

变电站直流系统故障诊断与快速隔离技术研究

李旭东

国网内蒙古超特高压公司胜利变电工区 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要: 变电站直流系统是二次设备稳定运行的关键。直流系统由充电装置、蓄电池组等构成,故障类型多样。本文详细阐述了基于电气量分析、信号处理、智能算法的故障诊断核心技术及其适用场景,介绍了快速隔离技术、智能隔离应用及故障诊断与快速隔离协同机制,包括时序协同逻辑、信息交互机制等。这些研究有助于提升变电站直流系统故障处理能力,保障电力系统稳定运行。

关键词: 变电站直流系统;故障诊断;快速隔离;协同机制

引言: 在电力系统智能化、规模化发展的当下,变电站作为关键枢纽,其直流系统的稳定运行至关重要。直流系统为二次设备提供能量保障,一旦出现故障,可能引发连锁反应,威胁整个电力系统的安全。然而,直流系统故障类型多样、特征复杂,传统诊断与隔离方法面临挑战。在此背景下,深入探究变电站直流系统故障诊断与快速隔离技术,实现精准诊断与高效隔离,成为保障电力系统稳定运行、减少停电损失的迫切需求。

1 变电站直流系统核心构成与故障类型

1.1 直流系统核心构成及功能关联

变电站直流系统作为二次设备稳定运行的能量基石,其构成模块间存在紧密的功能耦合关系。充电装置与蓄电池组构成双冗余电源架构,充电装置采用高频开关电源技术,通过整流-滤波-稳压环节将交流电转换为标称电压的直流电,为负载提供持续电能的同时对蓄电池组进行浮充/均充管理^[1]。蓄电池组多采用阀控式铅酸蓄电池阵列,串联提升输出电压,交流失电或充电装置故障时自动放电,维持系统不低于8小时供电。馈线网络采用辐射状与环状混合拓扑,通过直流空气开关、熔断器等分级保护元件分配电能,直流空气开关额定电流一般选10—630A,熔断器选2—400A。保护测控回路通过采样元件获取电气量信息,经微机保护装置处理后输出跳闸信号,动作逻辑遵循继电保护四性要求。监控系统基于分层分布式架构,通过通信协议实现数据采集与指令下发,信号传输链路含模拟量输入等模块,各模块间用光电隔离技术提升抗干扰能力,耐压值一般达2—5kV。

1.2 直流系统故障核心类型界定

电源侧故障表现为充电装置输出电压异常波动或蓄电池组容量衰减,前者可能由功率器件老化等引发,输出电压波动超标,电压偏差 $\pm 5\%$ 可判定异常;后者与电化学过程相关,容量衰减至额定80%以下可认为故障。馈

线侧故障涵盖短路、接地、断线三类,短路电流达正常5—10倍;接地电阻小于10k Ω 可认为接地;断线致负载失电。控制侧故障涉及信号传输畸变与保护回路误动,多由电磁干扰等导致,电磁干扰超过10V/m可能引发问题。复合型故障多故障点耦合,如蓄电池组内部短路引发充电装置过流保护动作等,故障发展快,时间一般在0.1—1s内。

2 变电站直流系统故障诊断核心技术

2.1 基于电气量分析的诊断技术

电气量分析通过解析电压、电流等基础参数的动态变化实现故障识别。电压与电流信号特征提取聚焦于幅值突变、相位偏移及波形畸变等关键指标,采用傅里叶变换提取稳态分量,结合短时能量法捕捉瞬态特征,构建反映故障类型的特征向量^[2]。阻抗变化监测通过注入特定频率的测试信号,一般选取100—1000Hz的测试频率,分析直流网络等效阻抗的频域分布,结合行波传播时延实现故障支路定位,尤其适用于高阻接地故障的精准判别,高阻接地故障的接地电阻一般在10k Ω —100k Ω 范围。谐波与暂态信号分析技术则利用小波变换对非平稳信号进行多尺度分解,提取故障电弧产生的高频谐波簇或短路引发的低频振荡,通过能量分布差异区分故障类型,为保护装置动作提供判据。

2.2 基于信号处理的诊断技术

信号处理技术通过优化原始数据质量提升诊断可靠性。滤波去噪环节采用自适应滤波算法,根据噪声频谱特性动态调整滤波器参数,有效抑制工频干扰与随机噪声,工频干扰频率为50Hz。有效信号筛选通过设定动态阈值,结合滑动窗口机制提取持续时长超过阈值的异常信号,避免瞬态干扰误判,滑动窗口长度一般选取10—100个采样点。信号阈值判断机制引入趋势分析,通过计算信号一阶导数或二阶导数,识别缓慢发展的绝缘劣化

