

光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术与故障诊断方法

杜鹏

三峡集团云南能源投资有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/EPTSM.2026020020

摘 要： 随着光伏发电在电力系统中的大规模接入，光伏并网逆变器在电网故障条件下的运行性能对系统安全稳定性提出了更高要求，低电压穿越能力作为衡量光伏并网逆变器并网适应性的关键指标，其不足易引发逆变器脱网，围绕光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术，系统分析了电流限幅控制、无功优先支撑、直流侧电压抑制等关键技术，并探讨了基于电流特征、电压扰动的故障诊断思路，研究结果可为提升光伏并网逆变器运行可靠性提供理论参考。

关 键 词： 光伏发电；电力系统；光伏并网逆变器

Enhanced Low Voltage Ride-Through Capability and Fault Diagnosis Method for Photovoltaic Grid-Connected Inverter

Du Peng

Yunnan Energy Investment Co., Ltd., Three Gorges Group, Kunming, Yunnan 650000

Abstract： With the large-scale integration of photovoltaic power generation into power systems, the operational performance of grid-connected photovoltaic inverters under grid failure conditions has raised higher requirements for system safety and stability. Low-voltage ride-through capability, as a key indicator of grid adaptability for PV inverters, poses risks of inverter disconnection when insufficient. This study systematically analyzes critical technologies for enhancing low-voltage ride-through performance, including current limiting control, reactive power priority support, and DC-side voltage suppression. It also explores fault diagnosis approaches based on current characteristics and voltage disturbances. The research findings provide theoretical references for improving the operational reliability of grid-connected photovoltaic inverters.

Keywords： photovoltaic power generation; power system; grid-connected photovoltaic inverter

引言

随着光伏发电在电力系统中的高比例接入，电网对并网逆变器运行稳定性的要求不断提高，低电压穿越能力是衡量光伏并网逆变器在电网故障、电压暂降等扰动条件下持续并网运行能力的关键指标，其不足可能引发大规模脱网风险，影响电网安全，同时，逆变器结构复杂、运行工况多变，故障类型隐蔽且演化迅速，传统诊断方法难以及时、准确识别，因此，研究光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术，对提升新能源消纳水平具有重要意义。

一、光伏并网逆变器低电压穿越能力的概述

所谓光伏并网逆变器低电压穿越能力，就是电网发生短路故障、电压暂降或不平衡等异常情形时，逆变器可在不脱离电网的状态下持续运行，按电网规范提供所需的无功支撑和电流控制能力性能指标，光伏发电渗透率稳步上升，大规模光伏电站正从传统“被动电源”逐步转变为能显著影响电网稳定性的“主动电

源”，低电压穿越性能直接关联电力系统安全和可靠运行。电压跌落阶段内，逆变器必须抑制直流侧过压，限制并网电流冲击，还得满足电网对无功电流注入比例和响应速度的要求，这让控制策略、硬件设计及保护协调面临更高难度，针对光伏并网逆变器低电压穿越能力，全面研究其机理、控制方法及性能提升路径，对强化新能源并网适配能力、防止连锁脱网事故、提高电网抗干扰水平有重要工程价值和现实意义。

二、光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术分析

（一）电流限幅控制策略

电网出现电压跌落或短路故障，逆变器维持并网运行，一般要输出较大电流支撑电网电压，若不进行约束，易引发并网电流超出器件额定值，引致功率器件过流损坏或保护误动作，低电压穿越阶段加入高效电流限幅控制，可在达到电网规范要求的前提下，维持逆变器运行的安全和可靠，这类策略一般会动态限制并网电流参考值，让实际输出电流一直维持允许范围，实现故障时段稳定运行。在实际推进时，电流限幅控制策略要与功率控制和无功支撑要求协同，电压跌落阶段内，逆变器须优先保障无功电流注入比例，维持电网电压稳定，有功电流将同步得到限制，合理分配且限幅 d 轴和 q 轴电流，可杜绝控制饱和和系统失稳问题，同步设计快速电流检测与限幅环节，可强化控制响应速度，提升限幅精度，适配的电流限幅控制可兼顾保护逆变器硬件安全，还可强化它面对复杂电网故障时的低电压穿越性能，能为光伏系统高比例并网提供重要工程支撑。^[1]

