

# 光伏发电系统对电力调控的影响

杜瑞宇<sup>1</sup> 张旭<sup>2</sup> 王波<sup>3</sup>

1. 商都县天润风电有限公司 内蒙古 乌兰察布 013400

2. 内蒙古库布其光氢治沙新能源有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017400

3. 三峡陆上新能源投资有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

**摘要:**光伏发电系统对电力调控影响显著。其输出功率受光照、温度等影响,具有间歇性与波动性,增加实时功率平衡难度,改变调峰能力需求。对电压与频率稳定性构成挑战,导致电压波动、闪变及频率调节能力下降。同时,影响继电保护与故障处理,改变故障电流特征,引发孤岛效应。此外,还促使电力调度模式向市场化转型,需构建多元参与机制以适配光伏特性。

**关键词:**光伏发电系统;电力调控;影响

**引言:**在全球能源转型与“双碳”目标驱动下,光伏发电凭借清洁、可再生优势,装机规模持续攀升。然而,光伏出力高度依赖光照、温度等自然条件,具有显著的间歇性、波动性与不确定性。这种特性与传统电力系统“源随荷动”的稳定运行模式形成冲突,给电力实时平衡、电压频率稳定、继电保护及调度策略带来严峻挑战。

## 1 光伏发电系统特性分析

### 1.1 光伏发电的基本原理与技术分类

(1) 光伏效应与组件工作原理:光伏发电核心是光伏效应,当太阳光照射半导体PN结时,光子能量激发电子跃迁,形成电子-空穴对,在内建电场作用下分离,两端产生电势差,外接电路形成电流。组件由多个光伏电池串联/并联构成,电池片常用单晶硅、多晶硅等材料,通过封装层(玻璃、EVA胶膜)保护,确保长期稳定吸收光能并转化为电能。(2) 集中式与分布式光伏系统的区别:集中式规模大(万千瓦级以上),多建在荒漠、荒地,需高压输电并网,依赖大型逆变器,发电集中但受地域限制;分布式规模小(千瓦至兆瓦级),多安装于建筑屋顶、厂房,就近消纳,采用组串式逆变器,灵活性高,可缓解配电网压力,但布局分散、管理难度较大。

### 1.2 光伏发电的输出特性

(1) 功率输出的间歇性与波动性:输出功率受光照强度(云层遮挡、昼夜变化)、温度(温度升高会降低组件转换效率)、天气(阴雨、沙尘)影响显著。白天功率随日照增强上升,正午达峰值,傍晚下降,夜间为零;短时间内云层移动会导致功率骤升骤降,波动幅度可达额定功率的30%-50%。(2) 预测误差对电力调控的影响:当前光伏功率预测依赖气象数据,短期(1-3小

时)预测误差约5%-15%,中长期误差更大。误差会导致电网供需失衡,若预测功率高于实际,可能造成电力缺口,需启动备用电源;若低于实际,多余电能可能冲击电网,影响频率稳定<sup>[1]</sup>。

### 1.3 光伏发电的集群化效应

(1) 大规模光伏电站的时空分布特性:空间上,集群电站多集中于光照资源丰富的区域(如西北戈壁),电站间距离较远,需构建跨区域输电网络;时间上,受太阳辐射周期性影响,集群发电高峰集中在上午10点至下午4点,与用电高峰(如晚高峰)存在时间差,需通过储能系统调节。此外,不同电站受局部天气影响,发电功率存在差异,可通过集群调度降低整体波动性。(2) 集群化对电网稳定性的挑战:集群电站输出功率大且波动频繁,会导致电网电压、频率波动加剧,尤其在并网点,易引发电压暂降或升高;集群电站依赖电力电子设备(如逆变器),其控制策略复杂,若设备故障或控制不当,可能引发电网振荡;此外,集群电站集中输出时段,若输电线路容量不足,会导致功率拥堵,影响电网安全运行,需升级电网基础设施并优化调度策略。

## 2 光伏发电对电力调控的影响机制

### 2.1 对电力平衡的影响

(1) 实时功率平衡的挑战:光伏发电受光照、温度等自然因素影响,出力存在显著不确定性—短时间内云层遮挡可能导致功率骤降30%-50%,而晴空突变又可能使功率快速攀升,这种波动难以通过传统预测手段完全精准把控。在实时电力调控中,需维持“发电功率=用电功率+网损”的动态平衡,而光伏出力的随机性会打破这一平衡:若实际出力低于预测值,将出现电力缺口,需紧急调用备用电源填补;若实际出力高于预测值,多