故障。多源信号融合诊断逻辑整合电压、电流、温度等多维度数据,采用加权投票法或D-S证据理论融合不同传感器信息,降低单一信号源的误报风险,提升复杂故障场景下的诊断鲁棒性,传感器数量一般不少于3个。

2.3 基于智能算法的诊断技术

智能算法通过模拟人类认知过程实现故障智能识别。算法核心原理涵盖支持向量机、随机森林及深度学习等模型,其中卷积神经网络(CNN)凭借局部感知与权重共享特性,在处理高维时序数据时展现优势。故障特征与算法模型映射关系需通过特征工程优化,将电气量、信号处理结果等转换为算法可识别的结构化输入。诊断精度优化方向包括:引入注意力机制强化关键特征权重,采用迁移学习解决小样本场景下的过拟合问题,结合强化学习动态调整诊断策略,以适应直流系统运行工况的动态变化。

2.4 各类诊断技术的适用场景与局限性

电气量分析技术适用于故障特征明显的场景,但对高阻接地等弱故障灵敏度不足;信号处理技术依赖阈值设定,难以处理参数缓慢漂移的故障;智能算法需大量标注数据训练,且模型可解释性较弱。实际工程中常采用分层诊断架构,底层基于电气量实现快速初判,中层通过信号处理细化故障类型,上层利用智能算法进行综合决策,以兼顾诊断效率与准确性,分层诊断架构中各层处理时间一般分别控制在1-10ms、10-100ms、100-1000ms以内。

3 变电站直流系统故障快速隔离技术

3.1 隔离装置核心技术与工作机制

快速熔断器与直流断路器是直流系统故障隔离的核心执行元件。快速熔断器通过熔体在过流时迅速熔断实现物理隔离,其技术特性聚焦于熔断速度与分断能力,采用银合金或铜镀银材料提升耐电弧性能,并通过砂填充结构加速熔体气化过程,缩短动作时间至毫秒级^[3]。直流断路器则通过电力电子器件或机械开关实现可控分断,其技术特性涵盖双向分断能力、低过电压水平及抗电磁干扰设计,采用混合式结构结合机械触点与固态开关,兼顾分断速度与通流容量。选择性跳闸逻辑基于电流幅值与时间梯度,通过设定不同保护段的延时时间,确保故障点最近的断路器优先动作,避免越级跳闸扩大停电范围。分段隔离逻辑根据直流网络拓扑结构,将母线划分为多个保护段,通过方向性保护算法识别故障传播方向,实现故障支路的精准切除。隔离装置动作时序协同控制通过中央控制单元统一协调,采用时间同步技术确保各断路器动作时差小于系统时间常数,防止因动作时序错

乱引发二次故障。

3.2 故障隔离策略设计

按故障类型划分的隔离逻辑针对不同故障特征制定差异化策略:短路故障采用速断保护,通过检测电流突变率触发断路器分闸;接地故障通过注入低频信号或测量零序电压定位故障支路;断线故障则通过监测负载电压异常进行隔离。最小停电范围优化策略通过构建直流网络数学模型,结合图论中的最小割集算法,计算故障隔离所需断开的最小支路集合,同时利用分布式电源的孤岛运行能力维持非故障区域供电。上下级隔离装置联动机制通过通信协议实现状态共享,当下级断路器拒动时,上级断路器延时后扩大隔离范围,并通过闭锁信号防止下级装置误合闸,形成多级保护配合体系。

3.3 智能隔离技术应用

基于诊断结果的自动隔离触发机制将故障诊断系统与保护装置深度融合,当诊断模块确认故障类型与位置后,直接向对应断路器发送分闸指令,缩短决策链路时间,决策链路时间一般控制在10-100ms内。远程控制与本地手动隔离协同技术通过双通道设计实现操作冗余,远程控制采用加密通信协议确保指令可靠性,本地手动隔离通过机械闭锁装置防止误操作,二者通过优先级逻辑实现无缝切换,优先级逻辑切换时间一般在1-10ms内。隔离后的系统重构技术通过拓扑分析算法评估剩余网络的可行性,自动调整馈线连接方式或投入备用电源,恢复非故障区域供电,并通过自适应保护整定技术重新计算保护参数,适应重构后的网络结构,保护参数重新计算时间一般在100-1000ms内。

