光伏电站逆变器故障对继电保护的影响及应对措施

李超彦　林　秋
中国三峡新能源（集团）股份有限公司河南分公司　河南　郑州　450000

摘　要：光伏逆变器作为电站并网核心设备，其故障引发的电气参数畸变，极易干扰继电保护正常运行，造成保护误动、拒动等问题，影响电网安全稳定。本文以光伏电站逆变器典型故障为研究对象，梳理逆变器电气故障与本体故障的运行特性，分析故障电流畸变、电压波动、谐波干扰对继电保护的具体影响。结合光伏电站实际运行工况，从保护定值优化、自适应控制策略升级、机网联动防控三个维度提出针对性改进措施。

关键词：光伏电站；逆变器故障；继电保护；保护误动；联动防控

引言：随着光伏新能源并网规模持续扩大，电力电子设备占比不断提升，光伏电站并网运行稳定性成为电网运维重点。逆变器是光伏能量转换与并网调控的关键设备，相较于传统同步机组，其故障电流受限、波形畸变特征明显，与传统继电保护整定逻辑适配性较差。实际运维中，逆变器各类故障频繁引发保护误跳闸、故障无法精准切除等隐患，增加电站停运风险。为解决机网保护适配矛盾，保障光伏电站与电网安全运行，本文系统研究逆变器故障特性及其对继电保护的影响，并提出贴合工程实际的优化应对方案。

1 光伏逆变器工作原理与继电保护配置体系

1.1 光伏并网逆变器核心工作机制

光伏并网逆变器是光伏电站能量转换的核心设备，主要承担光电能量转化与并网调控职能。光伏组件将太阳能转化为低压直流电能，逆变器通过DC/DC升压模块完成直流电压稳压调节，再经DC/AC逆变环节将直流电转换为工频交流电。设备依托脉宽调制技术输出正弦交流电，同时实时跟踪电网频率、电压参数，保障输出电能与公共电网同步。正常工况下，逆变器具备最大功率点跟踪功能，可根据光照强度、环境温度动态调整输出功率，是维系光伏电站稳定并网发电的关键装置。

1.2 光伏电站继电保护系统配置类型与功能

光伏电站继电保护系统以故障快速切除、设备安全防护为核心目标，配置多级保护装置。站内主要包含电流保护、电压保护、频率保护及谐波保护四类核心模块，分别适配并网线路、逆变器、集电线路等关键设备。电流保护用于排查相间短路、接地短路故障，规避过流损毁设备；电压与频率保护可监测电网异常波动，及时实现并网脱网；谐波保护主要抑制逆变过程产生的电能畸变，保障并网电能质量，全方位覆盖电站运行故障风险。

1.3 逆变器与继电保护系统的联动逻辑

逆变器与继电保护系统形成双向联动运行机制。正常并网状态下，逆变器实时向保护装置传输输出电流、电压、功率等运行数据，为保护定值整定、状态监测提供数据支撑。当逆变器出现故障引发电能参数异常时，继电保护系统通过实时采样判别故障类型，触发预警或跳闸动作；反之，电网侧故障导致保护启动时，也会向逆变器下发闭锁脱网指令，关停逆变输出，避免故障范围扩大，实现电站故障的协同防控[1]。

2 光伏电站逆变器典型故障类型及故障特性

光伏电站逆变器运行过程中故障类型可分为电气故障与设备本体故障两大类。（1）电气类故障，主要包含交直流过压、过流、相间短路、接地短路及绝缘阻抗异常等故障，该类故障多由电网扰动、线路老化、雨雪天气绝缘下降引发，故障发生后会造成并网电流波形严重畸变，故障电流幅值受限且无明显工频衰减特性，与传统同步电源短路故障特性存在明显区别。（2）设备本体类故障，涵盖功率模块损坏、采样回路异常、通信故障及散热失效等故障，功率模块与采样回路故障会直接导致电压、电流采样数据失真，造成输出电能参数偏移；通信故障会造成逆变器与后台监控、保护装置数据交互中断，无法实现故障实时上传与联动闭锁；散热故障会引发设备超温降额、停机，造成输出功率骤变，产生持续性功率波动。（3）故障暂稳态特性差异，逆变器故障暂态阶段会产生短时冲击谐波与高频分量，参数波动剧烈，稳态故障下电气参数趋于稳定但始终偏离额定区间，持续造成并网工况异常，极易引发继电保护误判、拒动等问题[2]。

