

光伏逆变器低电压穿越功率波动现场调试技术研究

张石兵

山西启光发电有限公司 山西 晋中 031300

摘要: 针对光伏逆变器低电压穿越工况下功率波动超限、调试精度低、工况复现难等工程问题,本文剖析对称与不对称电压跌落引发功率振荡的核心机理,分析软硬件参数对波动的影响及电网危害。优化高频检测、工况复现技术,提出参数整定与协同抑制调试方案。现场试验表明,该技术可大幅降低功率波动幅值,提升穿越成功率,缩短调试周期,适配多机型与复杂电网工况,工程实用性突出。

关键词: 光伏逆变器;低电压穿越;功率波动;现场调试技术

引言: 光伏电站并网规模持续扩大,电网电压跌落故障频发,逆变器低电压穿越过程中的功率波动问题,易引发电压闪变、谐波污染甚至机组连锁脱网,严重威胁电网稳定。传统现场调试方法存在检测精度不足、参数整定依赖经验、故障工况覆盖不全等缺陷,难以适配复杂电网运行需求。为此本文深入研究功率波动机理,优化现场调试关键技术,构建标准化调试流程,为光伏逆变器稳定并网运行提供技术支撑。

1 光伏逆变器低电压穿越与功率波动机理分析

1.1 光伏逆变器低电压穿越工作原理

(1) 低电压穿越国家标准技术要求与工况界定。依据GB/T19964-2012等标准,当电网电压跌落至20%额定值以内时,逆变器应维持不脱网运行0.625秒,并在电压恢复后快速回补有功功率。工况按跌落深度划分为对称跌落(80%~20%UN)与不对称跌落(单相/两相跌落)两类。(2) 光伏并网逆变器拓扑结构与LVRT运行机制。主流采用两电平或NPC三电平拓扑,前级Boost实现MPPT,后级DC/AC完成并网。LVRT机制采用正负序分离控制,动态调节d轴电流指令为有功回馈留出裕度,同时q轴输出感性无功支撑电压恢复^[1]。(3) 电压跌落期间逆变器功率响应基本特性。跌落瞬间有功功率骤降,响应延迟约1~2个工频周期;无功功率迅速抬升,响应时间小于30ms,二者呈反向耦合关系。

1.2 低电压工况下功率波动产生机理

(1) 电网电压对称跌落引发的有功功率波动机理。对称跌落导致逆变器输出有功 $P = (3/2)(V_d I_d + V_q I_q)$ 中 V_d 大幅降低,电流环PI调节器出现饱和,使有功指令跟踪产生超调,诱发2~3次工频周期的功率振荡。(2) 电网电压不对称跌落导致的功率振荡问题。负序分量引入使瞬时功率产生100Hz振荡分量,有功与无功耦合加剧,导致直流母线电压出现二次脉动,振荡幅度可达额定功率的

15%~30%。(3) 直流侧电压波动与锁相偏差诱发功率扰动机制。MPPT扰动使直流电压波动经前馈通道传播至功率外环,与锁相环在跌落时相位偏差(可达15°~25°)叠加,引入额外功率跟踪误差。

1.3 功率波动影响因素与危害分析

(1) 硬件参数偏差对功率波动的影响。滤波电感偏差±10%导致电流环带宽偏移,直流母线电容老化使电压纹波增大,直接影响功率动态响应的平稳性。(2) 控制算法参数匹配不当引发的波动问题。电流环PI参数与电网阻抗失配时,系统相位裕度下降,超调量增大;锁相环带宽设定过高会放大扰动信号,加剧功率振荡。(3) 功率波动对逆变器及电网的运行危害。功率波动使逆变器开关管电流应力增加,缩短IGBT寿命;对电网而言,波动注入会引发电压闪变和谐波污染,严重时可能导致邻近风电场/光伏电站连锁脱网。

2 光伏逆变器低电压穿越功率波动现场调试关键技术

2.1 传统现场调试方法及局限性

(1) 常规流程采用电网模拟器或阻抗分压法模拟电压跌落,依次进行空载、轻载、满载测试,工况仅设三相对称跌落(20%、50%、80%)和单相跌落,每工况重复3~5次取均值,测试耗时2~4小时。(2) 功率波动检测依赖电能质量分析仪或示波器人工判读,采样率10~20kHz,难以捕获高频分量(如数百赫兹开关频率旁瓣);检测点限于并网点,忽略直流侧耦合路径,振荡源定位困难,偶发性波动(特定相位角触发)检出率不足60%。(3) 参数整定多凭经验公式,未计及电网阻抗差异,调试周期短(2~3天),缺乏系统寻优;同一参数在不同日照下性能差异大,调试后仍有5%~10%工况点存在超限波动,留有安全隐患。

