

电力系统继电保护隐藏故障诊断研究

吕 玮 王 蒙

内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要: 继电保护设备长期运行中积累的细微偏差可逐步演化为隐藏故障, 虽不直接干扰当前功能, 却持续压缩装置的动作精度与容错裕度。本文围绕隐藏故障的形成机理展开分析, 探讨了故障在多模块间的传递特征与可观测性问题, 并构建了状态空间描述、多源信号特征提取、因果推理及图论建模等理论框架。在此基础上, 梳理了深度学习微弱信号识别、多装置协同关联分析、时序隐藏模式挖掘及误动拒动特征分离等关键技术, 同时提出了面向工程应用的在线监测体系架构与知识-数据融合诊断策略, 为隐藏故障的早期辨识与精准定位提供了系统性的理论与技术支撑。

关键词: 继电保护; 隐藏故障; 状态空间建模; 深度学习诊断; 多源信息融合

引言: 电力电网持续运行状态下, 继电保护设备承受负荷波动与元器件老化的双重作用, 细微运行偏差不断积存并缓慢改变装置响应特性, 构成隐藏故障萌生的土壤。这类故障不会立即引发设备功能失效, 却持续压缩保护系统的稳定运行空间, 一旦遭遇外部扰动便可能转化为误动或拒动。现有诊断手段对微弱隐性异常的感知能力有限, 亟需从形成机理、特征提取、诊断模型到系统实现进行系统化探索, 突破隐藏故障早期辨识的技术瓶颈。

1 继电保护隐藏故障的形成机理与特征分析

1.1 隐藏故障的产生条件与演化路径

电力电网长期处于动态运行状态, 继电保护设备持续承受负荷波动、环境干扰与元器件自然老化等状态变化, 诸多细微运行偏差会在设备内部不断积存^[1]。各类运行偏差不会立刻引发设备功能失效, 仅会缓慢改变装置运行阈值与响应特性, 构成隐藏故障萌生的基础条件。微小偏差经过长期积累, 会逐步突破设备正常运行的容错范围, 推动设备运行状态发生偏移。状态偏移会持续深化, 从单一功能模块的性能异动逐步发展为整体运行状态的异常, 完成隐藏故障的完整演化进程。

1.2 隐藏故障与显性故障的区别与关联

继电保护运行体系内的两类故障状态具备不同的运行表现与影响特性。显性故障会直接引发设备动作异常, 干扰电网正常运行秩序, 异动状态能够被常规监测体系快速捕捉识别。隐藏故障长期保持潜伏状态, 不会干扰设备当下基础运行功能, 仅对装置潜在动作精度与容错能力产生负面影响。两类故障状态存在紧密的内在联系, 长期潜伏的隐性异动会持续压缩设备运行稳定空间。电网遭遇负荷波动或外部扰动时, 潜伏的异常状态会发生转化, 演变为直观的显性故障, 造成继电保护误

动或拒动问题。

1.3 隐藏故障在保护系统中的传递链

继电保护设备具备多模块联动运行特性, 局部模块产生的细微异常不会局限于单一区域。数据采集环节产生的参数偏移, 会随着运行数据传输过程进入逻辑运算环节, 造成运算判定标准出现偏差。运算参数的异动会持续传导至执行输出环节, 逐步打乱设备正常动作逻辑。多层级的异常传递会形成完整的故障传播链路, 逐步扩大异常影响范围, 持续弱化整套保护装置的运行可靠性, 干扰区域电网保护配置的适配能力。

1.4 隐藏故障的可观测性分析

隐藏故障的潜伏特性让异常信号具备极强的隐蔽性, 初期参数变动幅度较为微弱, 和电网正常运行波动高度相似, 常规监测手段难以完成有效甄别。故障演化的不同阶段对应不同的信号特征, 故障积累初期的参数异动辨识度极低。随着异常持续叠加, 设备运行参数的偏移幅度逐步扩大, 异常信号的独特性逐步凸显。针对性挖掘细微运行数据的异动规律, 深度区分正常波动与故障异动的差异, 可以有效提升隐藏故障的识别可行性, 为故障精准研判提供基础支撑。

2 隐藏故障诊断的理论基础与数学建模

2.1 保护装置行为异常的状态空间描述

继电保护装置的运行行为可通过多维状态变量完成整体刻画, 运行全过程能够对应连续变化的状态空间^[2]。依托状态空间理论可以对装置正常运行与异常偏移行为进行系统性表征, 将装置运行参数、动作特性与运行约束条件纳入统一分析体系。通过量化装置内部运行状态的动态变化, 能够精准刻画各类潜伏异常引发的行为偏移。状态空间的维度划分可以适配保护装置多场景运行模式, 实现对装置细微行为异动的精准表征, 为异常状

