输入的特征向量为 $\mathbf{X}$ ，转换矩阵为 $\mathbf{W}$ ，则降维后的特征向量 $\mathbf{Y}$ 表示为

$$Y = WX \quad (2)$$

在边缘节点完成频域转换与降维后，将处理后的特征数据编码并以压缩格式传输至中心服务器，供后续分析。

3. 自适应故障诊断模型构建

本研究构建自适应故障诊断模型实现二次回路状态的精确故障诊断，该模型能够根据实时数据动态调整参数，提高诊断准确度和灵活性。建立输入特征向量 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，其中 x_i 为第 i 个特征。诊断模型利用权重 w_i 对特征进行加权，生成故障评分 S ，计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (3)$$

初始权重由历史数据训练获得。诊断过程中，根据输入数据的实时反馈，自适应调整各特征权重。权重更新机制基于梯度下降法，借助损失函数的最小化调整 w_i 值。假设损失函数为 $L(S, S_{\text{target}})$ 为目标评分，则权重更新公式为

$$w_i^{\text{new}} = w_i^{\text{old}} - \eta \frac{\partial L}{\partial w_i} \quad (4)$$

式中， η 为学习率，用于控制更新步长。

模型根据输入数据的变化不断更新权重，适应不同故障类型的特征。为确保故障评分的准确性，模型在每次更新后进行评分标准的动态调整。设故障判别阈值 T ，当 $S > T$ 时判定为故障。阈值 T 依据历史评分数据的统计结果动态更新，以维持一定的误差控制水平。

4. 云平台集成通信协议

为实现边缘节点与云平台的高效通信与数据共享，采用分层通信协议架构，结合边缘计算与云端分析，确保数据的快速传输、处理和存储，同时保障不同节点间的可靠数据交互。通信协议将数据分为实时数据和非实时数据，确保高优先级数据的及时传输。对于实时数据，优先级设置较高，以确保数据迅速上传至云平台，同时为非实时数据预留带宽，以避免传输延迟和拥堵。在数据传输过程中，协议采用基于消息认证码（Message Authentication Code, MAC）的加密算法来确保数据安全性和完整性。MAC算法在数据包中添加认证码，保证传输过程中的数据不被篡改。对于传输的数据 M 和密钥 K ，MAC的生成公式为

$$\text{MAC} = H(K \oplus \text{pad1} \parallel H(K \oplus \text{pad2} \parallel M)) \quad (5)$$

式中， H 为哈希函数； $\parallel$ 表示串联操作；pad1和pad2为填充常量，用于增强安全性。

边缘节点在发送数据前生成MAC码并附加至数据包中，云平台接收后进行解密和重新计算MAC值来校验数据完整性。云平台还配置数据同步模块，确保边缘节点数据与云端存储的一致性。

5. 实时监测预警机制

实时监测预警机制通过设定多级阈值来识别和分级故障风险，确保系统能够及时响应并采取相应的防护措施。预警机制基于实时采集的电流、电压等关键参数的波动情况，对比设定的阈值，判断故障的严重程度，并触发相应的警报等级。预警机制通常设定三级阈值：预警、警告和紧急。每一级阈值对应不同的报警响应级别和处理策略，确保系统的响应效率 and 安全性。各级阈值的设置及其对应的处理措施见表1。

表1 预警级别与相应措施

预警级别	阈值范围 (以电流偏差为例)	报警响应
预警	$0.8T \leq I < T$	低级报警，监测记录
警告	$T \leq I < 1.2T$	中级报警，预警通知
紧急	$I \geq 1.2T$	高级报警，立即断电

表1中， T 为正常运行的电流阈值， I 为当前监测的电流值。表1中的分级阈值依据设备和回路的安全极限参数进行设定。在实际运行中，实时监测系统对数据进行连续分析，一旦检测到数值超出预警级别的阈值范围，即触发对应的报警响应。系统自动记录异常数据，生成相应报告，并将预警通知发送至维护人员。在紧急情况下，系统会自动采取防护措施，保障系统的安全稳定运行。

应用分析

1. 应用过程

应用场景选择在某大型发电厂，该厂拥有10台发电机组和超过50台大型变压器。由于设备数量多、二次回路复杂，现有的人工巡检方式难以及时发现潜在故障，尤其是接触不良和线缆老化等隐蔽性问题，导致发电机组频繁停机，影响整体效率与安全。为提升系统运行的可靠性，该发电厂引入二次回路状态监测技术，与传统监测手段进行对比