2.2 功率波动精准检测与工况复现技术

(1) 基于实时采样的功率波动高频检测方法。采用

FPGA+ADC同步采样架构,实现三相电压、电流200kHz高速采集,时间戳精度达 $1\mu\text{s}$ 。通过d-q变换计算瞬时功率,采用滑动窗口傅里叶分析提取50Hz基波与100Hz振荡分量,检测分辨率达0.1%额定功率,可有效识别持续2ms以上的瞬态功率尖峰,解决了传统检测对高频分量和瞬态事件捕捉能力不足的问题。(2)多工况电压跌落故障现场复现技术。基于电力电子式故障发生装置,可编程设定跌落深度(0~90%)、持续时间(0.1~3s)、跌落起始相位角($0^\circ\sim 360^\circ$)及跌落类型(对称/不对称/谐波叠加),支持序列化自动测试。通过录波回放功能复现现场实际故障波形,实现“现场故障—实验室复现—整改验证”的闭环调试流程^[2]。(3)波动数据滤波与特征参数提取方法。采用自适应陷波滤波器滤除100Hz工频倍频干扰,结合小波包变换分离波动分量。提取波动峰值、振荡衰减时间、波动能量(波动幅值 $\times$ 持续时间)三个特征参数,建立波动特征矩阵,为参数整定提供量化依据。

2.3 基于参数优化的现场调整改技术

(1)逆变器电流环、电压环PI参数现场整定方法。基于实测电网阻抗,采用闭环频率响应法测量电流环幅频特性,以相位裕度 $\geq 45^\circ$ 、幅值裕度 $\geq 6\text{dB}$ 为约束,现场计算最优PI系数。电压环按“内快外慢”原则,带宽设定为电流环的 $1/5\sim 1/3$,避免内外环动态耦合引发振荡。整定过程配合阻抗分析仪实时校验,确保参数与现场电网匹配。(2)LVRT无功支撑系数动态调试优化策略。改变传统固定无功系数 K_q ,引入分段动态调整:电压跌落深度 $\leq 50\%$ 时 K_q 取2.0~3.0,优先支撑电压恢复;跌落深度 $> 50\%$ 时 K_q 降为0.5~1.0,兼顾有功回补。现场调试中通过步进0.25的系数扫描,以并网点电压恢复时间最短为目标,逐台确定最优 K_q 值^[3]。(3)MPPT模式切换阈值现场校准技术。根据实测直流侧电压波动范围,校准LVRT触发时MPPT由“最大功率跟踪”切换至“恒压限流”模式的电压阈值,使其高于直流电压下限的1.15倍,避免模式频繁切换。同时设定滞回比较区间(回差5V),消除阈值临界处的控制抖动。

2.4 功率波动协同抑制调试方案设计

(1)故障阶段功率平滑过渡调试逻辑。建立“前馈补偿+指令缓变”的平滑过渡逻辑:检测到电压跌落, d轴电流指令按一阶惯性滤波(时间常数10~20ms)缓降至目标值,避免指令阶跃引发功率突变。现场调试中通过调整滤波时间常数,在响应速度与平滑度之间取得最佳平衡点。(2)故障恢复阶段功率振荡抑制调试方法。故障恢复时引入有功功率变化率限制($\leq 0.2\text{PN/s}$),配合虚拟电阻阻尼控制,增加系统阻尼比至0.6以上。

调试过程中采用阶跃恢复激励法,观测功率响应波形,调整阻尼系数直至振荡次数 ≤ 1.5 个周期、衰减时间 $\leq 40\text{ms}$ 。(3)全工况LVRT稳定运行调试标准流程。制定标准化六步调试流程:前期准备(阻抗测试、安全隔离) $\rightarrow$ 空载参数辨识 $\rightarrow$ 轻载扰动测试 $\rightarrow$ 满载全工况扫描(18个跌落点 $\times 3$ 种类型) $\rightarrow$ 参数迭代优化(2~3轮) $\rightarrow$ 验收复核(连续3次正常穿越)。每步设置明确的通过判据,形成调试报告闭环存档,确保全工况下功率波动峰值 $\leq \pm 10\%\text{PN}$ 、振荡衰减时间 $\leq 60\text{ms}$,满足并网验收要求^[4]。

3 光伏逆变器低电压穿越功率波动现场调试试验与结果分析

3.1 试验平台与试验方案搭建

(1)现场试验设备与光伏逆变器参数配置。试验选用某品牌500kW集中式光伏逆变器,直流输入电压范围450~850V,额定输出电压315V/50Hz,开关频率3kHz。配置高精度功率分析仪(采样率500kHz,精度0.1%)、示波记录仪、电力电子式故障发生装置(容量1.5MW)及RT-LAB实时仿真系统。(2)不同电压跌落深度试验工况设置。依据GB/T19964-2012设置12个工况:对称跌落至20%、35%、50%、80%;单相跌落至0%、20%、50%;两相跌落至20%、50%;附加3%谐波工况。每工况持续625ms,重复3次取均值,日照700~900W/m²。(3)试验数据采集与评价指标体系构建。采集三相电压电流、直流母线电压、有功/无功功率等,采样率50kHz。构建三级评价指标:穿越成功率、功率波动峰值($\leq \pm 10\%\text{PN}$)、动态响应时间(无功 $\leq 30\text{ms}$,有功恢复 $\leq 200\text{ms}$)。

