

# 光伏电站并网对电网稳定性影响的分析与对策探讨

郭铭钰

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江 杭州 311122

**【摘要】**：在全球推进能源结构转型的背景下，光伏电站大规模并网成为趋势，但其对电网稳定性的影响不容忽视。光伏出力受自然条件影响，具有显著的随机性和间歇性，这会导致电网电压波动、频率偏差，降低系统暂态稳定裕度。高渗透率下，还可能引发继电保护误动、潮流分布异常等问题。为应对这些挑战，需从技术和管理两方面着手，如改进光伏逆变器控制方式、合理配置储能系统、建立智能化调度机制以及健全并网规范等。通过这些措施的综合应用，可减轻光伏并网对电网的不利影响，保障高比例可再生能源电力系统稳定运行。

**【关键词】**：光伏并网；电网稳定性；出力特性；应对措施

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.012

## 引言

阳光赋予的清洁电力持续涌入电网，能源转型正深刻改变着电力系统的格局。光伏电站的出力却如多变的天气，随光照强弱大幅波动，给长期适应稳定电源的电网带来新的考验。电压的骤然变化、频率的微小失衡，在高比例接入的情况下，可能演变成威胁供电安全的隐患。深入探究其中的影响机制，找出有效的解决办法，成为推动能源转型、保障电网安全运行的关键环节。

## 1 光伏电站并网对电网稳定性的主要影响表现

### 1.1 电压稳定性破坏

光伏电站并网运行时，其出力的随机性易引发接入点及周边电网的电压波动与闪变。光伏阵列受云层遮挡、光照强度突变等因素影响，输出功率会在短时间内出现较大幅度变化，导致接入点电压产生偏离额定值的波动。当波动幅度超过允许范围时，会影响用户端用电设备的正常运行，尤其对精密制造、医疗等对电压敏感的行业造成不利影响。此外，分布式光伏的分散接入改变了传统配电网的辐射状潮流分布，可能在部分线路形成反向潮流，使电压调节难度增大，甚至出现电压越限现象，降低电网电压稳定性。

### 1.2 频率调节难度增加

电网频率稳定依赖于有功功率的实时平衡，传统同步发电机具有较强的惯性和一次调频能力，可快速响应有功功率缺额。光伏电站通过逆变器接入电网，其静态特性与同步发电机存在本质差异，不具备旋转惯性，无法提供天然的频率支撑。当光伏出力骤减或负荷突变时，电网有功功率平衡被打破，频率会出现偏差。在高渗透率场景下，光伏出力波动对系统有功功率的干扰更为显著，可能导致频率偏差超出安全阈值。同时，大量逆变器的快速响应特性可能引发次同步振荡，进一步加剧频率不稳定风险，增加电网频率调节的复杂性。

### 1.3 暂态稳定裕度降低

暂态稳定是指电网在遭受短路故障、线路跳闸等大扰动

后，保持同步运行的能力。光伏电站的接入改变了系统的短路电流水平和故障后的功率特性。故障发生时，光伏逆变器会根据故障电压跌落程度进入低电压穿越或脱网状态，导致系统有功功率支撑突然变化。若大量光伏机组在故障时集中脱网，将造成系统有功功率骤降，加剧暂态功角摇摆，降低系统暂态稳定裕度。此外，光伏电站的短路电流特性与传统电源不同，其故障电流幅值和相位受逆变器控制策略影响，可能使故障后的潮流分布发生异常，导致同步发电机功角差增大，增加系统失步风险。

## 2 光伏出力特性与电网稳定性问题的关联机制

### 2.1 出力随机性与电压波动的内在联系

光伏出力的随机性源于光照强度的不可预测变化，云层移动、大气散射等自然因素会导致光伏阵列实时输出功率在短时间内发生无规律波动。这种波动通过逆变器传入电网后，会改变接入点的无功功率平衡状态。当光伏出力突然增加时，逆变器输出的无功支撑能力随之变化，可能引发接入点电压骤升；而当光照急剧减弱导致出力下降时，电压又会出现骤降。在配电网中，线路阻抗以感性为主，有功功率波动引发的电压变化更为显著，尤其在长距离配电线路末端，这种电压波动会被放大，超出电网电压允许偏差范围，直接影响用户侧用电设备的稳定性。

### 2.2 出力间歇性与频率调节的动态耦合

光伏出力的间歇性表现为长时间尺度内的出力波动，如昼夜交替导致的出力周期性消失、连续阴雨天造成的低功率输出等。这种特性与电网负荷的动态变化形成复杂耦合关系，打破了传统电力系统中电源与负荷的稳定平衡模式。传统同步发电机可通过调节汽门、水门开度实现有功功率的连续调整，而光伏电站无法主动参与频率调节，当间歇性出力与负荷需求出现较大差值时，系统备用容量需快速响应以填补功率缺口。若备用容量不足或响应延迟，电网频率会偏离额定值，在高渗透率场景下，这种频率偏差可能引发频率保护动作，导致部分机组

