

Research on Reliability Protection Fault Diagnosis and Prediction Based on Big Data

Yuting Shi Chongqing Wang

Zhejiang Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

The safe and stable operation of power systems relies on the high reliability and rapid response of relay protection devices. With the expansion of power grid scale and increasing complexity of equipment, traditional relay protection methods based on setting adjustment and logical judgment can no longer meet the demands of intelligent and refined operation and maintenance. This paper investigates the construction of relay protection fault diagnosis and prediction models using big data analysis technology. By collecting and cleaning multi-source monitoring data including current, voltage, phase angle, and switch status, a feature database is established. Machine learning and deep learning algorithms are employed to extract fault characteristics and recognize patterns. The study proposes a fault diagnosis process based on temporal feature fusion and intelligent algorithm optimization, which has been validated through operational data from actual substations. Results demonstrate that this method outperforms traditional algorithms in fault identification accuracy, response time, and early warning capability. The research provides theoretical foundations and technical support for intelligent relay protection and secure grid operation.

Keywords

big data; relay protection; fault diagnosis; fault prediction; machine learning; power system

基于大数据的继电保护故障诊断与预测研究

施雨婷 王崇庆

浙江省送变电工程有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

电力系统的安全稳定运行离不开继电保护装置的高可靠性与快速响应。随着电网规模扩大与设备复杂性提高,传统基于定值整定与逻辑判断的继电保护方法已难以满足智能化与精细化运维需求。本文基于大数据分析技术,研究继电保护故障诊断与预测模型的构建方法。通过对电流、电压、相角、开关状态等多源监测数据进行采集与清洗,建立特征数据库,利用机器学习与深度学习算法实现故障特征提取与模式识别。研究提出基于时序特征融合与智能算法优化的故障诊断流程,并在实际变电站运行数据上进行了验证。结果表明,该方法在故障识别准确率、响应时间与预警能力方面均优于传统算法。研究为继电保护智能化和电网安全运行提供了理论依据与技术支持。

关键词

大数据; 继电保护; 故障诊断; 故障预测; 机器学习; 电力系统

1 引言

继电保护是电力系统安全防御的关键技术环节,其主要功能在于当电气设备或线路出现故障时,能够快速识别并隔离故障部分,防止事故扩展。然而,随着电网结构日趋复杂、分布式电源与新能源接入比例不断提高,传统继电保护装置面临着定值配置困难、误动拒动频发和数据利用率低等问题。传统保护装置依赖人工整定与经验判断,难以适应实时性和动态性的电网运行环境。近年来,大数据技术的发展为继电保护智能化提供了新的思路。通过对电网运行数据进

行深度挖掘和关联分析,可以识别故障特征、预测潜在隐患,实现从“事后保护”到“事前预警”的转变。本文在分析传统保护机制局限性的基础上,提出基于大数据的继电保护故障诊断与预测方法,从数据采集、特征提取、算法建模及系统验证等方面进行系统研究,旨在构建具有自学习、自适应能力的智能保护体系。

2 继电保护故障诊断研究现状与发展趋势

2.1 传统继电保护方法的局限性

传统继电保护建立在定值整定与逻辑判断的基础上,通过电流、电压或阻抗突变实现动作判断。这种方法在早期单一电源、辐射型电网环境下表现出较高可靠性,但随着现代电网向多电源互联、双向潮流与复杂拓扑演化,其灵敏性、

【作者简介】施雨婷(2000-),女,中国浙江杭州人,本科,助理工程师,从事电气自动化研究。

选择性及速动性显著下降。固定定值的保护策略难以适应系统运行状态的实时变化，尤其在新能源接入及负荷波动频繁时，常出现误动、拒动及越级跳闸等现象。传统方法对暂态特征与非工频信息敏感度不足，依赖人工经验调整阈值，无法实现在线自校准。

2.2 大数据技术在电力系统中的应用现状

电网运行过程中会产生来自 SCADA、PMU、DGA（油色谱）、局放监测及运维日志等多源异构数据，其时间精度可达毫秒级、空间范围涵盖从站端到主网的全层级结构。大数据技术通过分布式存储与计算框架（Hadoop、Spark、Flink 等），能够对 TB 级实时数据流进行并行分析与模式提取。国内外研究表明，大数据驱动的智能运维系统已在设备状态评估、负荷预测与故障识别等领域取得突破。例如，基于 PMU 数据的相量异常检测可实时发现系统振荡源；利用数据挖掘与机器学习算法，能识别电缆绝缘退化、变压器局部放电等隐患，实现从静态监测到动态诊断的转变。

2.3 智能化继电保护的发展方向

继电保护的未来发展方向是从“规则驱动”向“数据驱动”转变，从静态判据到动态预测演化。基于大数据、人工智能与云计算的融合框架，智能保护系统将具备自主学习、自校准与自适应功能，实现对不同运行状态的动态整定与在线优化。通过引入机器学习、深度学习与知识图谱技术，系统能够在多维特征空间中识别复杂故障模式，实现从故障检测、隔离到趋势预测的全流程闭环管理。未来保护装置将不再局限于单点逻辑判断，而是形成多层协同的分布式智能体系：边缘节点完成实时分析与快速决策，云端平台承担全局建模与策略优化。同时，数字孪生与仿真技术将为继电保护提供虚实结合的验证环境，提升算法的鲁棒性与可信度。智能化继电保护的核心目标是实现系统级的安全预测与主动防御，使电网从“事后保护”迈向“事前预警”，从被动响应过渡到自适应调控，最终构建高可靠、高感知、高自治的智能电力保护新格局。

