

光伏发电直流侧故障类型分类及快速诊断方法的研究

沈伟

华电新能源集团股份有限公司江苏分公司，江苏南京，210028；

摘要：随着全球能源转型加速，光伏发电在电力系统中的渗透率持续攀升，2024年全球光伏累计装机容量突破2.5TW，占全球电力供应比重已超8%。然而，光伏发电系统直流侧（涵盖光伏阵列、直流汇流箱、电缆及逆变器直流接口）受户外复杂工况（高温、高湿、沙尘、雷击）与器件老化影响，故障发生率居高不下，据中国光伏行业协会（CPIA）统计，直流侧故障占系统总故障的60%-70%，年均造成的发电量损失约占总发电量的3%-5%，严重威胁系统运行安全与经济效益。本文针对这一痛点，首先系统剖析直流侧典型故障的形成机理与特征参数，构建“故障位置-故障性质-故障影响范围-故障发展阶段”四维度分类体系；其次深入对比基于电气量分析、智能算法及传感技术的三类诊断方法的技术原理、性能指标（如响应时间、诊断精度、误报率）与工程适用场景；最后结合行业技术趋势，提出融合边缘计算、数字孪生与多源传感的一体化诊断方案，并给出具体技术落地路径，为光伏电站直流侧故障诊断的工程实践提供全面参考。

关键词：光伏发电系统；直流侧故障；故障分类体系；快速诊断技术

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.039

引言

在“双碳”目标驱动下，我国光伏发电装机容量呈爆发式增长，2024年新增装机达128GW，累计装机突破650GW，占全国电力装机总量的23%。光伏发电系统的高效稳定运行是保障能源供应的关键，但直流侧作为能量采集与传输的核心环节，其运行环境与拓扑结构具有显著特殊性：一方面，大型光伏电站直流侧电压等级普遍达到1500V（部分超高压项目达3000V），且组件串并联数量多（单电站组件数量可达数百万块），故障传播路径复杂；另一方面，直流侧设备长期暴露于户外，面临-40℃-60℃的极端温度波动、年均800mm以上的降雨量（多雨地区）及强紫外线照射，器件老化速率加快。

直流侧故障不仅导致发电效率下降，更可能引发严重安全事故。例如，2023年某大型光伏电站因组件热斑未及时发现，引发火灾，造成32块组件烧毁，直接经济损失超50万元；某分布式光伏项目因直流电缆绝缘破损导致接地短路，烧毁2台500kW逆变器，停电时间长达72小时。当前，直流侧故障诊断存在三大核心问题：一是故障分类碎片化，现有研究多聚焦单一故障（如热斑、短路），缺乏对故障发展阶段（萌芽期、发展期、爆发期）的划分，导致诊断缺乏动态适配性；二是诊断方法性能不足，传统阈值法误报率高达15%-20%，难以适应复杂工况；三是诊断与保护协同性差，多数系统仅能实现故障识别，无法联动保护装置快速处置。

因此，开展光伏发电直流侧故障类型分类与快速诊断方法研究，不仅具有重要理论价值，更能为工程实践提供技术支撑，对降低故障损失、提升光伏系统可靠性具有现实意义。本文章节安排如下：第一部分分析直流侧典型故障的机理与特征；第二部分构建四维度故障分类体系；第三部分详细阐述主流诊断方法的技术细节与性能对比；第四部分提出一体化诊断方案与发展路径；第五部分总结全文并展望未来研究方向。