3.2 传统调试方法试验测试与结果分析

(1)对称电压跌落工况功率波动测试结果。采用经验参数(电流环 $K_p = 0.8$ 、 $K_i = 50$,固定 $K_q = 1.5$),20%跌落时功率波动峰值达 $\pm 22\%\text{PN}$,振荡持续90ms;50%跌落时波动 $\pm 14\%\text{PN}$;80%跌落时波动 $\pm 8\%\text{PN}$,随跌落加深波动加剧趋势明显。(2)不对称电压跌落工况运行数据分析。单相跌落至20%时,100Hz振荡幅值达18%PN,直流母线电压纹波由 $\pm 5\text{V}$ 增至 $\pm 32\text{V}$,锁相环相位偏差达 18° ,逆变器两次触发过流保护,穿越成功率仅66.7%。两相跌落工况振荡幅值约为额定功率的14%,较单相跌落略低但仍严重超标^[5]。(3)传统调试方案存在的核心问题总结。电流环积分器饱和致指令超调;固定无功系数无法适配不同跌落深度,浅跌落时无功过补、深跌落时无功不足;缺乏主动阻尼抑制环节,功率振荡

衰减缓慢,且不对称跌落时负序分量影响进一步恶化控制性能。

3.3 优化调试技术试验验证与效果分析

(1) 参数优化调试后的功率波动抑制效果。优化参数($K_p = 1.2$ 、 $K_i = 35$,分段 K_q 动态调节,阻尼系数0.6)下,20%跌落波动峰值由 $\pm 22\%PN$ 降至 $\pm 8\%PN$,衰减时间由90ms缩至35ms;50%跌落由 $\pm 14\%PN$ 降至 $\pm 6\%PN$;不对称跌落100Hz振荡由18%PN降至6%PN,穿越成功率由66.7%升至100%。(2) 不同故障工况下LVRT运行稳定性对比。优化方案全部12个工况波动峰值 $\leq \pm 9.6\%PN$,传统方案在20%对称、单相0%、单相20%、两相20%四个工况超限。优化方案无功响应平均22ms,标准差3.2ms,显著优于传统方案的8.7ms,运行一致性大幅提升。(3) 故障恢复阶段功率响应速度优化效果。引入有功变化率限制(0.2PN/s)后,恢复至90%额定功率由186ms缩至152ms,全过程无超调无二次振荡。传统方案恢复阶段平均出现1.8次振荡过冲,优化后降为零,实现了平稳快速恢复。

3.4 调试技术可靠性与通用性验证

(1) 不同功率等级逆变器适配性测试。将优化方案分别应用于250kW组串式和1MW集中式逆变器,各进行6个典型工况测试。250kW机型波动峰值 $\leq \pm 9.2\%PN$,1MW机型 $\leq \pm 8.5\%PN$,均满足验收标准,参数调整幅度在 $\pm 15\%$ 以内,表明方案具有良好的功率等级适应性。(2) 复杂电网工况下调试方案稳定性验证。模拟电网阻抗变化($SCR = 3 \sim 10$)、背景谐波畸变率($THD = 0.5\% \sim 5\%$)及日照剧烈波动($300 \sim 900W/m^2/min$)三类复杂工况,优化方案全部成功穿越,功率波动

峰值 $\leq \pm 10.5\%PN$,较传统方案($\geq \pm 18\%PN$)优势显著,弱电网条件下无功支撑能力未见明显衰减。(3) 现场调试技术工程应用可行性分析。优化方案将单台逆变器调试时间由传统2.5小时压缩至1.8小时(减少28%),无需额外硬件投入,仅通过上位机软件修改参数即可完成。调试流程标准化后操作步骤明确,对工程人员技术水平要求适中,具备在大型光伏电站批量推广应用的条件下,具有显著的经济效益和工程实用价值。

结束语

本文完成了低电压穿越功率波动机理分析、调试技术优化及试验验证,形成了一套高精度、可落地的现场调试方案。通过参数优化、工况精准复现与多阶段波动抑制,有效解决了传统调试的技术短板,显著提升逆变器并网稳定性。该方案无需额外硬件投入,调试效率更高,适配多功率等级设备与复杂电网环境,可为光伏电站并网调试及稳定运行提供可靠技术参考。

参考文献

- [1] 谢德兴,肖仕武.新能源接入电网短路故障低电压穿越期间静态电压稳定研究[J].中国电机工程学报,2025,45(17):670-679.
- [2] 勾奕昀.基于锁相环相位补偿的光伏逆变器低电压穿越快速无功控制[J].电力系统保护与控制,2024,52(24):85-96.
- [3] 周立.低电压穿越条件下并网逆变器多矢量模型预测功率控制研究[J].电气工程学报,2024,19(02):83-91.
- [4] 黄显斌.基于LSTM优化虚拟阻抗的光伏机组低电压穿越方法[J].太阳能学报,2025,46(04):1821-1830.
- [5] 李华,高怀正,郝悦.基于虚拟同步发电机低电压穿越的无缝切换控制策略[J].太阳能学报,2021,42(09):168-174.