3 大数据驱动的继电保护故障诊断体系构建

3.1 继电保护数据采集与特征管理

为支撑智能诊断，需构建覆盖“站端—边缘—中心”的采集与管理体：一次量（I、U、f、相角）与二次状态量（断路器分合、保护压板、GOOSE 报文）按 IEC 61850/IEC 60870 统一接入，并以 GPS/IEEE 1588 实现时钟同步；环境量（温湿度、振动、盐雾）与运维日志纳入同域管理。数据在边缘完成去噪、去尖峰、重采样、时序对齐与缺失插补，中心侧进行归一化、质量标注与标签校核。建立可复用特征库，涵盖时间域（波形突变、相位漂移、零序不平衡）、频域/时频域（谐波序列、WPT 能量、STFT 谱密度）与统计/稳健特征（均值、方差、峰度、MAD 等），并维护元数据与数据血缘以保障追溯与治理合规。

3.2 特征提取与模式识别方法

复杂扰动下，先以 PCA 降维与小波包/EMD 分解实现去噪与本征模态提炼，必要时引入 VMD、谱峭度、循环平稳特征以强化对串扰与间歇故障的刻画；再构建“时频+空间+工况”融合向量输入分类器。算法侧，SVM/RF 作为轻量基线，1D-CNN/CNN-LSTM 用于端到端表征学习；类不平衡用代价敏感学习、Focal Loss 或 SMOTE 处理，输出经温度标定提升置信度可用性。训练采用分层交叉验证与滑窗留出，迁移学习/领域自适应用于季节负荷与接入结构变化场景；评估以 F1、AUC、误动/拒动率与 P95 推理时延综合判定，择优 Stacking 形成稳健集成。

3.3 智能诊断模型的构建流程

整体流程分为输入、特征/表征、判别与输出四层：输入层接收对齐后的 SV/MMS 与环境数据；表征层采用 DCNN 提取局部形态特征，串接 Bi-LSTM 捕获长短期依赖，并以注意力机制突出关键时刻/频带；判别层融合先验规则与 Softmax 概率，实现多故障并行判别与不确定性量化；输出层给出故障类别、置信区间与定位建议，并通过迟滞/投票抑制抖动。上线部署采用“边缘实时推理+云端重训练”的 MLOps 闭环，包含漂移监测、模型热更新与灰度发布；同时集成 SHAP/Grad-CAM 提供可解释性，便于运维校核与策略闭环，确保在多工况下保持高准确、低时延与强鲁棒 [1]。

4 基于大数据的故障预测与预警机制

4.1 预测模型的构建原理

故障预测以长期运行数据为依据，围绕“状态量—健康指数—风险等级—预警阈值”展开建模。线性可解释场景采用 ARIMA/ARIMAX 捕捉趋势与季节项；非线性耦合与工况切换场景引入 GRU/LSTM 或 TFT（Temporal Fusion Transformer）学习跨尺度时序依赖，并以注意力权重提高可解释性。输入向量包含电气量（I、U、P、Q、频率、谐波）、环境量（温湿度、盐雾、风速）、资产特征与历史故障标签，经滑动时间窗与差分、对数功率谱等处理后进入网络。输出一方面为连续型健康指数 HI（0-1），另一方面为分级风险 $R \in \{低、中、高\}$ 。通过贝叶斯更新融合先验失效率，结合代价敏感阈值与误动/漏警损失函数确定报警门限；再以卡尔曼滤波或指数平滑抑制抖动，形成可用于检修决策的稳定预警信号。

4.2 多维数据融合与故障趋势分析

电网故障受电气扰动、气象冲击、地理腐蚀与操作行为等多因子驱动，需开展多模态融合提升判别力。特征层融合中，将时频域特征（小波能量、谐波序列）、统计特征（峰度、偏度）、空间特征（站点经纬度、海拔、盐雾等级）与运维事件编码拼接；决策层融合则对多模型输出（ARIMAX、LSTM、XGBoost）进行加权或 Stacking 集成，权重按验证集 AUC 自适应更新。针对趋势判读，采用时间—风险张量

可视化：横轴为时序、纵轴为资产清单、色阶为 HI 或风险分位，辅以 DBSCAN/OPTICS 聚类识别“异常走廊”，并以变点检测 (BOCPD) 标注突变节点。结合气象再分析数据构建因果图，追溯风暴、高温、覆冰等极端事件与故障峰值的滞后关系，辅助制定季节性巡检与超前备品策略 [2]。