实验。实验组采用改进的二次回路状态监测系统；对照组则保留传统人工巡检和基础设备监测手段。每组实验在相同环境下进行三次，试验周期为一个月。实验组和对照组在相同试验周期内进行数据采集，记录故障检测的准确率、响应时间、停机率和维护成本等关键指标，比较二次回路状态监测系统相对于传统方法的改进成效。

2. 效果分析

(1) 故障检测准确率

图1为故障检测准确率效果。采用二次回路状态监测技术的实验组在三次实验中的平均准确率达到95.45%，显著高于传统手段的83.92%。每组实验中，使用本文技术的准确率都较传统方法高出10%以上，体现出系统在故障识别中的稳定表现。传统手段在复杂工况下难以准确判断故障位置，导致漏报和误报的概率较高，而二次回路状态监测技术通过高准确度传感器和自适应诊断模型，大幅提高检测准确度。该优势为系统的及时维护和故障处理提供有效数据支持，减少潜在的设备损坏风险。

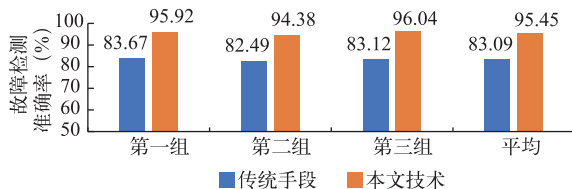


图1 故障检测准确率对比

(2) 响应时间

图2为响应时间效果。采用二次回路状态监测技术的系统平均响应时间为133.44 ms，比传统手段的255.84 ms缩短近一半。传统方式通常依赖人工检测和反馈，响应速度受限于人力的巡检频次，难以满足高时效性的要求。而本文技术利用边缘计算实现实时数据处理和快速预警，在故障发生后能够迅速识别并自动发出警报，极大地缩短故障检测到响应的的时间。更短的响应时间意味着设备能够更快地恢复正常运行，降低停机风险。

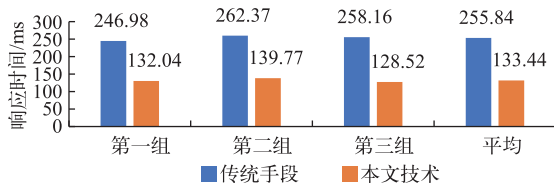


图2 故障响应时间对比

(3) 停机次数

图3为停机次数对比。采用二次回路状态监测技术的实验组平均停机次数为1.67次，而传统手段的对照组平均停机次数高达6.33次。停机事件通常会导致生产延误和维护成本增加，因此减少停机次数具有显著的经济效益。二次回路状态监测技术能够实时监控回路状态，提前发现隐患并自动预警，使得潜在的故障在造成设备停机前得到及时处理。停机次数的大幅减少表明该技术在设备可靠性和稳定性上的显著优势。

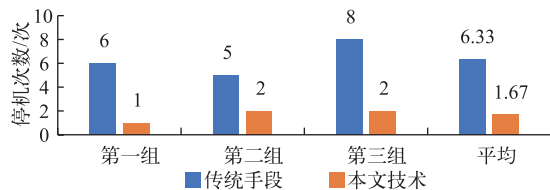


图3 停机次数对比

(4) 维护成本

维护成本对比如图4所示。从图4的维护成本效果来看，实验组的平均维护成本为5 675.75元，较传统手段的平均维护成本8 095.60元降低约30%。传统手段依赖于定期人工巡检，涉及人力、物力的高额成本；而二次回路状态监测技术通过智能传感器和数据分析自动完成监测任务，显著降低维护频率和维修成本。成本的节约提高设备运行的经济性，还使得企业能够将资源投入到其他生产环节，实现整体效率的提升。

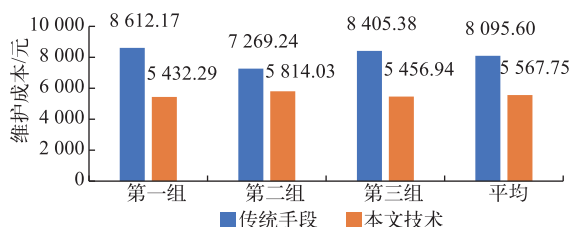


图4 维护成本对比

结束语

二次回路状态监测技术在差动保护系统中的应用，利用智能传感器、边缘计算和实时预警机制，有效提升故障检测的准确性和响应速度。对比实验结果表明，该技术显著降低设备的停机次数和维护成本，提高电力系统的安全性和经济性。EA

(收稿日期：2024-11-12)