

分布式光伏发电系统并网逆变器的控制与保护研究

赵丹丹 孙 琳

国网河南省电力公司周口供电公司 河南 周口 466000

摘 要：分布式光伏发电规模化接入配电网，对并网逆变器的控制精度与保护可靠性提出了双重挑战。逆变器作为光伏阵列与电网之间的能量变换接口，其控制策略直接影响最大功率追踪效率、并网电能质量及故障穿越能力，而其保护机制则关乎设备安全与电网稳定性。本文系统梳理了分布式光伏并网逆变器的主流拓扑结构，深入分析最大功率点跟踪、并网电流控制及低电压穿越等核心控制策略的理论基础与适用边界，同时详尽讨论孤岛检测、电网异常保护及逆变器自身防护的技术原理。控制与保护应从分立设计走向深度融合，方能在高渗透率场景下保障系统高效、安全运行。

关键词：分布式光伏；并网逆变器；最大功率点跟踪；低电压穿越

引言

随着能源结构转型加速，分布式光伏发电因其安装灵活、就近消纳等优势，在配电网中的渗透率持续攀升。并网逆变器作为光伏组件直流输出与交流电网之间的必需接口，承担着电能变换、并网同步及系统保护等多重功能。其控制性能直接决定了发电效率与供电质量，而保护性能则关乎设备寿命与电网安全。长期以来，控制策略侧重于提升动态响应与稳态精度，保护设计则强调故障隔离与极限工况耐受，二者在时间尺度、动作逻辑上存在潜在冲突。例如，低电压穿越要求逆变器在电网电压骤降时持续运行并注入无功，而过流保护则可能因瞬时过流而跳闸，二者若缺乏协调，将导致穿越失败或设备损坏。因此，有必要将控制与保护作为有机整体进行系统研究，厘清其相互作用机理，探索协同优化路径。本文从拓扑结构出发，依次论述核心控制策略、保护机制及其协调问题，以期为分布式光伏并网技术的工程实践提供理论参考。

1 分布式光伏并网逆变器的拓扑结构与运行特性

1.1 常用拓扑类型及其适用场景

分布式光伏并网逆变器按功率变换级数可分为单级式和双级式。单级式逆变器直接将光伏阵列输出的直流电压经DC/AC变换并网，结构简单、效率较高，但对光伏阵列配置和电压范围要求苛刻，适用于组件串联电压与电网匹配良好的小型系统。双级式逆变器前级为DC/DC升压或降压变换器，后级为DC/AC逆变器，前级负责实现最大功率点跟踪（MPPT）与电压调节，后级负责并网电流控制。这种解耦设计提高了系统灵活性，允许更宽的光伏电压输入范围，已成为分布式系统的首选拓扑。按电气隔离方式，又可分为工频隔离型和高频隔

离型。工频隔离变压器可抑制共模漏电流并提供接地保护，但体积重量大；高频隔离则通过高频变压器实现缩减尺寸，但控制复杂且效率略低。无隔离型逆变器凭借成本与效率优势在户用和小型工商业系统中广泛应用，但需额外处理共模电压问题。拓扑选型直接影响后续控制策略和保护的实现复杂度，必须结合具体应用场景统筹考量。

1.2 分布式光伏并网运行的特殊性

分布式光伏并网不同于大型集中式光伏电站，其运行环境具有以下显著特点：首先，接入电压等级通常为380V或10kV，电网阻抗变化大，线路参数不对称，容易引发谐振和电压抬升问题。其次，分布式系统多位于用户侧，光照条件受建筑遮挡、雾霾和云层快速移动影响，输出功率剧烈波动，对MPPT的动态跟踪速率提出更高要求^[1]。再次，大量分布式逆变器并联接入同一馈线，可能产生环流和次同步振荡，增加控制难度。最后，配电网故障特征与输电网不同，如单相接地故障时电压跌落非对称，要求逆变器具备负序电流抑制能力。这些特殊性使得分布式光伏逆变器的控制与保护不能简单移植大型电站的成熟方案，而必须针对弱电网、不对称故障和多样运行模式进行适配性设计。

2 并网逆变器的核心控制策略

2.1 最大功率点跟踪的理论与方法

MPPT是逆变器控制的前端核心，其本质是在不断变化的日照和温度条件下，通过调节DC/DC或DC/AC的占空比，使光伏阵列工作于最大功率点电压附近。常用方法中，扰动观察法（P&O）以固定步长改变参考电压并观测功率变化方向，算法简单但存在振荡和误判问题，尤其在光照快速变化时易追踪失效。电导增量法（INC）