4 故障诊断与快速隔离协同机制

4.1 诊断与隔离的时序协同逻辑

故障诊断与隔离的时序协同需兼顾响应速度与动作准确性。诊断环节通过实时监测电气量、信号特征及智能算法分析,在检测到故障特征后快速生成诊断结论,并标注故障位置与类型,诊断时间一般在10-100ms内^[4]。隔离环节根据诊断结果启动动作流程,采用分级延时策略,对于严重故障如直流短路,诊断系统立即触发隔离装置分闸指令,缩短故障持续时间,分闸指令触发时间一般在1-10ms内;对于发展性故障如绝缘劣化,诊断系统先发出预警信号,待故障特征进一步明确后再执行隔离操作,预警信号发出至隔离操作执行时间一般在100-1000ms内。时序协同通过时间窗口机制实现,诊断系统在确认故障后开放隔离指令传输通道,开放时间窗口一般在10-100ms内,隔离装置在接收到有效指令后启动分闸动作,二者通过时间戳校准确保动作时序匹配,避免

因时序错乱导致故障范围扩大,时间戳校准精度一般在0.1-1ms内。

4.2 信息交互与指令传输机制

信息交互采用分层架构,底层传感器将电压、电流等原始数据上传至诊断单元,上传周期一般在1-10ms,诊断单元完成特征提取与故障定位后,将结构化信息通过高速通信总线传输至隔离控制单元,通信总线传输速率一般不低于1Mbps。指令传输机制基于优先级编码设计,紧急隔离指令采用专用通道传输,普通操作指令通过共享通道传输,确保关键指令的实时性,紧急隔离指令传输时间一般在1-10ms,普通操作指令传输时间一般在10-100ms。通信协议采用冗余编码与校验机制,通过CRC校验、前向纠错等技术提升数据传输可靠性,防止因通信干扰导致指令误码,CRC校验位数一般选取16-32位。隔离控制单元在接收到指令后,通过身份认证与完整性校验确认指令有效性,避免非法指令触发误动作,身份认证与完整性校验时间一般在1-10ms内。

4.3 协同过程中的干扰抑制技术

干扰抑制聚焦于电磁干扰与信号噪声的双重治理。电磁干扰抑制通过优化设备布局与屏蔽设计实现,诊断单元与隔离装置采用金属外壳屏蔽,通信线缆采用双绞线或光纤传输,降低空间电磁场耦合。信号噪声抑制采用自适应滤波算法,根据噪声频谱特性动态调整滤波参数,结合小波阈值去噪技术消除高频干扰。对于瞬态干扰如雷击过电压,通过在诊断回路中增加瞬态电压抑制器(TVS)钳位电压,防止干扰信号进入诊断系统。隔离装置动作时产生的电弧能量通过灭弧室设计快速消散,避免电弧重燃引发二次干扰。

4.4 复杂故障下的协同策略优化

复杂故障场景下协同策略需动态调整以适应故障演

化特征。对于多故障点并发情况,诊断系统采用广域测量技术构建直流网络全局模型,通过拓扑分析识别故障传播路径,优先隔离对系统稳定性影响最大的故障支路,一般优先隔离短路故障支路。当诊断结果存在不确定性时,隔离策略转为保守模式,通过分段隔离逐步缩小故障范围,一般将故障范围缩小至1-3个保护段内,同时启动备用电源维持关键负载供电。协同策略优化引入强化学习机制,根据历史故障数据训练动作策略模型,历史故障数据数量一般不少于100条,在故障发生时自动选择最优隔离路径,并通过在线学习持续优化决策逻辑,提升复杂故障场景下的协同效率,在线学习迭代次数一般不少于100次。

结束语

变电站直流系统故障诊断与快速隔离技术的研究取得了阶段性成果。通过多种诊断技术结合,可精准识别故障类型与位置;快速隔离技术及智能应用能及时切断故障,保障系统安全。故障诊断与快速隔离协同机制,进一步提升了系统应对故障的能力。持续优化相关技术,有助于更好地应对复杂多变的故障场景,保障变电站直流系统长期稳定运行,为电力系统可靠供电提供坚实支撑。

参考文献

- [1]韩伟,毛双庆.变电站直流电源系统故障诊断平台设计与应用[J].自动化应用,2025,66(21):197-199.
- [2]杜思宇,张锋,王雪,等.变电站双电源直流系统的隐性故障诊断方法研究[J].自动化应用,2025,66(10):200-202,205.
- [3]李强,陈潜,武霁阳,等.基于集成学习的高压直流输电系统故障诊断[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):168-178.
- [4]吴强,朱姣,陈川刚,等.站用直流电源系统故障危害分析及应对措施研究[J].现代科学仪器,2022,39(3):131-135.