（二）无功优先支撑控制

电网出现电压暂降或故障阶段，电压支撑能力的核心依托是无功功率的快速调节与注入，传统光伏逆变器侧重输出有功功率，电压异常状态下沿用原有有功控制模式，易加剧电网电压起伏，甚至触发并网保护机制脱离电网，无功优先支撑控制改动功率控制优先级，低电压穿越阶段优先保障无功电流输出，增强电网电压恢复能力，进而契合并网技术规范针对新能源电源的支撑要求。在实施实际控制操作时，无功优先支撑一般和电流限幅机制配合实现，逆变器输出电流受限状态下，控制系统按照电网电压跌落程度动态调整有功和无功电流分配占比，让无功电流优先满足支撑需求，有功电流对应缩减甚至临时抑制，把无功优先逻辑加入电流内环或功率外环，能规避控制饱和和系统不稳定问题，合理配置无功支撑曲线和响应速度，帮助强化逆变器针对不同故障工况的适配能力，无功优先支撑控制可强化光伏并网逆变器故障时段的电压支撑性能，也强化了它参与电网稳定调节的能力，对高比例光伏并网运行作用重大。^[2]

（三）直流侧电压抑制

电网出现电压跌落或短路故障，交流侧功率输出能力明显减弱，光伏阵列仍不间断向直流侧供给能量，引发直流母线功率失衡，继而引发直流侧电压骤增，直流电压超出逆变器及其功率器件的安全阈值，会触发保护动作，甚至损坏器件，大幅削弱系统连续运行能力，有效抑制低电压穿越时的直流侧电压，决定逆变器能否稳定并网运行的核心环节。在工程实操阶段，直流侧电压抑制一般结合控制策略与硬件措施实现，可采取降低有功功率指令、调整电流控制环节或加入能量平衡控制的方式，调整输入输出功率 故障期间实现重新匹配，靠控制手段限制直流电压攀升，可对接直流侧储能单元、制动电阻或能量耗散电路，及时释放冗余能量，降低电压冲击，快速检测直流电压，配套动态调节机制，可强化抑制效果与响应速度，恰当的直流侧电压抑制设计可维护逆变器硬件安全状态，还为它在低电压穿越期间持续并网、

提供电网支撑打下必要基础。

（四）虚拟同步发电控制

虚拟同步发电控制，是借助控制算法复刻传统同步发电机电气和机械特性的先进并网控制策略，可有力提升光伏并网逆变器低电压穿越能力，该控制方法给逆变器添加等效转动惯量、阻尼系数和同步特性，让它在电网电压跌落或扰动出现时拥有近似同步发电机的惯性响应和电压支撑能力，和传统基于锁相环的并网控制方式比，虚拟同步发电控制可降低电网故障期间相位突变和频率波动对逆变器运行的干扰，进而增强系统暂态稳定性与故障适应能力。^[3]在开展低电压穿越期间，虚拟同步发电控制借助调整虚拟电磁功率和转速方程实现，让逆变器输出的电流、功率平稳变化，切实防止电流冲击和控制失稳问题，该控制方式可在电压跌落过程中主动参与无功调节，提升电网电压支撑水平，故障恢复阶段完成平稳过渡，降低对电网的 2 次扰动，虚拟同步发电控制不靠高速锁相环，减小弱电网条件下的并网难度，合理调整虚拟惯量和阻尼参数，既能保障逆变器安全运行，又能大幅强化低电压穿越性能，对打造高比例新能源接入的稳定电力系统意义重大。

三、光伏并网逆变器低电压穿越能力故障诊断方法

（一）基于电流特征诊断

电网出现电压跌落或短路故障时，从幅值、相位、波形及谐波含量等维度看，逆变器并网电流有明显动态变化特征，监测分析并网电流瞬时值、有效值及变化率的实时数据，能快速甄别逆变器低电压穿越过程的异常运行状态，电流猛增、畸变加剧或失衡状态，一般表明控制策略失效、器件性能退化或并网参数异常等问题，靠电流特征实现的诊断方法，无需依托复杂模型，对低电压穿越相关故障实现快速发现与初步锁定。提取电流幅值特征、序分量特征及时频域特征，并同正常工况的特征模板作对比，能区分故障类型及严重程度，可让电流特征诊断结果与控制系统联动，发现异常趋势时即刻调整电流限幅或无功支撑策略，阻止故障范围扩大，靠电流特征开展诊断，有实现简便、响应迅速、在线应用能力突出等优点，能为光伏并网逆变器低电压穿越能力评估和运行维护筑牢有效支撑，对增强系统运行可靠性具备重要工程意义。

（二）基于电压扰动分析

电网出现故障、电压暂降或不平衡扰动时，逆变器并网点电压的幅值、相位、波形形态会出现明显变动，这些电压扰动特征可直接反映逆变器的动态响应能力和控制性能，对并网电压暂降深度、持续时间以及恢复过程开展监测与分析，可判定逆变器低电压穿越阶段是否符合并网规范标准，逆变器未及时同步电压变化或产生异常振荡，一般提示控制参数设置错误或内部器件存在潜在故障，电压扰动分析可为低电压穿越能力诊断提供核心支撑。在投入实操时，该方法一般会结合电压信号的时域和频域分析技术，完整评估扰动响应特征，分析电压跌落时段的电压恢复速度、波动幅度及与无功支撑指令的匹配程度，可辨识控制滞后、支撑不足或过度补偿等问题，可采用对称分量分析与电压不