3 逆变器故障对光伏电站继电保护的影响

3.1 故障电流畸变引发电流保护误动与拒动

光伏逆变器属于电力电子接口设备，与传统火电、

水电同步机组的故障电流特性存在本质区别，逆变器发生故障后输出的故障电流无固定工频周期、幅值受限，会直接破坏传统电流保护的判定逻辑，引发保护误动或拒动问题。（1）故障电流幅值受限导致保护拒动。传统输电线路电流保护定值按照同步机组短路电流参数整定，短路故障时电源可提供数倍额定电流的故障通量，能够快速触发保护动作。逆变器出现短路、模块击穿故障时，受限于功率器件限流特性，故障电流通常仅为额定电流的1.1~1.5倍，电流增量较小，无法达到过流保护动作阈值，致使线路轻微短路、逆变器内部故障无法被及时切除，故障长期存续会烧毁线路及设备。（2）故障电流波形畸变引发保护误判。逆变器故障会产生大量非周期分量与高频谐波，故障电流波形严重失真，不再遵循标准正弦变化规律。传统电流保护依托工频电流采样计算，无法甄别畸变电流特性，正常光照波动、逆变器轻微故障引发的电流小幅畸变，会被保护装置误判定为短路故障，造成保护误跳闸，引发光伏电站非计划停机，降低电站发电稳定性。（3）故障电流暂态特性影响保护速动性。逆变器故障电流无明显稳态衰减过程，暂态冲击电流持续时间短、变化速率快，常规电流保护延时整定无法适配该特性，易出现故障初期无法检测、故障消退后误动作的问题。

3.2 电压异常波动降低电压及频率保护可靠性

逆变器稳压、稳频功能失效是运行中高发故障，该类故障会造成并网点电压、频率无序波动，超出继电保护整定适配范围，大幅降低电压保护与低频、高频保护的运行可靠性。（1）电压偏移引发保护误动作。逆变器采样故障、控制回路异常会导致输出电压持续偏高或偏低，稳态过压、欠压工况频繁出现。传统电压保护定值针对电网稳态运行参数设定，未考虑逆变器动态故障电压波动特性，轻微电压偏移即可触发过压、欠压保护跳闸，造成并网线路频繁脱网。尤其在光照突变、负荷波动场景下，逆变器电压调节失效引发的短时电压波动，会被保护系统判定为电网故障，产生大量无效动作记录。（2）频率偏移导致保护适配失效。逆变器锁相环故障会造成并网频率失稳，出现频率偏高或偏低现象。电网侧频率故障多为大范围、持续性偏移，而逆变器故障引发的频率波动为局部、短时扰动，继电保护装置无法区分电网故障与逆变器设备故障，易出现故障不动作、无故障误动作的情况。（3）低电压穿越功能异常加剧保护紊乱。逆变器低电压穿越模块故障时，电网轻微电压跌落工况下设备无法维持并网运行，直接触发脱网保护，与电网继电保护协同配合逻辑冲突，破坏电站并网运行稳定性。

3.3 谐波干扰造成继电保护采样与判定偏差

逆变器功率模块老化、驱动信号异常、滤波装置故障等本体问题，会导致并网电能谐波含量超标，高频谐波分量侵入继电保护采样回路，直接干扰保护装置的数据采集与故障判定精度。（1）谐波干扰造成采样数据失真。继电保护依托电压、电流互感器实时采样数据完成故障判别，逆变器故障产生的3次、5次、7次高频谐波会叠加在工频信号上，改变采样波形的有效值与相位参数，导致保护装置采集的数据与实际电网运行工况不符，基础数据偏差直接引发后续故障判定失误。（2）谐波引发保护元件误启动。部分继电保护元件对高频分量较为敏感，超标谐波会触发保护元件误启动，在电站无实际故障的情况下启动预警与跳闸程序，造成保护装置频繁误动。（3）谐波畸变影响故障定位精度。集电线路多台逆变器同时发生轻微故障时，谐波叠加效应更为明显，会导致保护装置无法精准判定故障区段与故障类型，出现故障定位偏移、保护选择性失效的问题，增加故障排查难度，延长故障恢复时间[3]。

4 适配逆变器故障的光伏继电保护优化应对措施

4.1 继电保护定值参数优化与整定方法改进

传统光伏电站继电保护定值多依据电网稳态工况与同步机组故障特性整定，未适配逆变器故障限流、波形畸变、功率波动等特殊电气特性，是造成保护误动、拒动的核心原因，需结合逆变器实际故障特征完成定值优化与整定方式升级。（1）优化电流保护定值整定参数。针对逆变器故障电流幅值受限、增量偏低的特性，摒弃传统同步电源短路电流整定标准，结合逆变器额定限流倍数、故障暂态电流数据重新核算过流保护定值。适当提高过流保护动作阈值，规避光照波动、逆变器轻微故障引发的保护性误跳闸，同时缩短近距离短路故障的保护动作时限，解决逆变器弱故障电流导致的保护拒动问题，实现轻重故障的差异化判别。（2）修正电压、频率保护定值区间。依据逆变器并网运行规程，结合电站实际电压波动范围、锁相环故障频率偏移特性，拓宽电压保护耐受区间，细化高低压故障分级判定标准。针对逆变器短时频率扰动特征，增设频率保护延时判别机制，区分电网持续性故障与逆变器短时工况异常，杜绝瞬时扰动引发的保护无效动作。（3）完善谐波保护整定规则。结合逆变器不同故障工况下的谐波含量、频次分布数据，设定分级谐波保护阈值，区分正常逆变谐波与故障畸变谐波，剔除正常并网工况下的谐波干扰信号，仅对超标、持续性谐波故障启动保护动作。