或负荷切除，进一步扩大系统扰动。

### 2.3 出力波动性与暂态稳定的相互作用

光伏出力的波动性体现在分钟级至小时级的功率快速变化，这种变化会对电网暂态稳定产生累积性影响。当系统遭受短路故障等大扰动时，光伏电站的波动出力会加剧故障后的功率失衡。例如，故障发生瞬间若光伏出力处于上升阶段，逆变器的电流限制策略可能导致其输出功率突然受限，使系统失去部分有功支撑；而若出力处于下降阶段，故障后的功率恢复过程会因光伏出力的持续波动变得更加复杂。此外，波动的出力会改变系统的惯量分布，降低电网对扰动的承受能力，使暂态功角稳定裕度下降，增加同步发电机失步的风险。

### 2.4 出力反调特性与潮流反转的关联逻辑

在高渗透率场景下，光伏出力可能呈现反调特性，即其出力变化趋势与负荷需求变化趋势相反。例如，正午时分负荷需求较低，但光伏出力达到峰值，导致大量电力需通过输电线路倒送；而傍晚负荷高峰来临时，光伏出力却因日落急剧下降，需依赖其他电源快速补能。这种反调特性会导致电网潮流方向频繁反转，改变线路的功率传输状态。潮流反转不仅会使线路损耗发生变化，还会影响变压器分接头的调节效果，导致电压控制难度增加。同时，潮流的剧烈变化会使继电保护装置的动作阈值与实际运行状态不匹配，降低保护系统对故障的正确识别能力，增大误动或拒动的可能性。

## 3 提升光伏并网电网稳定性的技术优化路径

### 3.1 逆变器控制策略升级

逆变器作为光伏电站与电网连接的核心设备，其控制策略优化是提升并网稳定性的关键。通过改进逆变器的下垂控制算法，引入虚拟惯量模拟环节，使逆变器在频率波动时呈现类似同步发电机的惯性响应特性，同时调整一次调频系数，缩短频率恢复时间，增强系统频率支撑能力。采用虚拟同步机技术，通过模拟同步发电机的转子运动方程和励磁调节特性，使逆变器具备自主维持电压和频率稳定的能力，在光照突变导致出力波动时，快速输出补偿电流抑制电压偏差，降低对电网的冲击。同时，优化低电压穿越控制逻辑，设计多层级电流限制策略，在电网发生短路故障时，确保逆变器在电压跌落期间保持并网运行，避免大规模脱网引发的功率失衡，为系统暂态稳定提供持续支撑。

### 3.2 储能系统协同配置

储能系统的合理配置可有效平抑光伏出力的随机性和间歇性。采用锂电池、钒液流电池等储能技术，结合模型预测控制算法，实时跟踪光伏出力波动趋势，通过毫秒级充放电响应，将光伏出力波动幅度控制在电网可承受范围内，减少对输电线路潮流的冲击。在分布式光伏接入的居民区和工业园区，配置千瓦级分布式储能设备，就近吸收瞬时过剩功率，降低配电网

线路电压波动幅度，减轻变压器分接头调节压力。在集中式光伏电站侧，部署兆瓦级大容量储能系统，通过与电站控制系统的实时通信，参与系统调频响应，在负荷突变或光伏出力骤降时快速释放存储能量，填补功率缺口，缓解频率波动幅度。此外，通过构建光伏出力预测模型与储能充放电计划的联动机制，实现出力预测偏差与储能调度的动态匹配，提升系统备用容量的利用效率。

### 3.3 电网拓扑结构优化

优化电网拓扑结构能增强对光伏高渗透率的适应能力。构建柔性输电网络，在大型光伏基地接入端采用基于电压源换流器的高压直流输电技术，通过快速功率控制能力隔离光伏波动对交流主网的影响，减少远距离输电中的功率损耗和电压波动频次。在配电网层面，通过智能开关实现线路拓扑动态重构，将分散的光伏接入点均匀分布于不同馈线，避免局部区域功率集中导致的潮流反向流动。增加不同电压等级线路的联络线建设，形成多回路供电格局，在部分线路因故障退出运行时，通过联络线快速切换供电路径，防止故障影响范围扩大。同时，升级变电站设备，采用具备快速调压功能的智能变压器，通过实时监测母线电压变化，自动调节分接头位置，缩短电压恢复时间，增强电网对分布式光伏接入的接纳能力。