平衡指标，协助判定逆变器在复杂故障条件下的适应能力，依托电压扰动分析制定的诊断对策，有直观性强、易操作、契合并网标准的突出特点，覆盖在线监测与运行评估场景，可及时排查低电压穿越能力不足的隐患，为光伏并网逆变器安全稳定运行筑牢可靠屏障。^[4]

（三）时频信号分析方法

可借助时频信号分析方法，高效诊断光伏并网逆变器低电压穿越能力故障，尤其适配电网故障时段电气信号非平稳、突变性强的特点，遭遇电压暂降或短路扰动时，逆变器的并网电压、电流等信号往往同时带有幅值突变、频率漂移及谐波增强等多种特征，只用单一的时域或频域分析，没法完整呈现动态变化过程，运用时频分析方法，可从时间、频率两个维度同步观测信号特性，精准捕捉低电压穿越过程中的瞬态扰动和能量分布变化，给故障诊断提供更丰富的信息支撑。在实施具体对策时，时频信号分析常借助短时傅中叶变换、小波变换或希尔伯特 - 黄变换等工具，对采集到的电压、电流信号做分解及特征提取，解析不同时间尺度的频谱演化特征，可辨识控制失效、参数异常或器件故障诱发的异常谐波和瞬态振荡，把提取的时频特征和正常低电压穿越工况做对比，可判别故障类型且评估严重程度，该方法的优势是对突发扰动反应敏锐、诊断精准，能与在线监测系统和智能诊断算法协同运作，为光伏并网逆变器低电压穿越能力的评估和优化提供可靠技术支撑。

（四）状态观测器诊断法

用状态观测器诊断法，可借助系统模型排查光伏并网逆变器低电压穿越能力故障，核心逻辑是借助逆变器数学模型和实际运行数据的偏差判别系统是否异常，执行低电压穿越阶段，逆变器的电压、电流及功率等状态变量会出现快速变化，控制系统或功

率器件产生故障，实际状态与理论模型预测状态将形成明显残差，搭建适配并网逆变器的状态观测器，实时估算关键状态量，把估计值和实测值进行对比，可及时检测并定位低电压穿越相关故障，进而强化诊断的准确性和可靠性。在工程实践应用环节，状态观测器诊断法一般搭配鲁棒控制与自适应机制，增强对参数不确定性和外部扰动的适应能力，采用阈值判断或模式识别分析残差信号，能区分正常低电压穿越工况和异常运行状态，还能进一步甄别控制回路失效、传感器偏差或功率器件退化等问题。^[5]把状态观测器与逆变器控制系统做同步设计，诊断出异常趋势后，可提前启动保护机制或调整控制策略，阻拦故障扩散，该方法拥有模型清晰、诊断逻辑严谨的长处，适配低电压穿越性能要求较高的光伏并网系统，为增强逆变器运行安全性和电网稳定性找到可靠技术方案。

四、结语

光伏并网逆变器低电压穿越能力的提升与故障诊断方法研究，是保障新能源高比例接入电力系统安全稳定运行的重要技术基础。通过合理设计电流限幅、无功优先支撑、直流侧电压抑制以及虚拟同步发电等控制策略，可有效增强逆变器在电网故障和电压扰动条件下的运行适应性。同时，结合基在电流特征、电压扰动、时频信号分析和状态观测器等多种故障诊断方法，能够实现对低电压穿越过程的在线监测与精准识别，为运行维护和控制优化提供有力支撑。未来，随着光伏装机容量的持续增长和电网结构的日益复杂，低电压穿越能力与智能诊断技术的协同发展将成为研究重点，对推动新能源系统的安全、高效和可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 程杉,蔡子威,张旭军,等.基在雪消融算法的光伏并网逆变器低电压穿越模型多阶段参数辨识方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(5):47-58.
[2] 张兵建.光伏并网逆变器低电压穿越技术研究[J].百科论坛电子杂志,2021(4).
[3] 徐裕勇.MW级光伏并网逆变器低电压穿越控制策略[J].电子技术与软件工程,2020,000(010):P.213-216.
[4] 王瑞,商飞,王良全.基在LabVIEW的光伏逆变器低电压穿越检测方法研究[J].电测与仪表,2023,60(3):178-182.
[5] 任颖,周鹏鹏.用在光伏逆变器故障穿越的载波交叠调制优化[J].电力系统保护与控制,2024(14).