4.2 新型自适应继电保护控制策略设计

固定参数的传统继电保护策略无法适配逆变器动态故障特性，难以应对复杂工况下的并网参数波动，需引入自适应控制技术，构建可实时适配逆变器运行状态的新型保护体系，提升故障判别与动作的灵活性。（1）搭建工况自适应保护判别模型。依托光伏电站实时监测数据，采集逆变器输出电流、电压、谐波、功率等运行参数，通过数据拟合建立逆变器正常、故障工况的电气特征数据库。保护装置可实时比对运行数据与特征数据库，动态调整保护判别逻辑与动作参数，针对逆变器限流故障、波形畸变故障、功率骤变故障，自动匹配对应的保护策略，解决固定逻辑保护适配性差的问题。（2）增设故障特征甄别算法。在传统工频采样判别基础上，加入暂态分量、高频谐波、电流变化率等多维判别指标，优化故障判定逻辑。通过算法区分逆变器设备故障与电网线路故障，规避逆变器本体故障引发的全线保护动作，提升继电保护的选择性与针对性。（3）优化保护协同控制逻辑。针对逆变器低电压穿越失效、并网失稳等故障，调整继电保护与逆变器的协同配合策略。电网轻微扰动工况下，优先依托逆变器调控能力稳定并网参数，避免保护频繁跳闸；当逆变器调控失效、故障持续恶化时，再启动分级跳闸保护，平衡电网稳定与电站并网运行需求[4]。

4.3 逆变器故障预判与保护联动防控机制搭建

为从源头降低逆变器故障对继电保护系统的干扰，需打破单一保护的被动防控模式，构建逆变器状态监测、故障预判、继电联动保护的一体化防控体系，实现故障提前预警、精准处置。（1）建立逆变器全状态在线监测体系。依托电站智能化监测设备，对逆变器功率模块、采样回路、锁相环、散热系统等核心部件进行实时监测，采集设备温度、驱动信号、采样精度、通讯状态等关键数据。通过数据分析预判设备老化、模块异常、散热失效等潜在故障，在电气参数出现异常波动前发出预警，提前干预设备故障，从源头减少故障工况对继电保护的冲击。（2）构建机网联动保护机制。打通逆变器控制系统与继电保护装置的数据交互通道，实现双向数据实时传输。逆变器预判本体故障时，主动向保护装置上传故障类型、故障位置、故障程度等信息，为保护装置精准判别故障提供依据；继电保护系统监测到并网参数异常时，同步向逆变器下发调控、闭锁指令，配合完成故障隔离，避免故障扩散。（3）完善故障分级处置机制。根据逆变器故障严重程度，划分轻微故障、一般故障、严重故障三个等级，匹配对应的保护处置方案。轻微参数异常故障仅启动预警，依托逆变器自我调控修复；一般故障启动局部闭锁、功率限制措施；严重短路、模块击穿故障立即启动跳闸保护，实现故障分级、精准处置，最大限度减少保护误动与停运损失[5]。

结束语：本文系统分析了光伏逆变器各类典型故障的电气特性，明确了故障电流、电压波动及谐波干扰对继电保护动作精度、选择性和可靠性的负面影响。针对现存保护适配性不足、联动机制不完善等实际问题，提出定值优化、自适应保护控制、故障联动防控的成套改进措施。通过优化继电保护运行逻辑与机网协同模式，可有效降低逆变器故障引发的保护异常问题。

参考文献

[1]印新.光伏电站交流侧故障暂态特性及其对配电网继电保护的影响研究[J].消费电子,2025,(23):41-43.

[2]郑开凡.光伏电站逆变器运行特性及故障分析[J].中国科技期刊数据库工业B,2026,(3):203-206.

[3]杨华.光伏电站智能组串式逆变器故障诊断与自愈技术研究[J].中国高新科技,2026,(5):57-59.

[4]吴红红.光伏电站中逆变器电流波形异常的常见原因及处理策略[J].电力设备管理,2025,(19):93-95.

[5]齐素杰.基于故障电流暂态体征提取的逆变器微电网继电保护方法[J].机电工程技术,2025,54(15):139-142.