

分布式光伏逆变器控制策略优化研究

王 健 潘畴宇

中国华电集团贵港发电有限公司 广西 贵港 537100

摘要: 分布式光伏逆变器作为光伏系统核心设备,控制策略优化对提升系统性能意义重大。当前控制策略在功率控制、电压频率调节、抗干扰能力及能量转换效率方面存在局限。研究提出从功率控制、电压频率协同控制、抗干扰控制及能量转换效率提升等方向进行优化,并给出控制算法改进、参数优化设计及多目标协同控制等关键技术支撑,为分布式光伏逆变器控制策略优化提供理论参考。

关键词: 分布式光伏逆变器;控制策略优化;功率控制;电压频率调节;抗干扰能力

引言:在全球能源转型背景下,分布式光伏发电凭借清洁、可再生等优势,应用规模持续扩大。分布式光伏逆变器作为连接光伏阵列与电网的关键枢纽,其控制策略直接影响系统发电效率、电能质量及稳定性。然而,现有控制策略在应对复杂工况时暴露出诸多问题,难以满足分布式光伏大规模接入电网的需求。因此,深入探究分布式光伏逆变器控制策略优化方向,具有重要的理论价值与现实意义。

1 分布式光伏逆变器核心结构与控制基础

1.1 分布式光伏逆变器拓扑结构

分布式光伏逆变器作为连接光伏阵列与电网的关键设备,其拓扑结构直接影响电能转换效率与系统可靠性。当前主流拓扑可划分为隔离型与非隔离型两大类别^[1]。隔离型拓扑通过高频变压器实现电气隔离,有效阻断直流侧与交流侧的直接耦合,提升系统安全性,典型结构包括双级式与单级式。双级式结构由前级DC/DC变换器与后级DC/AC逆变器组成,前级负责最大功率点跟踪(MPPT)与电压适配,后级完成并网电流控制,两级独立设计便于参数优化,但器件数量增加导致成本与损耗上升。单级式结构将MPPT与并网控制集成于单一DC/AC环节,通过复杂调制策略实现功能协同,具有结构紧凑、效率高的优势,但对控制算法设计要求严苛。非隔离型拓扑省略变压器环节,直接通过功率器件完成电能转换,显著降低系统体积与成本,但需解决直流分量注入与漏电流问题,常见结构如Heric、H5等拓扑通过改进开关管配置,在效率与安全性间取得平衡。

1.2 逆变器控制核心原理

分布式光伏逆变器的控制核心在于实现直流电能到交流电能的精准转换,同时满足并网规范对电压、频率、相位及电能质量的要求。控制原理可分解为三个层级:底层为功率器件的开关控制,通过脉冲宽度调制(PWM)技

术生成驱动信号,调节输出电压波形;中层为闭环反馈控制,基于传感器采集的电流、电压信号,通过比例积分(PI)或比例积分微分(PID)控制器调整开关频率,实现输出量跟踪参考值;顶层为策略决策层,根据系统运行状态与环境条件选择控制模式,如并网模式下的单位功率因数控制或离网模式下的电压频率支撑。三层次控制通过实时数据交互形成动态闭环,确保逆变器在光照波动、负载变化等工况下稳定运行。

1.3 现有控制策略的核心构成

现有控制策略以经典控制理论与现代控制方法为基础,形成多元化技术体系。电流控制策略作为并网逆变器的核心,包含直接电流控制与间接电流控制两类。直接电流控制通过快速调节输出电流相位与幅值,实现与电网电压的同步,典型方法如电压定向控制(VOC)与直接功率控制(DPC),具有动态响应快、精度高的特点;间接电流控制通过调节输出电压间接控制电流,结构简单但依赖系统参数准确性,抗干扰能力较弱。功率控制策略聚焦于光伏阵列的能量捕获效率,最大功率点跟踪(MPPT)算法通过实时监测阵列输出特性,动态调整工作点,常见方法如扰动观察法、电导增量法及基于模糊逻辑的智能算法,各方法在收敛速度、稳态精度与复杂度间存在权衡。此外,针对分布式系统的多机协调需求,分层控制策略通过主从式或对等式架构实现功率均衡与故障隔离,提升系统整体稳定性。

2 分布式光伏逆变器现有控制策略存在的问题

2.1 功率控制层面的局限

现有功率控制策略在应对复杂工况时存在显著不足。传统最大功率点跟踪(MPPT)算法多基于局部搜索机制,扰动观察法与电导增量法在单峰功率曲线场景下表现稳定,但面对局部阴影或组件参数失配引发的多峰特性时,易陷入局部最优解,导致功率捕获效率下降。部分改进

