

# 光伏逆变器短路故障分析

王 宏

特变电工西安电气科技有限公司 陕西 西安 710119

**摘 要:** 随着光伏发电规模化发展,逆变器作为核心转换设备,其短路故障易导致设备损坏、发电量骤降甚至安全事故,制约系统稳定运行。本文阐述了逆变器的工作原理,明确直流侧与交流侧短路故障的分类及特征;从设备缺陷、环境影响、运维问题三方面剖析故障诱因,评估其对设备、系统及安全的危害;接着对比传统检测方法(过流保护、温度监测等)与先进技术(高频信号分析、AI诊断等),并介绍在线监测系统与分级预警机制的设计;最后从硬件优化、软件改进、系统级防护三方面提出预防与保护策略。研究为光伏逆变器短路故障的精准诊断与有效防控提供技术支持,助力提升光伏发电系统可靠性。

**关键词:** 光伏逆变器; 短路故障; 检测与诊断; 预防与保护

**引言:** 当前光伏发电行业对短路故障的诱因识别不够全面,传统检测方法存在响应慢、误判率高的问题,先进诊断技术的工程应用仍需完善,且缺乏系统性的预防保护体系。基于此,本文以光伏逆变器短路故障为研究对象,系统分析其原理、诱因、检测技术及防护策略,旨在填补现有研究的不足,为光伏电站运维提供科学方案,保障光伏发电系统安全高效运行。

## 1 光伏逆变器工作原理与短路故障分类

### 1.1 光伏逆变器工作原理

光伏逆变器是光伏发电系统的核心转换设备,其核心功能是将光伏阵列输出的直流电(DC)转换为符合电网标准或负载需求的交流电(AC)。工作过程主要分为以下三个关键阶段:(1)直流侧电能采集,逆变器通过MPPT(最大功率点跟踪)控制技术,实时调节光伏阵列的工作电压与电流,确保其始终运行在最大功率输出状态,高效采集太阳能转化的直流电能;(2)电能变换,逆变器内部的功率开关器件在控制电路的驱动下,按照特定的脉冲宽度调制(PWM)策略周期性导通与关断,将采集到的直流电逆变为幅值、频率可调的交流电;(3)交流侧电能输出,经过滤波电路滤除逆变过程中产生的谐波成分,使输出交流电的波形、频率、电压等参数满足电网并网要求或负载用电标准,实现电能的稳定供应或并网传输。

### 1.2 光伏逆变器短路故障的类型与特征分类

光伏逆变器短路故障按发生位置可分为以下不同类型故障。(1)直流侧短路多发生于光伏阵列与逆变器直流输入端之间,包括光伏组串间短路、直流母线短路等。其核心特征为直流母线电压骤降(甚至接近零),直流侧电流急剧升高至额定值数倍,且无明显周期性波

动。(2)交流侧短路常见于逆变器交流输出端与电网/负载连接线路,涵盖三相短路、两相短路及单相接地短路。故障特征表现为交流输出电压瞬间跌落,短路电流随电网电压变化呈现周期性波动,且含有大量谐波成分;若并网开关未及时分断,短路电流会通过并网线路反馈至电网,导致电网电压暂降,同时逆变器内部滤波电感、交流接触器等部件易因过流产生过热现象。

(3)功率模块内部短路属于器件级故障,主要因IGBT、MOSFET等开关器件击穿导致。故障特征为模块两端电压骤降,电流集中于故障器件支路,且伴随局部温度急剧升高;因模块内部电路紧凑,短路易引发器件烧毁、封装破裂,甚至通过热传导蔓延至相邻器件,形成多器件连锁故障,故障电流波形常出现不规则尖峰脉冲<sup>[1]</sup>。

## 2 光伏逆变器短路故障的诱因及危害评估

### 2.1 光伏逆变器短路故障的诱因

光伏逆变器短路故障的诱因主要分为以下设备自身缺陷、外部环境因素与系统设计及运维问题三类。(1)在设备自身方面,核心功率开关器件因制造工艺瑕疵或长期高负荷运行出现性能衰减,导致器件击穿短路;直流母线电容、滤波电感等元件老化失效,也会引发电路阻抗异常,形成短路通路。(2)外部环境因素中,雷击过电压、电网电压骤升骤降等暂态冲击会破坏电路绝缘层,造成线路间非正常导通;高温、高湿环境则加速线路绝缘老化,增加线路短路风险。(3)系统设计与运维层面,电路布线不合理导致线缆绝缘层磨损、接插件松动或接触不良,会形成局部低阻抗回路;运维过程中未及时排查潜在隐患,或违规操作改变电路拓扑,同样会诱发短路故障。