1 光伏发电直流侧典型故障及形成机理

直流侧故障集中于光伏组件、汇流箱、电缆及逆变器直流侧，各环节故障机理与特征差异显著。

1.1 光伏组件故障

光伏组件是能量转换的核心，其故障占直流侧故障总量的35%-40%，主要包括热斑、隐裂、功率衰减及接线盒故障四类。

热斑故障：组件局部遮挡或电池片性能不均导致局部过热（80-150℃），引发功率衰减甚至火灾。

隐裂故障：机械应力导致电池片微裂纹，增加电流阻力，加速组件老化。

功率衰减：光致衰减（投运初期降3%-5%）与老化衰减（年均降0.5%-1%）不可逆。

接线盒故障：端子松动或二极管失效，导致发热或热斑加剧。

1.2 直流汇流箱故障

直流汇流箱负责组件串电流汇流，故障占比约 15%-20%，核心故障包括开关、熔断器与监测模块故障。

开关故障：拒动（机械卡涩、线圈烧毁）导致故障扩大，误动（参数不当、干扰）造成发电损失。

熔断器故障：选型不当引发误熔断或拒熔断，长期运行易氧化发热。

监测模块失效：传感器或线路故障导致数据失真，增加排查难度。

1.3 直流电缆故障

直流电缆用于连接设备，其故障占直流侧故障总量的 20%-25%，主要包括绝缘破损、接头过热与电缆老化。

绝缘破损：敷设划伤、老化开裂引发短路，直流电弧危害大于交流。

接头过热：压接不牢或氧化导致接触电阻增大，形成“过热-老化”恶性循环。

电缆老化：环境因素导致绝缘层失效，机械强度下降易断裂。

1.4 逆变器直流侧故障

逆变器直流侧是能量转换的关键接口，故障占直流侧故障总量的 10%-15%，主要包括电容、功率模块与电压检测故障。

电容故障：高温导致容量衰减、鼓包，影响电压平滑性。

功率模块故障：过电压或散热不良引发器件击穿，续流二极管故障导致过电压或短路。

电压检测故障：传感器或电路故障导致 MPPT 功能异常，保护误动作。

2 光伏发电直流侧故障多维度分类体系

2.1 基于故障位置分类

该维度根据故障发生的设备层级划分，明确故障排查的初始范围，具体分类如下：

组件层故障：分散性强、隐蔽性高，初期影响小。

汇流箱层故障：集中影响多组件串，故障范围较大。

电缆层故障：易传导至上下游设备，排查难度大。

逆变器直流侧层故障：直接导致停机，修复成本高。

2.2 基于故障性质分类

该维度根据故障的电气特征与本质属性划分，为诊

断方法选择提供依据，具体分类如下：

短路故障：电流骤增（5-10 倍额定值），危害最严重，需优先处理。

开路故障：电流中断，影响小于短路，但造成发电损失。

性能退化故障：渐进性、隐蔽性强，需长期数据监测。

误动故障：控制逻辑异常导致保护失效，影响系统可靠性。

2.3 基于故障影响范围分类

该维度根据故障对系统运行的影响程度划分，为故障优先级排序提供依据，具体分类如下：

局部故障：影响单个设备，效率降小于 5%，排查易。

区域故障：影响多组件串或区域设备，效率降 5%-30%。

系统故障：导致整体或核心设备瘫痪，效率降超 30%，易引发安全事故。

3 光伏发电直流侧故障快速诊断方法

3.1 基于电气量分析的诊断方法

阈值比较法：对比实时电气量与预设阈值，响应快（毫秒级）、易实现，但误报率高，难适应环境变化。

暂态特征分析法：提取故障瞬间电气量突变特征（幅度、持续时间），灵敏度高、抗干扰强，但需高频采集（10kHz 以上），算法复杂。

功率特性分析法：结合环境参数分析功率偏差，适配性能退化故障，但需多参数采集，存在滞后性。

3.2 基于智能算法的诊断方法

机器学习法：通过 SVM、RF 等构建模型，小样本适配好、训练快，但依赖人工特征提取，泛化能力受样本分布影响。

深度学习法：CNN、LSTM 自动提取深层特征，精度高（>95%）、抗复杂故障，但需大量样本、高算力，模型可解释性差。

3.3 基于传感技术的诊断方法

温度传感法：监测关键部位温度，精准识别热斑、过热故障，但成本高，无法识别非温度类故障。

光学传感法：红外热成像或激光荧光实现可视化诊断，隐蔽故障识别强，但设备贵、难实时在线。

局部放电传感法：采集放电信号预警绝缘故障，可早期识别，但信号弱、易受干扰，部署复杂。

4 光伏发电直流侧故障诊断技术的发展趋势

4.1 低功耗与无线化监测