算法通过引入全局搜索策略提升多峰场景适应性,却因计算复杂度增加导致动态响应迟缓,难以兼顾收敛速度与稳态精度^[2]。此外,功率控制与并网电流控制的解耦设计虽简化控制架构,却忽视了两者的强耦合关系,在光照突变或负载跳变时易引发功率振荡与电流畸变。

2.2 电压与频率调节的不足

电压与频率调节策略对电网扰动与系统参数变化的适应性有待提升。传统下垂控制通过模拟同步发电机特性实现多机并联,但固定下垂系数设计难以平衡功率分配精度与动态响应速度,在弱电网或线路阻抗差异较大场景下易出现环流问题。虚拟同步机(VSG)技术虽能提供惯性支撑,其参数整定依赖电网强度先验知识,在电网结构动态变化时可能引发频率二次跌落。电压调节方面,传统PI控制器对非线性负载的谐波补偿能力有限,需叠加多次谐波提取环节,增加控制复杂度且影响实时性。

2.3 抗干扰能力的短板

现有控制策略对环境干扰与系统故障的鲁棒性存在明显短板。强光照突变或温度骤变会导致光伏阵列输出特性急剧变化,传统线性控制方法因模型参数固定难以快速跟踪动态过程,引发输出功率超调或振荡。电网电压跌落或频率偏移时,部分控制策略缺乏快速重构能力,需依赖附加保护电路实现低电压穿越,增加系统成本与体积。此外,数字控制实现的量化误差与采样延迟在高频开关场景下被放大,可能引发控制信号失真与系统失稳。

2.4 能量转换过程中的薄弱环节

能量转换效率受制于控制策略与硬件特性的匹配程度。软开关技术通过零电压/零电流开关降低开关损耗,其实现依赖精确的时序控制与参数设计,现有控制策略对器件寄生参数与布局走线的敏感性分析不足,导致软开关范围受限。多电平逆变器的电容电压平衡控制多采用分层调节机制,在负载不对称或调制比变化时易出现电压偏移,影响输出波形质量与系统寿命。能量管理策略对储能单元的充放电调度缺乏动态优化,在可再生能源出力与负载需求波动时,难以实现能量供需的精准匹配。

3 分布式光伏逆变器控制策略优化方向

3.1 功率控制策略优化

传统功率控制策略在应对复杂光照条件与负载动态变化时存在明显局限,优化方向需聚焦于智能感知与自适应调节能力的提升^[3]。可引入基于深度学习的光照强度预测模型,通过分析历史气象数据与实时天空成像信息,构建高精度短期功率预测系统,为最大功率点跟踪(MPPT)算法提供前瞻性指引,减少因光照突变引发的功率振荡。针对多峰功率曲线场景,开发混合智能优化

算法,将模糊逻辑的快速收敛特性与粒子群优化的全局搜索能力相结合,设计动态权重调整机制,在搜索初期扩大步长以快速逼近全局最优,后期缩小步长以提高定位精度。此外,探索功率控制与并网电流控制的深度耦合设计,通过构建包含功率约束的统一优化模型,利用模型预测控制(MPC)框架实现多目标协同优化,在提升功率捕获效率的同时改善电能质量。

3.2 电压与频率协同控制优化

电压与频率调节需突破传统解耦控制框架,构建动态耦合补偿机制以适应弱电网与高比例新能源接入场景。基于虚拟阻抗的改进下垂控制可通过引入电网强度感知模块,动态调整下垂系数与虚拟阻抗值,在强电网时采用小下垂系数保证功率分配精度,在弱电网时增大虚拟阻抗以抑制环流。针对虚拟同步机(VSG)技术,设计参数自适应调整策略,根据频率偏差幅度与变化率实时切换惯性时间常数与阻尼系数,在频率跌落初期提供强惯性支撑,后期逐步恢复阻尼特性以避免过冲。结合分布式协同控制思想,开发多逆变器间的电压频率一致性协议,通过邻域通信实现局部信息交互,在通信延迟与丢包场景下仍能维持系统稳定运行。

3.3 抗干扰控制策略优化

抗干扰能力提升需从控制算法鲁棒性与系统冗余设计双维度展开。滑模控制因其对参数扰动与外部扰动的不敏感性,可替代传统PI控制实现电流环的快速无超调跟踪,通过设计指数趋近律与动态边界层厚度调整机制,在保证抖振抑制效果的同时提升动态响应速度。针对电网电压谐波干扰,开发基于快速傅里叶变换(FFT)的谐波实时监测模块,结合前馈补偿技术生成对应谐波抵消信号,降低对硬件滤波电路的依赖。对于数字控制实现的采样延迟问题,可采用相位超前补偿与预测控制策略,通过构建系统离散模型提前计算控制量,补偿时间延迟对系统稳定性的影响,同时引入扰动观测器对模型误差进行在线修正。

