

分布式控制在光伏发电技术中的应用

徐贵毅

四川省犍为县润锴新能源科技有限公司 四川 乐山 614400

摘要：为解决传统集中式光伏控制响应滞后、容错性差、适配性不足等问题，本文开展分布式控制在光伏发电系统中的应用研究。文章阐述光伏发电与分布式控制的基础理论，对比集中控制与分布式控制的运行差异，搭建分层分布式光伏控制架构。针对光伏追踪、并网稳压、功率调控及光储协同等关键环节，分析分布式控制的实际应用方式，并结合智能优化算法改进系统调控策略。研究表明，分布式控制可有效提升光伏系统发电效率与并网稳定性，增强复杂工况下的容错能力。

关键词：分布式控制；光伏发电；关键环节；技术应用；优化算法

引言：随着分布式光伏装机规模持续扩大，分散式并网数量不断增加，配电网潮流波动、电能质量偏移等问题日渐突出。传统集中式控制模式难以适配光伏出力随机性、工况复杂化的运行特征，存在调控精度低、抗干扰能力弱、扩容性差等短板，制约光伏系统高效并网消纳。为此，本文立足光伏实际运行场景，探究分布式控制在光伏发电各环节的应用机制，搭建分层控制架构，结合优化算法完善调控策略，旨在改善光伏系统运行性能，为分布式光伏稳定、高效运行提供技术支撑。

1 光伏发电与分布式控制核心理论基础

1.1 光伏发电系统工作原理与核心结构

光伏发电依托半导体光伏效应实现光能向电能的转化。太阳光照射光伏组件时，光子激发半导体内部电子形成自由电荷，在内建电场作用下定向移动产生直流电。该发电方式无机械传动结构，运行低噪、低能耗，适配各类场景。完整光伏发电系统由发电、电能调理、储能与并网四大单元组成。光伏组件通过串并联构成光伏阵列，提供基础发电功率。逆变器作为核心调控设备，负责将直流电转换为工频交流电，满足负载用电与并网标准。系统配套控制器、储能装置与保护设备，可实现电能输出调节、冗余电能存储与故障安全防护，保障系统长期稳定运行。

1.2 分布式控制的核心原理与技术特性

分布式控制打破传统单一中心控制器的管控模式，采用分散采集、就近调控、局部协同的工作机制，将控制权限下放至各终端发电单元。每个光伏单元配置独立控制模块，可自主完成本地数据采集、工况判断与参数

调节，无需依赖上位机统一指令。各单元通过局部通信实现协同运行，系统无绝对控制核心。该控制方式具备突出技术优势：（1）自主性强，终端可独立响应光照、负荷等工况动态变化；（2）扩展性好，可根据光伏阵列扩容、改造需求灵活增减控制单元；（3）容错性能优异，可自动隔离局部设备故障，避免单点异常影响整体系统运行，有效提升光伏系统运行稳定性。

1.3 分布式控制与传统集中式控制的差异化对比

传统光伏系统多采用集中式控制，由单一中心控制器统一完成数据采集、参数调节与并管网控，底层光伏单元仅负责发电，无自主调控能力。该方式结构简单、成本偏低，但不适用于规模化光伏阵列，存在中心算力压力大、响应滞后、容错性差等问题，单点故障易造成整套系统停运。二者核心差异体现在架构与性能上：集中式为“一对多”中心化管控，分布式为多单元分散协同管控；集中式依赖远程指令、响应速度慢，分布式依托就地调控，可快速适配工况波动、优化发电效率；集中式抗干扰与故障耐受能力弱，分布式可实现故障独立隔离，大幅降低系统停运风险^[1]。

2 光伏发电系统分布式控制整体架构设计

光伏发电系统采用分层分布式控制架构，摒弃传统集中式单一管控模式，以分层布局、单元独立、协同联动为核心设计原则，适配分布式光伏分散布局、多点发电的运行特征，整体架构分为三层结构，各层级功能独立、衔接紧密。（1）设备层。该层级为架构底层，以单组光伏阵列、逆变器、采集终端为基本单元。各发电设备配置独立就地控制模块，可独立完成本地运行数据采集、工况监测与基础参数调节，具备自主感知与独立