### 2.2 光伏逆变器短路故障的危害评估

光伏逆变器短路故障的危害可从以下设备、系统与安安全三方面评估。(1)对设备而言,短路产生的大电流会瞬间烧毁功率开关器件、熔断器等核心部件,导致逆变器直接报废,增加设备维修与更换成本。(2)对光伏发电系统来说,短路故障会使逆变器停止电能转换,造成系统发电量骤降;若故障未及时隔离,还可能蔓延至光伏阵列,影响其他逆变器正常运行,破坏系统整体稳定性。(3)在安全层面,短路电流引发的高温可能引燃设备绝缘材料,诱发火灾;同时短路导致的电压异常可能对电网造成冲击,干扰电网供电质量,甚至威胁电力运维人员的人身安全<sup>[2]</sup>。

### 3 短路故障的检测与诊断技术

#### 3.1 传统方法

以下传统方法是短路故障防护基础,通过监测关键参数实现初步识别与响应。(1)过流保护为核心,基于短路电流骤升特性,在逆变器直流侧、交流侧及功率模块支路串联电流传感器,实时传数据至控制单元。系统预设电流阈值并设毫秒级延时防误判,电流持续超阈值时,切断功率开关驱动信号,触发断路器分闸或熔断器熔断以隔离故障。(2)温度监测通过热异常间接诊断,短路电流产生的焦耳热致关键部位升温,且温升与故障严重程度正相关。在功率模块、母线接头等部位贴温度传感器,构建多点网络,控制单元对比温度与正常范围及温升速率,超温或温升过快时预警。(3)绝缘电阻测试聚焦直流侧隐患,针对绝缘层破损,在逆变器停机或低功率时,用专用模块向直流侧加500V-1000V高压测电阻。正常时电阻 $\geq 1M\Omega$ ,因老化、受潮等电阻骤降时,判定故障并禁止并网。

#### 3.2 先进技术

以下先进技术突破传统局限,实现精准识别、区分与定位,适配大型电站需求。(1)高频信号分析技术,利用短路致电路信号频谱异常,通过MHz级采集卡获信号,经傅里叶变换等转频域数据,对比差异以判定故障、定位回路与类型。(2)人工智能故障诊断技术,数据准备阶段收集多维度故障样本;训练阶段用支持向量机等算法学特征、优参数;诊断阶段实时接收数据,输出故障类型、概率及置信度,部分模型可预测趋势。(3)红外热成像技术,基于红外辐射与温度的关系,用热像仪捕逆变器内部温度场。正常时温度场均匀,短路时故障部位成“热点”,可固定监测或便携巡检,通过图像识别定位热点。

#### 3.3 在线监测系统与故障预警机制设计

以下系统与机制实现诊断从“被动响应”到“主动

预防”的升级,适配规模化电站运维。(1)在线监测系统以“采集-传输-处理-存储”为链路:采集层布多类型传感器,按电参数 $\geq 1kHz$ 、温度 $\geq 1Hz$ 同步采集;传输层用“本地总线+远程通信”架构,加密校验数据;处理层经边缘节点预处理后,由云端用大数据算法分析;存储层靠分布式数据库存历史数据与故障记录,支撑追溯优化。(2)故障预警机制遵循“分层预警、分级响应”:预警分三级,一级(潜在隐患)发提示,二级(轻微故障)调参数并生成工单,三级(严重故障)触发保护、启冗余回路并通知人员。触发逻辑融合多参数与趋势预测,响应策略差异化且可自学习,优化阈值提升准确性<sup>[3]</sup>。

### 4 短路故障的预防与保护策略

#### 4.1 硬件设计优化

硬件设计优化通过强化核心部件性能、优化电路结构、改善散热条件,构建硬件层面的基础防护体系,具体如下:(1)耐短路器件选型围绕逆变器核心电路部件的短路耐受能力展开,优先选用工业级高可靠性器件。功率开关器件重点关注短路耐受时间、最大浪涌电流、击穿电压,确保短时短路冲击下不易损坏;直流母线电容选择高频低阻类型,提升抗纹波能力与寿命,减少电容失效引发的短路隐患;熔断器、断路器需匹配电路额定电流与短路分断能力,确保故障时可靠分断。选型需平衡参数冗余与成本,避免过度设计浪费或参数不足引发风险。(2)电路冗余设计通过增加关键回路备份结构,提升系统可靠性,降低单一部件失效致短路的概率。功率变换回路采用模块化设计,多功率单元并联运行,单个单元出现短路隐患时,其余单元维持部分输出且便于隔离更换;直流侧与交流侧关键监测节点设冗余传感器,交叉验证电流、电压数据,避免单一传感器故障导致保护误判或漏判;功率模块与母线间增设冗余连接线路,减少单一线路接触不良或绝缘破损引发的短路,保障电路运行连续性。(3)热管理方案通过优化散热结构与方式,控制逆变器运行温度,避免高温加速器件老化、绝缘层失效诱发短路。针对功率模块、母线接头、滤波电感等易发热部件,按发热功率选自然散热、强制风冷或液冷;优化风道设计,确保冷空气均匀流经发热部件,减少局部热点;散热部件表面涂覆高导热涂料,提升热传导效率;合理布局器件与散热结构间距,避免热量积聚,确保额定负载下温度稳定在器件允许范围。