利用瞬时电导与增量电导的比较,判定工作点相对最大功率点的位置,稳态精度高于P&O,但对采样分辨率和计算精度敏感。改进型变步长策略可根据功率-电压曲线斜率自适应调整扰动步长,平衡动态响应与稳态纹波。此外,基于模糊逻辑和神经网络的智能MPPT方法无需精确数学模型,但依赖训练数据和计算资源,在低端控制器中应用受限。从控制论角度,MPPT本质上是极值搜索问题,其性能评价应综合考量跟踪效率、收敛速度及对噪声的鲁棒性。对于分布式系统,宜采用混合策略——快速扫描期间用变步长P&O,稳态则切换至INC,以兼顾动态与静态指标。

2.2 并网电流控制与同步技术

并网电流控制决定了注入电网的有功/无功质量及谐波特性。传统PI控制在静止坐标系下对交流正弦量存在稳态误差,因而引入dq旋转坐标变换,将有功和无功分量解耦为直流量,便于PI无静差跟踪。然而,PI控制依赖电网电压前馈和交叉解耦项,在弱电网下前馈项可能引入正反馈而恶化稳定性。比例谐振(PR)控制直接对特定频率(基波及主要谐波)提供无穷增益,无需坐标变换,适合单相系统和对谐波抑制要求较高的场景,但谐振频率偏移敏感,需结合自适应频率锁相。重复控制可显著抑制周期性扰动,但动态响应较慢^[2]。近年来,模型预测控制(MPC)因动态响应快且能处理非线性约束,受到广泛关注,但其依赖精确的滤波器参数模型,计算负担较重。锁相同步(PLL)是电流控制的前提,三相系统多采用基于同步参考系的PLL,单相系统则需构造虚拟正交信号。弱电网下PLL的带宽设置需权衡响应速度与抗扰动性,带宽过高易引发振荡,过低则影响动态性能。上述方法的选择取决于系统容量、电网强度和控制芯片算力,不存在普适最优,需按应用场景权衡。

2.3 低电压穿越控制与无功支撑

当电网发生故障导致电压跌落时,并网标准要求逆变器不脱网且按跌落深度输出相应无功电流。低电压穿越(LVRT)控制的核心在于故障识别、正负序分离与指令电流重新分配。对于不对称跌落,需采用延迟信号消除或双二阶广义积分器提取正负序分量,进而分别控制正序有功和负序抑制。在电压跌落期间,逆变器电流限幅值约束下,应优先保障无功输出以支撑电压恢复,有功输出可根据电压跌落程度线性削减。控制策略往往采用限幅器与优先级管理,当计算出的电流参考值超出硬件最大耐受电流时,按无功优先的原则进行缩限。此外,LVRT控制还需考虑直流母线过压问题,因为交流侧功率输出受限而前端光伏仍持续注入能量,需通过直流

卸荷电路或主动降功率(如MPPT偏移)来平衡能量。值得指出的是,LVRT控制与常规电流内环的控制参数可能互相冲突——故障瞬间,内环积分器饱和导致恢复时间延长,需增设抗积分饱和逻辑及条件复位机制,以确保穿越结束后快速恢复常态。

2.4 多机并联的均流与谐振抑制

在多台逆变器并联接入公共耦合点时,各逆变器输出电压幅值、相位和频率的细微差异会导致环流,轻则增加损耗,重则引发系统不稳定。下垂控制通过模拟同步发电机的有功-频率、无功-电压下垂特性,实现无互联线的自主均流,但传统下垂法在低压线路中受线路阻抗影响,无功均分精度不足,需引入虚拟阻抗或自适应下垂系数改进。另外,多逆变器与电网阻抗相互作用易引发高频谐振,尤其在LCL型滤波器中更为突出。有源阻尼技术通过电容电流反馈或陷波器来增加阻尼,无需额外无源器件,但反馈系数的选取需兼顾稳定裕度与滤波效果。在控制层面,可通过在电压环或电流环中嵌入谐振抑制支路,或采用基于阻抗重塑的鲁棒控制,使等效输出阻抗在谐振频率附近呈阻性,从而减弱谐振峰^[3]。多机并联的控制策略应与保护动作分级配合,当某台逆变器因故障而退出时,剩余逆变器需快速调整下垂参考值,避免功率缺额引起的电压崩溃。