调控能力,是分布式控制的基础执行载体。(2)集群层。该层级为中间联动层级,负责区域内多光伏单元的统筹协同。针对同一片区的多个光伏设备,通过区域通信网络整合各单元运行数据,完成功率分配、运行状态同步与单元间协同调控,平衡片区内各发电单元的运行差异。(3)区域层。该层级为顶层管控层级,无强制中心化管控逻辑,仅负责全局状态监测与策略统筹。主要采集各集群运行数据,统筹全局运行参数,下发宏观调控策略,不干预底层单元的就地独立控制,有效降低管控延迟,提升系统整体稳定性与拓展性^[2]。

3 光伏发电关键环节的分布式控制技术应用

3.1 基于分布式策略的光伏 MPPT 最大功率追踪控制

针对传统集中式 MPPT 控制存在的组串失配、追踪精度低、功率损耗大等缺陷,分布式 MPPT 控制以单组光伏组串、单台逆变器为独立控制单元,通过就地感知、独立运算与自主调控的方式,适配光伏系统复杂运行工况,具体应用方式如下。(1)独立支路参数采集与单点追踪。分布式控制架构为每一路光伏组串配置独立的采样与控制模块,单独采集支路电压、电流实时参数,独立分析支路功率输出特性。相较于集中式整体平均采样方式,单点独立采样可精准捕捉单支路功率变化细节,规避不同组串性能差异带来的参数抵消问题,从控制层面消除统一追踪引发的精度偏差。(2)复杂工况下的差异化自适应调控。在屋顶光伏、山地光伏等场景中,组件局部遮挡、表面积灰、温度不均等问题普遍存在,各支路最大功率点偏移程度存在明显差异。分布式 MPPT 控制可依据各支路实际运行状态动态调整控制策略,光照稳定阶段采用小步长精准追踪,光照骤变工况下切换大步长快速迭代,有效适配差异化工况,解决集中式控制易出现的局部失配、功率塌陷等问题。(3)多支路并行优化与容错运行。各光伏支路 MPPT 追踪工作相互独立、互不干扰,单一支路组件老化、故障或性能衰减时,仅影响对应单元输出,不会干扰其余支路正常追踪运行。

3.2 光伏并网分布式电压与频率稳定控制

大规模分布式光伏低压分散并网会改变配电网原有潮流分布,易引发电压越限、频率波动、电能质量劣化等问题。传统集中式稳压调频响应链路长、滞后性显著,难以适配分散并网的动态扰动特征。分布式电压频率控制依托就地感知、就近调控、区域协同的模式,实现并网参数精细化治理,具体应用方式如下。(1)并网就地实时监测。各并网逆变器搭载独立电网参数采集单元,持续采集并网点电压、频率、相位等关键参数,

精准捕捉电网微小波动与异常偏移。终端可自主完成工况判定,无需依赖上层调度指令,大幅缩短信号处理与响应周期,实现电网扰动的快速感知。(2)就地快速稳压调频调节。针对配电网末端电压偏移、负荷低谷频率波动等常见问题,分布式控制单元依据本地电网参数偏差,自主调整逆变器输出幅值与频率,就近抵消局部功率失衡引发的参数波动。有效规避集中式调控通信延迟、指令滞后的弊端,快速平抑瞬时电网扰动,保证并网点参数稳定在合规运行区间。(3)多单元分区协同维稳。同一配电区域内的各光伏并网单元通过局部通信共享运行数据,形成区域协同调控集群。当区域光伏出力出现骤增、骤减波动时,各单元同步微调输出参数,分区平衡区域电网供需关系,弥补单一单元调控能力不足或调控过度的缺陷,抑制大范围电网电压、频率震荡,提升配电网整体运行稳定性^[3]。

3.3 分布式光伏有功无功功率协同调控技术

有功功率输出与无功功率补偿的动态平衡,是光伏并网系统安全高效运行的关键。传统集中式统一功率配比策略无法适配不同并网点的负荷与电网工况差异,易造成有功出力受限、无功补偿不足、线路损耗偏高等问题。分布式有功无功协同调控通过单元独立调控与区域协同优化,实现电网功率资源精准配置,具体应用方式如下。(1)有功功率动态精准分配。各光伏控制单元结合组件性能、实时光照强度与区域负荷水平,自主调整有功功率输出上限。在光照充足、负荷高峰期最大化释放发电功率;在电网负荷饱和、电压偏高时段适当限发,规避电网过载与电压越限风险,实现发电出力与负荷需求的动态匹配。(2)无功功率就地精准补偿。光伏逆变器具备动态无功调节能力,各终端单元可实时监测并网点电压偏差,自主完成无功功率的输出或吸收,实现就地无功补偿。相较于集中式统一补偿方式,该模式可精准定位局部无功缺额,缩短无功传输路径,有效降低配电网线路损耗,抑制节点电压偏移。(3)区域功率协同优化平衡。片区内各光伏单元实时共享有功、无功运行数据,依托分布式协同算法动态调整各单元功率配比,均衡不同并网点的功率负荷,改善单点过载、多点闲置的运行失衡问题,实现区域光伏系统有功高效发电、无功精准支撑的最优运行状态。