余电能无法及时消纳,会造成电网“供大于求”,加剧电力平衡调控难度,尤其在负荷低谷时段,供需失衡风险更高<sup>[2]</sup>。(2)调峰能力需求的变化:传统电力系统中,火电是调峰主力,通过调整机组出力匹配负荷波动。但光伏发电大规模接入后,其白天高峰出力会挤压火电发电空间,导致火电机组常处于低负荷运行状态;而傍晚光伏出力骤降时,负荷却进入晚高峰,需火电快速提升出力以满足需求,形成“早降晚升”的调峰模式。这种模式下,火电机组频繁启停、低负荷运行,不仅增加燃料消耗与设备损耗,还可能因机组响应速度不足(如高温高压机组启动需数小时),无法及时应对光伏出力的快速波动,进一步放大调峰压力,甚至影响电力系统整体供电可靠性。

## 2.2 对电压与频率稳定性的影响

(1)电压波动与闪变问题:分布式光伏多接入10kV及以下配电网,其出力波动会直接影响配电网电压:当光伏出力骤增时,接入点电压会因功率注入而升高,可能超出《电能质量供电电压偏差》规定的 $\pm 7\%$ 范围;当出力骤降时,电压又会快速跌落,形成电压波动。若分布式光伏渗透率较高(如超过20%),且接入点集中,波动频率会显著增加,甚至引发电压闪变—即灯光明暗交替,影响居民用电体验与工业设备正常运行,尤其对精密制造、医疗等对电压敏感的行业影响更大。(2)频率调节能力下降:传统火电、水电机组具有旋转惯性,当电网频率偏离额定值(如我国50Hz)时,机组可通过惯性释放或吸收能量,实现短时间内的频率稳定,即“惯性响应”。但光伏发电依赖逆变器接入电网,逆变器无旋转惯性,无法提供惯性响应,导致电网惯性显著降低—当出现大功率缺额(如大型机组跳闸)时,频率下降速度会从传统的0.1-0.2Hz/s加快至0.5-1Hz/s,留给调控系统的反应时间大幅缩短。同时,多数光伏逆变器未配置一次调频功能,无法在频率偏差时主动调整出力,导致电网一次调频能力不足,需依赖二次调频(如调度中心指令调整机组出力)弥补,进一步增加频率调控难度<sup>[3]</sup>。

## 2.3 对继电保护与故障处理的影响

(1)故障电流特征变化对保护装置的适应性挑战:传统配电网为辐射状网络,故障电流仅由电源侧(如变电站)提供,大小稳定,继电保护装置(如过流保护、速断保护)可基于固定电流阈值实现精准动作。但分布式光伏接入后,故障时光伏系统会向故障点注入反向故障电流,导致故障电流大小、方向发生变化:一方面,故障电流可能因光伏注入而增大,导致保护装置“过保护”(提前动作);另一方面,若光伏渗透率较高,反

向电流可能抵消电源侧电流,使故障电流小于保护阈值,导致保护装置“拒动”。此外,光伏逆变器的故障电流具有“非正弦性”(含大量谐波),可能干扰保护装置的电流采样精度,进一步降低保护可靠性<sup>[4]</sup>。

(2)分布式光伏的孤岛效应与防孤岛保护需求:“孤岛效应”指电网因故障断电后,分布式光伏仍向局部电网(如某一小区、工厂)供电,形成独立“孤岛”的现象。孤岛运行时,局部电网电压、频率难以稳定,可能超出设备耐受范围,导致用户设备损坏;同时,若电网恢复供电时,孤岛电压与电网电压相位、频率不一致,会产生巨大冲击电流,损坏光伏逆变器与电网设备,甚至威胁检修人员安全。因此,分布式光伏必须配置防孤岛保护装置,通过检测电压、频率偏差或阻抗变化,在孤岛形成前0.5-2秒内快速切断光伏与电网的连接,确保电网故障处理安全。

## 2.4 对电力市场与调度模式的影响

(1)传统调度模式的局限性:传统电力调度为“计划驱动”模式,提前24小时依据历史负荷数据与预测值制定机组发电计划,指令计划性强。但光伏发电实时波动与该模式矛盾突出:一是计划制定时光伏短期预测误差(5%-15%)会导致实际出力与计划偏差,需频繁调整指令,增加调度工作量;二是传统调度遵循“源随荷动”(发电适配负荷),而光伏需“荷随源动”(负荷适配发电),调度逻辑不匹配会降低资源配置效率,甚至引发供需失衡,如计划光伏出力高但实际不足时,需调用高价备用电源,增加供电成本<sup>[5]</sup>。(2)市场化机制下的光伏参与方式:为适配光伏特性,电力市场需构建多元参与机制。辅助服务市场中,光伏电站配储能可提供调峰、调频服务,如电网频率下降时储能释能补功率缺额以获收益,部分地区还试点“光伏+储能”参与备用服务,提升电网灵活性;绿证交易方面,光伏每发1MWh电获1个绿证,企业购绿证可抵消碳排放,既为光伏开辟额外收益渠道,也推动绿色电力消费。