4.3 智能预警与在线监测系统设计

在线监测体系采用“边缘就地判别+云端协同学习”架构。站端通过 IEC 61850 采集 SV/MMS/GOOSE 数据，边缘推理引擎以轻量化 LSTM 或 ONNX 模型实时计算 HI 与风险等级，满足亚秒级响应；云端完成模型重训练、阈值校准与全网对比评估。预警策略分三级：黄色提示（趋势偏离）、橙色告警（风险越阈且持续）、红色联动（多源一致且存在地理相关性），并触发定位与处置剧本。系统提供根因辅助模块，基于注意力热力图与 Shapley 值解释关键特征贡献；同时配置抖动抑制、迟滞控制与多报合并，降低误报。安全侧启用零信任接入、模型签名与审计追踪；运维侧建立 MLOps 流程与漂移监测，实现灰度发布与在线回滚。跨站联动通过云编排下发限值修订与试验命令，支撑远程维护与策略闭环，显著提升继电保护的响应速度与自主防御能力 [3]。

5 典型应用与系统验证分析

5.1 案例选取与实验设计

为验证模型有效性，选取某地区 110 kV 变电站两年期继电保护全量数据开展研究，涵盖三相电流/电压、相角差、频率漂移、断路器分合闸状态及环境量等约 10 万组样本。经去噪、插补、对齐与 Z-score 归一化后形成 8.2 万组有效样本，按 8 : 2 划分训练/测试集，并以近端留出法构造滚动时间窗 (200 ms) 样本。采用 PCA+ 小波包提取时频特征，融合 EMD 残余量与工况标签；模型选用 CNN-BiLSTM 并行结构，损失函数采用加权交叉熵以缓解类别不平衡，超参由贝叶斯优化确定。基线包含阈值法、SVM、RF 与 1D-CNN，评价指标涵盖 Accuracy、F1、AUC、平均告警提前量及 P95 推理时延；同时设计 5 折交叉验证、消融实验与噪声/缺失鲁棒性测试。

5.2 实验结果与性能分析

测试集结果显示，所提模型故障识别准确率 98.6%，较阈值法提升约 12%，较 SVM/RF 分别提升 6.3% 与 4.8%；F1 为 98.1%，AUC 达 0.996，误动率降至 0.7%。在 NVIDIA 边缘模块上单条样本端到端推理时延 P95 为 0.30 s，满足实时性要求。预测模块以 BiLSTM-Attention 建模健康指数，典型场景下对电压异常、绝缘老化的平均告警提前量

约 2 h，预警准确率 93%+，漏警率 <4%。加性高斯噪声 (SNR = 15 dB) 与 10% 随机缺失条件下性能下降不超过 2 个百分点；跨季节与负荷跃迁的域外测试中保持 >96% 准确率。消融分析表明，EMD 残余与时频融合对 F1 贡献分别为 +1.4% 与 +2.1%，证明特征融合与时序建模的协同增益 [4]。

5.3 系统集成与工程应用前景

工程落地采用“边缘计算+云中心”架构：站端 IED/合并单元经 IEC 61850 (MMS/GOOSE、SV) 接入边缘网关完成本地推理与毫秒级联锁，云端进行模型训练、数字孪生仿真与全网风控；通过与 SCADA/EMS-DMS 北向接口对接，实现故障追溯、在线整定与策略闭环。安全方面引入零信任访问、模型签名与白名单执行，满足分级防护与合规审计。运维侧构建 MLOps 流程与漂移监测，支持热更新与灰度发布，降低停机风险。应用场景覆盖输变电、配网自动化与新能源并网保护，可作为传统保护的智能冗余层提升选择性与灵敏度。经济评估显示，基于提前告警的检修优化可减少约 20% 非计划停运时长，提升设备可用度与供电可靠性，为智慧电网建设与保护自适应演进提供可扩展路径 [5]。

6 结语

基于大数据的继电保护故障诊断与预测研究，是实现电网智能化与自适应运行的重要方向。研究通过建立多源数据采集体系、引入深度学习算法与构建智能预警平台，实现了故障识别、趋势预测与动态响应的融合。结果表明，该方法能显著提升继电保护系统的准确性与实时性，降低误动与拒动率，推动传统保护体系向智能化、数据驱动型模式转型。未来研究可在多目标优化、在线学习算法及边缘计算部署方面进一步深化，实现继电保护从“被动响应”向“主动防御”的跃升。随着大数据与人工智能技术的持续发展，基于数据智能的继电保护将成为电力系统安全运行的重要保障，为构建安全、高效、可靠的智慧电网提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王荣印,彭先.基于大数据的继电保护装置故障诊断技术研究[J].电气技术与经济,2025,(01):391-393.
- [2] 张瑞程,张仁尊,王书源,等.基于大数据的电力系统继电保护自动化技术的研究[J].自动化应用,2024,65(02):36-38.
- [3] 孙雅丽,李君妍,李孟特.人工智能技术在变电站继电保护系统故障诊断中的应用研究[J].自动化应用,2025,66(S1):218-221.
- [4] 张瑞程,张仁尊,王书源,等.基于大数据的电力系统继电保护自动化技术的研究[J].自动化应用,2024,65(02):36-38.
- [5] 罗明飞,汤瑞,秦正升,等.基于信息技术的继电保护与故障诊断分析[J].集成电路应用,2024,41(03):256-257.