态的量化分析提供严谨的理论支撑。

2.2 多源信号耦合下的故障特征提取模型

电力系统运行过程中会生成海量差异化运行信号,单一信号维度难以全面反映隐藏故障的内在特征。各类监测信号存在相互交织、相互影响的耦合关系,单一维度的特征挖掘无法捕捉深层异常规律。搭建适配多源信号耦合特性的提取模型,能够整合电气量信号与设备运行状态信号的深层关联信息。模型可以剥离正常运行信号的干扰成分,筛选出具备故障表征价值的深层特征,实现对微弱隐性故障特征的有效提纯,适配复杂电网运行环境下的特征挖掘需求。

2.3 隐藏故障的因果推理框架

继电保护隐藏故障的演化与传播具备明确的因果逻辑,异常诱因与运行状态偏移存在对应关联关系。构建系统化的因果推理框架,可以梳理故障诱发因素与装置异常行为之间的内在关联。框架能够依托电网运行的内在规律,厘清异常状态生成与演化的逻辑脉络,摆脱传统状态识别的片面性。通过对故障成因与故障表现的逻辑梳理,实现从表层信号异常到深层故障本源的推导,为隐藏故障的精准判定提供完整的逻辑体系。

2.4 故障传播路径的图论建模方法

继电保护系统各功能单元存在紧密的联动关联,故障传播具备清晰的路径特征与网络属性。图论建模可以将保护系统的功能单元抽象为对应节点,单元之间的联动关联转化为拓扑连接关系。依托搭建的拓扑模型,可以直观刻画隐藏故障在系统内部的扩散走向与覆盖范围。通过量化拓扑节点的关联强度,能够精准分析故障传播的影响程度与扩散规律,实现对隐藏故障传播特性的系统化数学表征,完善故障诊断的建模体系。

3 隐藏故障诊断的关键技术与方法

3.1 基于深度学习的微弱异常信号识别

电力系统运行场景具备极强的复杂性,电网运行过程中产生的各类噪声数据会覆盖继电保护设备的细微运行异动。异常信号幅值普遍处于较低水平,变化趋势较为平缓,常规信号筛查方式难以完成有效提取,大幅增加隐藏故障前期识别的工作难度^[3]。深度学习架构拥有出色的非线性特征学习与深层数据挖掘能力,能够自主适配电网运行数据的复杂分布规律。依托多层次网络结构对海量运行数据开展特征学习,持续优化数据特征提取权重,强化模型对低幅值异常信息的感知能力。网络结构可以逐层完成噪声过滤与有效信息提纯,深度挖掘常规监测技术无法捕捉的细微信号异动。整套技术模式可以精准捕捉设备潜伏运行阶段的微弱异常特征,高效适

配继电保护隐藏故障早期辨识的技术需求,为前置化故障研判提供可靠的数据支撑。

3.2 多保护装置协同信息的关联分析技术

单一保护设备采集的运行数据覆盖范围有限,仅能反映局部设备的运行状态,无法完整体现区域保护网络的整体运行态势。独立数据研判模式存在明显的片面性,难以精准识别跨设备、跨区域的隐性运行异常。多保护装置协同信息关联分析技术依托区域电网的拓扑结构与保护配置逻辑,统筹汇聚不同位置保护设备的运行参数、状态信息与动作记录。技术模式深度挖掘多组设备数据之间的内在联动规律,突破单一设备数据研判形成的信息壁垒。

3.3 时序数据中隐蔽模式的挖掘方法

继电保护设备长期持续运行,生成的监测数据具备连续时序属性,数据变化状态可以完整记录设备运行的动态演变过程。隐藏故障的演化进程较为缓慢,不会产生突发性的数据波动,仅会让时序数据出现持续性的细微渐变。这类隐蔽变化模式和电网正常负荷波动特征高度相似,传统静态数据分析手段无法实现有效区分。时序数据隐蔽模式挖掘方法聚焦监测数据的动态演变特性,重点研判数据长期渐变的发展规律。通过精细化拆解时序数据的演变趋势,细化电网正常运行波动与故障隐性演化的差异化特征,精准甄别设备运行的异常渐变规律。该类挖掘方式可以精准锁定故障潜伏阶段的微弱演变特征,实现对隐藏故障早期运行状态的有效甄别。

3.4 保护逻辑误动与拒动的特征分离技术

继电保护系统出现的误动与拒动隐患均由内部隐性异常逐步演化生成,两类异常的生成源头存在相似性,对应的监测信号特征存在大面积重叠。信号特征的高度混杂会干扰故障研判逻辑,极易造成故障类型的错判与漏判。保护逻辑误动与拒动特征分离技术深度拆解两类异常的演化机制,细化不同异常工况下的信号表现差异。技术逻辑可以对混杂交织的监测信号进行分层拆解与精准筛选,梳理适配两类异常的专属特征维度。通过界定不同异常状态的特征边界,清晰区分误动隐患与拒动隐患的信号属性。精细化的特征区分体系可以精准定位保护逻辑的具体运行偏差,明确隐性故障的故障类型与影响机制,为继电保护隐藏故障的精准研判与针对性处置提供完善的技术支撑。