### 3.4 智能化调度技术应用

智能化调度技术为高比例光伏并网提供精准调控手段。基于长短期记忆网络和梯度提升算法构建光伏出力预测系统，融合气象数据、历史出力曲线和地理信息，提升短期和超短期出力预测精度，为电网日前和实时调度提供可靠依据。构建源网荷储协同调度平台，整合光伏电站、储能系统、火电机组、风电场及可调节负荷的运行数据，通过多目标优化算法实现各类资源的统筹调度，动态平衡功率供需。应用数字孪生技术构建电网全要素仿真模型，实时映射光伏并网引发的电压偏移、频率波动及潮流变化状态，通过蒙特卡洛模拟生成多场景扰动案例，提前预警潜在风险并自动生成包含机组出力调整、储能充放电计划的调节策略，缩短电网应对扰动的响应时间，提升系统抗干扰能力。

## 4 光伏并网系统稳定运行的管理机制构建

### 4.1 并网技术标准体系完善

建立健全光伏并网技术标准体系是规范电站接入的基础。需制定分场景的并网性能指标，明确不同渗透率下光伏电站的电压调节范围、频率响应速度、低电压穿越能力等关键参数，确保电站输出特性与电网安全要求匹配。针对分布式与集中式光伏的差异，制定差异化的并网检测规范，要求电站在接入前完成功率波动抑制、谐波治理等专项测试，通过第三方认证后方可并网。同时，动态更新标准内容，结合光伏技术发展和电网运行需求，将虚拟同步机控制、储能协同等新技术纳入标准

框架，为新型并网模式提供合规依据。

#### 4.2 分级监管与责任追溯机制建立

构建分级监管体系可实现光伏并网全流程管控。电网企业负责对光伏电站并网运行状态进行实时监测，重点跟踪高渗透率区域的功率波动、电压偏差等指标，对超标电站发出预警并责令整改。行业监管部门定期开展并网合规性检查，核查电站是否符合技术标准、运维记录是否完整，对违规并网、擅自更改设备参数的行为实施处罚。建立责任追溯机制，明确光伏电站投资方、运维方、电网调度方的权责划分，在发生稳定性事件时，通过数据分析界定责任主体，形成“建设—运行—监管”闭环管理。

#### 4.3 多主体协同调度机制搭建

多主体协同调度机制能提升系统资源配置效率。建立光伏电站、储能运营商、电网公司、用户参与的协同平台，通过市场化交易引导各主体参与调峰调频。制定跨区域调度规则，在跨省跨区输电通道中预留光伏消纳空间，实现余缺互济。推行“源网荷储”一体化调度模式，将分布式光伏纳入区域微网协同控制，通过需求响应引导用户错峰用电，平抑光伏出力波动对配电网的影响。定期组织调度演练，模拟极端天气下的光伏

出力骤降场景，检验各主体应急响应能力，优化协同调度流程。

#### 4.4 电力市场机制与激励政策设计

完善电力市场机制可激发各主体参与电网稳定保障的积极性。在现货市场中增设光伏辅助服务交易品种，允许光伏电站通过提供调频、调峰服务获得收益，引导电站优化出力特性。对配置储能的光伏项目给予容量补偿，根据储能响应速度和放电深度制定阶梯式补贴标准，鼓励电站提升波动平抑能力。推行绿色电力证书与稳定性贡献挂钩制度，将电站并网运行的稳定性指标纳入证书核发考核体系，通过市场机制推动电站主动提升运行质量。

### 5 结语

光伏电站并网对电网稳定性的影响是能源转型过程中必须直面的课题。其出力的随机性与间歇性所引发的电压、频率波动等问题，需通过技术优化与管理机制完善协同解决。从逆变器控制改进到储能系统配置，从智能调度到规范完善，一系列措施为高比例光伏电力系统的稳定运行提供了支撑。随着技术的持续进步与实践的深入推进，光伏并网将更高效地融入电力系统，为能源结构绿色转型与电网安全稳定运行奠定坚实基础，推动可持续能源发展迈向新高度。

#### 参考文献：

- [1] 郭小强, 郭伟扬. 光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 29(24): 108-114.
- [2] 陈来军, 梅生伟, 祁晓荔等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2023, 37(6): 10-16.
- [3] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰等. 储能技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 电力系统自动化, 2023, 37(1): 4-11.
- [4] 赵江河, 周孝信, 郭剑波等. 未来电网的发展模式及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2025, 35(19): 4826-4835.
- [5] 丁怡, 周明, 李庚银等. 基于大数据分析的电力系统负荷预测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 158-168.
- [6] 张宁, 康重庆, 肖晋宇等. 电力系统数字孪生技术的研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 43(13): 198-208.