采用 LoRa/NB-IoT 低功耗传感器，结合能量 harvesting 技术，适配分布式电站，降低运维成本。

4.2 高实时性与边缘计算融合

本地部署边缘节点，缩短诊断响应至毫秒级，减少数据传输量，满足紧急故障需求。

4.3 强抗干扰性与环境自适应

光伏直流侧运行环境复杂，外界电磁干扰（如逆变器开关动作产生的 20-100kHz 高频噪声、雷电冲击引发的瞬时过电压）与环境波动（如光照强度日内波动幅度达 $800\text{W}/\text{m}^2$ 、温度日温差超 20°C ），易导致诊断数据失真，引发误报或漏报。未来需从算法与硬件双维度强化抗干扰能力：在算法层面，一方面引入自适应阈值动态调整机制，通过实时采集的光照、温度数据建立环境-阈值关联模型，例如阴天时将组件电流故障阈值从额定值的 80% 下调至 60%，避免因自然电流下降误判热斑；另一方面采用鲁棒性优化算法，如在深度学习模型训练中加入电磁干扰模拟样本（如叠加高频噪声的电流信号），通过对抗训练提升模型对干扰信号的“免疫力”，实验表明该方法可使误报率降低 30% 以上。在硬件层面，优化传感器与数据采集电路的电磁兼容设计，如采用双层屏蔽电缆（内层铝箔屏蔽高频干扰、外层铜网屏蔽低频干扰）、在采集电路中增加共模电感与 TVS 瞬态抑制二极管，削弱外界电磁干扰对信号的影响；同时选用宽温域传感器（工作温度 -40°C – 85°C ），适配高温、严寒等极端环境，确保数据采集稳定性。

4.4 多方法融合与故障预警

单一诊断方法难以覆盖直流侧全类型故障，多方法融合可实现优势互补，同时结合时序数据分析实现早期预警。具体融合路径包括：一是“电气量+传感”协同诊断，例如利用暂态特征分析法快速识别短路故障（响应时间 $<10\text{ms}$ ），同步通过温度传感器定位故障点（如电缆接头过热位置），解决电气量法“能识故障、难定位置”的问题；二是“智能算法+传感”深度融合，如

将局部放电传感器采集的脉冲信号输入随机森林模型，通过算法分析放电幅值、频次的变化趋势，提前 1-3 个月预测电缆绝缘破损风险，避免发展为短路故障；三是“多传感数据融合”，例如融合红外热成像（识别组件隐裂）、温度传感（监测热斑）与电流传感（捕捉功率衰减）数据，构建组件健康度评估模型，实现从“单一故障识别”到“整体健康监测”的升级。此外，故障预警需结合设备全生命周期数据，通过分析历史故障记录与运行参数（如组件功率衰减率、电缆接头温度变化趋势），建立故障风险预测模型，例如当组件功率衰减率连续 3 个月超 1.5% 时，自动触发老化故障预警，提醒运维人员提前更换，减少突发故障损失。

4.5 数字孪生与全生命周期诊断

构建虚拟模型映射物理系统，生成仿真样本优化模型，实现“故障后诊断”向“故障前预测”转变。

5 结论

直流侧故障类型多样，短路与热斑危害最大，多维度分类体系可提升诊断针对性。现有诊断方法各有优劣：电气量法快但误报高，智能算法准但需算力，传感技术精但成本高，单一方法难适配复杂工况。低功耗无线监测、边缘计算、多方法融合等方向，可突破现有局限，保障光伏系统安全稳定运行。未来需通过实验平台验证诊断方法性能，结合实际电站数据优化模型，推动技术从理论走向工程应用。

参考文献

- [1] 徐超群. 城市轨道交通直流侧供电故障快速诊断研究[D]. 上海工程技术大学, 2017.
- [2] 周斌, 朱青云, 姜志成, 等. 光伏电站直流侧多种测试方法的研究[J]. 青海科技, 2024, 31(3): 110-113.
- [3] 熊昌全, 温贤茂, 张宇宁, 等. 光伏组件发电故障诊断方法研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(9): 77-81. DOI: 10.19981/j.cn23-1581/G3. 2023. 09. 019.
- [4] 张希康, 李泽滔. 光伏阵列故障诊断算法研究综述[J]. 智能计算机与应用, 2022(002): 012. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2163. 2022. 02. 028.
- [5] 王博文. 基于深度学习的光伏发电系统故障诊断方法研究[D]. 江南大学, 2024.