## 3 电力调控应对光伏发电的关键技术

### 3.1 预测技术

(1)光伏功率预测方法:物理模型基于太阳辐射理论,结合气象数据(光照、温度)与光伏组件参数(转换效率、倾角)计算出力,适用于长期预测;统计模型依托历史出力数据,通过机器学习(如LSTM、ARIMA)挖掘数据规律,短期预测精度更高;混合模型融合两者优势,先以物理模型确定基础趋势,再用统计模型修正误差,当前主流预测场景中,混合模型短期(1-3小时)精度可达85%以上。(2)预测精度提升对调

控策略的优化作用：预测精度从70%提升至90%时，电网备用电源调用频率可降低40%，减少火电启停损耗；精准预测能提前制定光伏消纳计划，如引导储能预测出力低谷前充电、高峰前放电，提升储能利用效率；同时为跨省跨区调度提供依据，避免光伏出力过剩时的弃光现象，2024年我国部分光伏基地因预测精度提升，弃光率已降至2%以下。

### 3.2 储能技术

(1) 储能系统在平滑出力波动中的作用：当光伏出力骤升时，储能系统吸收多余电能，避免电网电压升高；出力骤降时，储能快速释放电能，填补功率缺口，通常可将1分钟内的功率波动幅度从 $\pm 30\%$ 抑制至 $\pm 5\%$ 以内。例如，青海某光伏电站配置200MW/400MWh储能后，出力波动标准差降低68%，满足电网并网要求。

(2) 储能配置与调度策略：锂离子电池储能适用于中长时间（1-4小时）调峰，通常按光伏装机容量的15%-20%配置；飞轮储能响应速度快（毫秒级），适合平抑短时（秒级）波动，多与锂电储能搭配使用。调度上采用“预测-优化”模式：早间根据光伏预测曲线，指令储能在9:00前完成充电，12:00-14:00光伏高峰时放电，晚间配合火电调峰。

### 3.3 柔性调控技术

(1) 需求响应（DemandResponse）在负荷侧的调节作用：通过电价激励（如峰谷电价、实时电价）引导用户调整用电行为，光伏高峰时（如12:00-14:00），工业用户启动高耗能设备（如电解铝、数据中心），居民开启电动汽车充电、热水器等，增加负荷消纳；低谷时减少非必要用电，2024年江苏需求响应项目单次可消纳光伏surplus电力500MW以上。(2) 可中断负荷与虚拟电厂（VPP）的协同调控：将工业可中断负荷（如钢铁厂轧机）、分布式光伏、储能聚合为VPP，电网调度中心通过VPP平台下发调控指令—当光伏出力不足时，VPP切除部分可中断负荷；出力过剩时，VPP组织储能充电、用户增容，实现负荷与光伏出力的动态匹配。

### 3.4 智能电网技术

(1) 先进量测体系（AMI）与实时数据采集：AMI通过智能电表、光伏逆变器监测终端，实现用户用电、光伏出力数据的秒级采集与上传，数据传输时延小于100ms；结合气象站、无人机巡检数据，构建“光伏-负荷-气象”多维数据库，为功率预测、调度决策提供实时数据支撑。(2) 分布式能源管理系统（DERMS）的架构与功能：DERMS采用“云-边-端”架构，云端负责全局优化（如区域光伏消纳计划），边缘节点（如配电站）处理本地调控（如电压调节），终端设备（如逆变器）执行控制指令；核心功能包括分布式光伏并网控制、负荷优化分配、故障快速定位，2025年我国部分城市试点DERMS后，配电网光伏接纳能力提升30%。

### 结束语

光伏发电系统的规模化接入，为电力调控带来了前所未有的挑战与机遇。其出力特性虽增加了平衡难度、威胁稳定运行，但也推动了预测、储能、柔性调控及智能电网等关键技术的创新发展。未来，随着技术迭代与市场机制的完善，光伏发电将更好地融入电力系统，实现与负荷、其他能源的动态匹配。唯有持续突破技术瓶颈、优化调控策略，才能充分释放光伏潜力，助力构建安全、高效、绿色的新型电力系统。

### 参考文献

- [1]许成哲.大规模光伏发电对电力系统的影响和优化对策[J].光源与照明,2023,(02):109-111.
- [2]张迪.光伏发电对电力系统的影响及策略[J].光源与照明,2022,(10):116-118.
- [3]赵灿,孙后中,李飞.光伏发电对电力系统的影响及管控措施[J].农村电工,2022,(10):30-31.
- [4]贺红军.新能源发电和分布式发电对电力系统的影响分析[J].光源与照明,2022,(08):159-161.
- [5]刘长晓.光伏发电系统对电力调控的影响[J].科技资讯,2021,(16):40-41.