#### 4.2 软件算法改进

软件算法改进通过优化控制逻辑、提升故障响应精

度与速度,实现短路故障的快速识别、精准隔离与动态调整,与硬件保护形成协同,完善整体防护体系,具体如下:(1)智能保护算法结合多维度监测数据构建综合判断模型,提升短路故障识别准确性与响应速度。实时采集直流侧、交流侧电流与电压数据,经滤波、降噪处理后,对比正常工况参数范围与变化趋势,快速捕捉短路特征信号;引入温度参数辅助判断,电流与温度异常同步时提升故障判定置信度,减少电网波动、负载突变导致的误保护。设置分级触发阈值,根据短路严重程度调整保护动作强度与速度,避免过度保护影响系统稳定性。(2)故障隔离策略聚焦短路后的回路隔离,精准切断故障支路,防止故障扩散至其他电路单元。算法预先定义逆变器各回路拓扑与关联关系,故障时快速定位故障回路,向对应开关器件发关断指令,切断故障与正常回路连接;同步控制相邻回路开关状态,避免故障电流通过寄生回路蔓延;故障隔离后锁定故障回路,禁止重新投入运行,直至运维人员排查修复,确保隔离可靠性。(3)自适应控制通过动态调整逆变器运行参数,提升系统对短路隐患的耐受能力,降低故障概率。实时监测系统状态,检测到参数接近安全阈值时,自动调整输出功率、优化PWM调制策略、调整散热风扇转速等,将系统拉回安全区间;根据环境变化,自适应调整保护阈值,避免环境变化致保护参数失配;学习历史运行数据与故障记录,持续优化控制参数,使系统在不同工况下维持稳定运行,减少参数固定引发的故障风险。

#### 4.3 系统级防护

系统级防护从逆变器与外部电网、光伏阵列的交互层面出发,通过抵御外部干扰、强化异常工况防护、提升紧急处置能力,构建全系统的短路故障防护网络,具体如下:(1)防雷接地针对雷击引发的过电压、过电流冲击,建立多级防雷体系。逆变器交流输出端与电网连接处、直流输入端与光伏阵列连接处,分别安装防雷器,通过限压、分流将雷击浪涌电流导入大地,避免浪涌电压击穿器件绝缘层引发短路;优化接地系统设计,确保逆变器外壳、金属支架、防雷器接地端通过低阻抗接地体可靠接地,接地电阻符合行业标准,避免浪涌电流泄放不畅;光伏阵列与逆变器间的直流线路装防雷接

地夹,进一步增强线路防雷能力,降低雷击致短路的概率。(2)过压/过流保护装置作为系统级补充保护手段,与逆变器内部保护协同,提升防护全面性。过压保护装置在直流侧、交流侧分别设置,检测到母线电压或并网电压超额定范围时,快速触发切断输入电源、激活泄压回路等动作,防止过压致器件绝缘损坏引发短路;过流保护装置覆盖主回路与分支回路,除内部电流传感器外,外部线路增设过载保护器、限流电抗器,限制回路最大电流,避免长时间过流引发导线过热、绝缘老化诱发短路;保护装置与逆变器控制系统联动,确保保护动作与内部逻辑协调,避免保护冲突。(3)快速关断技术针对光伏阵列与逆变器间的直流线路,短路时快速切断阵列输出,防止故障扩大。光伏阵列的组串或模块级设快速关断器件,逆变器检测到直流侧短路时,通过通信信号触发器件动作,切断阵列向逆变器的直流输出,快速降低直流侧电压与电流;快速关断器件需具备低导通损耗、高开关速度,确保正常运行不影响电能传输效率,故障时毫秒级完成关断;优化控制逻辑,确保关断指令传输可靠,避免通信中断致关断失效,实现阵列与逆变器快速隔离,减少故障影响范围<sup>[4]</sup>。

结束语:本文通过对光伏逆变器短路故障的多维度研究,明确了故障的形成机制与危害路径,对比验证了不同检测诊断技术的适用性,构建了“硬件-软件-系统”三级防护体系。研究表明,融合传统方法与先进技术的在线监测系统,结合分级预警机制,可实现故障从“被动响应”到“主动预防”的转变;而硬件优化与软件算法改进的协同,能从源头降低故障发生概率。

#### 参考文献

- [1]张虎.光伏发电系统中逆变器的常见故障及原因分析[J].灯与照明,2025,49(3):32-34.
- [2]公锋,丁家伟,刘允浩,李武能.基于增量学习的光伏并网逆变器故障诊断[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(2):48-57.
- [3]孙星,李亚星,窦永强.光伏电站箱式变压器典型故障分析及处理[J].山西电力,2020(1):20-23.
- [4]殷良成.光伏逆变器维护及故障分析应用[J].设备管理与维修,2024(20):115-119.