3 并网逆变器的保护机制

3.1 孤岛效应检测原理与方法

孤岛效应是指电网失电后,光伏逆变器仍向局部负载供电,形成独立供电岛。孤岛运行不仅危及检修人员安全,也因电压频率不受控而损害设备,故必须配置反孤岛保护。被动式检测基于公共点电压幅值、频率或相位跳变来判别电网状态,实现简单但对电能质量影响小,但存在检测盲区(当负载谐振频率与电网频率接近时)。主动式检测则通过向注入电流中加入微小扰动(如频率偏移、无功功率扰动、阻抗测量),造成孤岛后电压频率发生累积偏差,从而触发保护。其中,滑模频率偏移(Slip-Mode Frequency Shift)和主动频率漂移(Active Frequency Drift)应用较广,其扰动幅度需在检测有效性与谐波注入之间折中。为克服单一方法盲区,目前普遍采用多种主动与被动方法结合的混合检测策略,并引入通信辅助(如电力线载波)快速发出跳闸信号。在分布式高渗透场景下,多逆变器孤岛检测可能存在相互干扰——主动扰动相互抵消或叠加,需协调各逆变器的扰动信号相位或采用频分复用技术。

3.2 电网异常保护及标准符合性

电网异常保护涵盖过/欠电压、过/欠频率以及三相

不平衡等。按照GB/T 33593及IEEE 1547等标准,逆变器应在电压偏差超出允许范围(如 $U < 0.8\text{p.u.}$ 或 $U > 1.1\text{p.u.}$)时在规定时间内脱网。然而,随着新能源占比提升,标准逐渐放宽了LVRT要求,即在一定深度和时间范围内禁止脱网,这实质上将“保护脱网”转化为“穿越支撑”,需要保护逻辑具备区分瞬时故障与永久故障的能力。为此,保护定值需设置多级时间阈值:浅度且短时偏差仅触发告警并辅助穿越控制,深度或长时偏差才执行跳闸^[4]。频率异常保护类似,需结合电网频率变化率(RoCoF)快速判别功率不平衡,但RoCoF易受噪声干扰,需加装滤波和延时逻辑。对于三相电压不平衡,负序分量过大将导致逆变器电流畸变和温升,通常设定负序电压超过2%即启动保护,但在不对称穿越期间,保护应暂时闭锁负序跳闸,改为负序抑制控制。

3.3 逆变器本体保护与冗余设计

除电网侧保护外,逆变器自身需具备完善的故障保护功能。直流侧过压保护源于光伏组件开路或MPPT超调,需设置母线电压上限,达到阈值后触发刹车电阻泄放或关闭前级变换器。直流过流保护则依靠霍尔传感器检测,配合快速熔断器实现硬件切断。功率开关器件(IGBT或SiC MOSFET)的过流和短路保护最为关键,通常采用检测管压降的退饱和和保护,响应时间需在数微秒内,以阻止短路电流损坏芯片。同时,散热器温度监测用于过热保护,超温时降低开关频率或停机。此外,交流侧输出过流保护需与电网故障保护协同,当外网短路造成逆变器过流时,不应立即封锁脉冲而应优先执行LVRT无功注入,仅在电流超过硬件极限且持续一定时间后封锁。冗余设计方面,可在控制器中设置双通道采样和逻辑互锁,防止单一传感器失效导致误动或拒动。保

护动作后的故障记录和自恢复功能也日益重要,瞬时故障可尝试自动重合闸,永久故障则需人工复位。

4 结语

分布式光伏并网逆变器的控制与保护并非孤立的技术域,而是紧密耦合、相互制约的有机整体。本文从拓扑结构出发,系统论述了MPPT、并网电流控制、LVRT等控制策略的核心机理,剖析了孤岛检测、电网异常保护及本体保护的技术原理,并着重分析了二者在故障场景下的时序冲突与协调途径,提出通过自适应参数切换、状态机设计和优先级管理实现协同。进一步,展望了VSG、人工智能和数字孪生为控制保护一体化带来的新机遇。可以预见,未来的逆变器将不再是被动执行控制或保护指令的执行器,而是具备环境感知、自主决策和自适应调节能力的智能终端。实现这一愿景,需要控制理论与保护工程深度融合,并在标准化层面推动控制与保护协同设计纳入并网规范。本文的理论分析为相关研究和工程实践提供了系统性参考框架。

参考文献

- [1]王高林,张兴,赵仁德.弱电网下分布式光伏逆变器控制稳定性分析与改进[J].电力系统自动化,2022,46(3): 178-186.
- [2]曾正,汤胜清,杨欢.LCL型并网逆变器有源阻尼与谐振抑制统一控制策略[J].中国电机工程学报,2023,43(7): 2678-2689.
- [3]马明,徐德鸿,孙耀杰.光伏并网逆变器低电压穿越控制的正负序协调方法[J].电网技术,2021,45(11): 4389-4397.
- [4]周林,张密,郭珂.主动频移法孤岛检测的动态扰动优化研究[J].电工技术学报,2022,37(19): 4892-4902.