3.4 能量转换效率提升相关控制优化

能量转换效率优化需深入挖掘控制策略与硬件特性的协同潜力。针对软开关技术,设计基于实时参数辨识的时序优化算法,通过在线监测器件结温与寄生电容变化,动态调整死区时间与驱动信号相位,扩展零电压开关(ZVS)实现范围并降低开关损耗。多电平逆变器的电容电压平衡控制可采用混合调制策略,结合载波移相与空间矢量调制的优势,在降低开关频率的同时实现电压均衡^[4]。储能单元充放电管理可引入双层优化框架,上层基于电价信号与可再生能源出力预测制定日间充放电

计划,下层通过实时功率分配算法响应分钟级功率波动,结合超级电容器与电池的混合储能系统设计,实现能量转换与存储的全周期效率提升。

4 控制策略优化的关键技术支撑

4.1 控制算法的改进思路

控制算法改进需突破传统线性控制框架,引入非线性与智能控制理论以提升复杂场景适应性。模型预测控制(MPC)通过构建系统动态模型,将控制问题转化为多步优化问题,可同时处理功率跟踪、电压调节与电流谐波抑制等多目标约束,其滚动优化机制能有效对光照突变与负载跳变。滑模控制凭借对参数扰动与外部扰动的不敏感性,在电流环控制中展现出快速响应特性,通过设计动态边界层与指数趋近律,可在保证鲁棒性的同时降低高频抖振。针对多峰功率曲线场景,混合智能算法将模糊逻辑的快速收敛特性与粒子群优化的全局搜索能力相结合,通过动态权重调整机制实现搜索效率与精度的平衡。此外,深度学习技术可应用于光照强度预测与系统故障诊断,通过构建卷积神经网络(CNN)或长短期记忆网络(LSTM)模型,从历史数据中提取特征模式,为控制策略提供前瞻性决策依据。

4.2 控制参数的优化设计方法

控制参数优化需兼顾稳态精度与动态响应速度,避免经验试凑法导致的局部最优问题。基于粒子群优化(PSO)的参数整定方法通过模拟群体智能行为,在解空间内进行全局搜索,可快速定位最优参数组合,其自适应惯性权重设计能平衡探索与开发能力。针对多参数耦合场景,可采用差分进化算法(DE)实现并行优化,通过变异、交叉与选择操作逐步逼近全局最优解。为提升优化效率,可结合灵敏度分析技术,识别对系统性能影响显著的关键参数,缩小优化变量维度。此外,在线参数自适应调整机制能根据系统运行状态动态修正控制参数,如根据电网强度变化调整虚拟同步机(VSG)的惯性时间常数,或根据光照强度波动优化MPPT算法的扰动步长,实现控制性能的实时优化。

4.3 多目标协同控制的实现路径

多目标协同控制需构建统一的优化框架,平衡功率捕获、电能质量与系统效率等冲突目标。权重分配法通过为不同目标设定动态权重系数,将多目标问题转化为单目标优化,其权重调整策略可基于模糊逻辑或专家系统实现智能化设计。层次分析法(AHP)将目标分解为多级指标体系,通过两两比较确定各指标相对重要性,为权重分配提供量化依据^[5]。针对实时性要求高的场景,可采用帕累托最优前沿分析,生成非支配解集供决策者选择,或通过约束处理技术将次要目标转化为约束条件,简化优化问题复杂度。此外,分布式协同控制架构能实现多逆变器间的局部信息交互,通过邻域通信协议达成全局目标一致,在降低通信负担的同时提升系统可扩展性,适用于大规模光伏电站的集群控制场景。

结束语

分布式光伏逆变器控制策略优化研究,围绕功率控制、电压频率调节、抗干扰能力及能量转换效率提升等关键问题展开。通过改进控制算法、优化控制参数及实现多目标协同控制等关键技术支撑,可有效提升逆变器在复杂工况下的性能。这一研究为分布式光伏系统的稳定运行与高效发电提供了有力保障,有助于推动分布式光伏产业的进一步发展。

参考文献

- [1]薛川,续永,王瑛琪.分布式光伏逆变器新型电压振荡抑制控制策略研究[J].灯与照明,2025,49(2):193-195.
- [2]赵军,唐志远,高红均,等.考虑光伏逆变器多模式控制的分布式储能系统双层优化配置[J].电气工程学报,2024,19(4):72-86.
- [3]梁阳豆,凌武能,梁振成,等.分布式光伏并网逆变LCL型滤波器参数设计与控制策略优化[J].电气技术与经济,2025(3):385-388.
- [4]李涵深,鲁宇,刘文霞.考虑短时波动的分布式光伏逆变器鲁棒集中-就地控制策略[J].现代电力,2024,41(1):191-200.
- [5]朱阳,刘伟明,李宏.分布式光伏发电并网逆变器电压平衡控制技术[J].电力系统装备,2025(7):28-30.