3.4 光储结合系统的分布式充放电优化控制

光伏发电的间歇性与随机性易造成电网功率波动、弃光率偏高等问题,储能系统的接入可实现电能时空平移,是平抑光伏出力波动的重要手段。传统集中式光储充放电策略统一性强,未考虑储能单元荷电状态、健

康状态的个体差异,易出现充放电不均、设备老化加速等问题。分布式充放电控制对各储能单元实施精细化管理,保障光储系统高效稳定运行,具体应用方式如下。(1)储能单元独立状态感知与判定。各储能模块配置独立控制终端,实时监测电池荷电状态、工作温度、输出电流及健康状态,结合本地光伏出力与负荷用电情况自主判定运行模式,为充放电策略调整提供精准数据支撑,杜绝盲目调控引发的设备损耗。(2)动态自适应充放电调控。系统依据实时运行工况切换工作模式,光伏出力过剩、电网负荷低谷阶段,储能单元就地充电,消纳冗余光伏电能,降低弃光率;光伏出力不足、用电高峰或电网扰动阶段,储能及时放电,弥补发电缺口,平抑系统功率波动,实现电能高效平移。(3)多储能单元协同均衡运行。各分布式储能单元通过局部信息交互同步运行状态,动态调整各模块充放电功率与时长,均衡整体工作负荷,避免单组电池过充过放、老化不均等问题。局部储能单元故障时,其余单元可自动补偿调控,保证光储系统持续运行,有效提升系统容错能力与设备使用寿命^[4]。

4 分布式光伏控制系统优化算法研究

为提升系统调控精度与运行稳定性,结合光伏实际运行工况,采用多种优化算法对分布式控制策略进行迭代优化,核心研究内容如下。(1)多智能体一致性协同控制算法。该算法将各光伏、储能单元映射为独立智能体,依托局部信息交互机制,摒弃传统集中式统一迭代模式。通过修正单元间状态偏差,实现多光伏单元输出功率、运行参数的动态一致,有效解决多单元运行不同步、出力失衡问题,适配大规模分布式光伏集群协同调控场景。(2)自适应下垂优化控制算法。针对传统下垂控制固定参数适配性差的缺陷,结合并网点电压、负荷波动及光伏出力状态,动态修正下垂系数。算法可根据实时工况自主调整功率调控比例,避免稳态偏差过大、

功率震荡等问题,提升分布式光伏并网调压调频的精准度。(3)动态参数智能整定算法。传统控制参数多为固定阈值,无法适配光照、温度、负荷的动态变化。该算法依托实时运行数据,自主迭代优化控制参数,完成MPPT追踪、功率调控、充放电控制参数的动态整定,弱化人工调试误差,提升系统自适应运行能力。(4)复杂工况抗干扰优化算法。针对阴雨、遮挡、负荷骤变及通信扰动等复杂工况,对基础控制算法进行抗干扰改良。通过数据滤波、偏差校正及故障容错迭代方式,抑制工况扰动与数据异常带来的调控偏差,提升分布式控制系统在复杂场景下的稳定性与可靠性^[5]。

结束语: 本文通过梳理光伏与分布式控制核心理论,完成分布式光伏控制架构设计,明确了MPPT追踪、并网稳压、功率协同及光储充放电等环节的分布式应用方案,并引入优化算法提升系统自适应能力。研究证实,分布式控制相较于传统控制模式,在工况适配、故障隔离、协同调控方面优势显著,可有效降低光伏功率损耗、稳定并网电能质量。

参考文献

- [1] 胡惠宁. 分布式控制在光伏发电技术中的应用探讨[J]. 新潮电子,2026(2):217-219.
- [2] 张温树. 分布式控制在光伏发电技术中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(8):190-193.
- [3] 赵永立. 分布式控制在光伏发电中的关键技术与实践探索[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(2):115-118.
- [4] 鹿春雨,李世君. 分布式电源协调控制在智能电网中的应用[J]. 电力设备管理,2026(3):142-144.
- [5] 王爱东. 分布式光伏发电系统电力接入方式与技术[J]. 光源与照明,2026(1):199-201.