4 隐藏故障诊断的系统架构与实现路径

4.1 面向隐藏故障的在线监测体系架构

继电保护隐藏故障具备潜伏性与渐进性的运行特征,传统监测架构多聚焦显性故障的异动捕捉,难以适

配隐性异常的常态化监测需求^[4]。专属化的在线监测体系依托电网运行全维度感知理念搭建,适配隐藏故障缓慢演化、特征微弱的运行特点。架构搭建围绕数据感知、特征解析、状态研判的完整链路展开,整合电网运行过程中的连续监测数据资源。多层级的架构模块各司其职且深度联动,覆盖继电保护设备日常运行的全时段状态监控。监测体系摒弃传统定点式数据采集模式,采用持续性动态感知方式,捕捉设备运行过程中的细微状态偏移。架构内部通过分层筛选与逐级解析的运行模式,筛选具备故障研判价值的有效信息,提升潜伏性异常状态的感知灵敏度,为后续诊断工作提供稳定全面的数据来源。

4.2 保护装置与调度端的信息交互机制

电力系统继电保护诊断工作的高效推进,依托各层级设备与调度平台的高效信息流转。保护装置部署于电网各节点,负责现场运行状态数据的实时采集与初步整理。调度端承担全网数据汇总、统筹分析与状态管控的核心职能,两端数据流转的通畅程度直接决定故障诊断效率。科学的信息交互机制能够规范数据传输的标准形式,统一各类运行数据的传输格式与传输时序。机制搭建可以规避数据错乱、信息缺失等问题,保障现场采集的运行数据完整上传至调度平台。调度端梳理整合的状态指令也可高效下发至各类保护设备,实现感知数据与管控指令的双向流通,维系诊断链路的数据传输稳定性。

4.3 诊断流程中的知识驱动与数据驱动融合策略

单一的诊断驱动模式存在明显应用短板,纯数据驱动模式缺乏电力系统运行规律的理论支撑,容易受噪声数据干扰出现研判偏差。纯知识驱动模式依赖既定运行经验,难以适配电网动态变化的复杂运行工况,无法捕捉新型隐性异常特征。两类驱动模式的深度融合可以互补各自应用短板,依托电力系统长期运行积累的专业知识,规范数据挖掘与特征分析的核心方向。利用海量实测运行数据完成知识体系的动态更新与细化补充,打破传统经验固化带来的诊断局限^[5]。融合策略贯穿故障特征提取、状态分析、异常判定的全流程,让诊断过程既贴合电力系统运行内在规律,又具备动态适配复杂工况的能力,提升诊断体系的适配性与精准度。

4.4 面向工程应用的诊断系统部署方案

故障诊断技术的理论研究需要依托落地部署实现工程价值,合理的系统部署方案能够适配电网实际运行场景,保障诊断体系稳定投入常态化运维工作。部署方案结合电网拓扑结构、保护设备分布格局与现场运维需求进行设计,兼顾系统运行稳定性与后期拓展空间。方案针对硬件布设、软件适配、系统对接等多项内容进行细化规划,实现诊断系统与现有电网运维平台的无缝衔接。部署过程遵循分层落地、逐步适配的实施思路,优先完成核心监测与诊断模块的布设调试,再逐步完善辅助功能的配套建设。科学化的部署规划可以降低系统接入对原有电网运行体系的干扰,保障诊断系统长期稳定运行,推动隐藏故障诊断技术从理论研究转向常态化工程应用。

结束语

继电保护隐藏故障的诊断是一项涉及机理分析、模型构建与工程落地的系统性工作。从状态空间描述到图论建模,从深度学习信号识别到多装置协同分析,各环节相互衔接、层层递进,共同构成完整的诊断技术链条。知识驱动与数据驱动的深度融合有效弥补了单一模式的应用短板,在线监测体系与科学部署方案则为技术落地提供了切实可行的工程路径。隐藏故障诊断能力的持续提升,将为电力系统保护配置的可靠性与电网运行安全性提供坚实保障。

参考文献

- [1]许飞.电力系统继电保护隐藏故障诊断分析[J].通讯世界,2023,30(11):121-123.
- [2]赵祯.电力系统继电保护隐藏故障诊断方法与系统重构研究[J].电力设备管理,2023(5):201-203.
- [3]徐婷婷.电力系统继电保护隐藏故障诊断方法与系统重构研究[J].电气技术与经济,2023(8):32-34.
- [4]朱婧瑶.智能变电站继电保护隐藏故障诊断与系统重构方法[J].科学与信息化,2022(21):131-133.
- [5]鲁楠.电力系统数据采集接口电路隐藏故障诊断方法[J].中国集成电路,2024,33(3):78-81.