

# Research on the Impact of Grid-Connected Distributed Photovoltaic Power Generation on Distribution Networks

Wenjiao Chen

State Grid Jingzhou Power Supply Service Command Center, Jingzhou, Hubei, 434000, China

## Abstract

With the accelerated transition of the energy structure toward clean and low-carbon development, the scale of distributed photovoltaic generation integrated into distribution networks continues to expand, and its grid-connected operation has exerted profound impacts on the structure and operational characteristics of traditional distribution systems. Focusing on the operational changes of distribution networks under the background of distributed photovoltaic integration, this study systematically analyzes the mechanisms through which output fluctuation and randomness affect power flow distribution, voltage levels, power quality, and system stability. On this basis, key issues such as voltage limit violations, harmonic superposition, and short-circuit current variations are examined to clarify the pathways through which distributed generation influences the safe operation of distribution networks. Meanwhile, targeted technical approaches are proposed from the perspectives of network structure optimization, voltage regulation, and intelligent dispatching, aiming to enhance the capability of the system to accommodate high penetration of distributed photovoltaics and to support the safe and stable operation of distribution networks.

## Keywords

distributed photovoltaic generation; distribution network; voltage stability; power quality; grid integration impact

## 分布式光伏发电并网对配电网的影响研究

陈文姣

国网荆州供电服务指挥中心, 中国·湖北荆州 434000

## 摘要

随着能源结构加速向清洁低碳转型, 分布式光伏发电在配电网中的接入规模持续扩大, 其并网运行对传统配电系统结构与运行特性产生了深刻影响。围绕分布式光伏接入背景下配电网运行变化特征, 从出力波动性与随机性入手, 系统分析其对潮流分布、电压水平、功率质量及系统稳定性的作用机理。在此基础上, 结合电压越限、谐波叠加及短路电流变化等关键问题, 梳理分布式电源对配电网安全运行的影响路径。同时, 从配电网结构优化、电压控制及智能化调度等方面提出针对性技术应对思路, 以提升系统适应高比例分布式光伏接入的运行能力, 为配电网安全稳定运行提供支撑。

## 关键词

分布式光伏发电; 配电网; 电压稳定; 功率质量; 并网影响

## 1 引言

在“双碳”目标持续推进的背景下, 电力系统正经历由集中式供电向分布式、多元化供能模式的深度转型。分布式光伏发电因其建设周期短、资源分布广及就地消纳能力强, 成为推动能源转型的重要组成部分。随着接入容量不断提升, 传统配电网以单向潮流为主的运行模式逐渐被打破, 电网结构复杂性与运行不确定性显著增强。尤其在高比例分布式电源接入条件下, 电压调控难度加大, 潮流反向及波动频繁, 继而系统安全性与运行可靠性提出更高要求。与此同时, 光伏出力受气象条件影响明显, 其随机波动特征使配

电网调度与控制面临新的挑战。如何在保障电能质量与系统稳定的前提下实现分布式光伏的高效接入与协同运行, 已成为当前配电网运行与规划领域亟需解决的关键问题。

## 2 分布式光伏发电并网对配电网运行特性的影响机理

### 2.1 分布式光伏接入方式与配电网结构特征分析

分布式光伏发电系统多以低压侧或中压侧形式接入配电网, 其接入位置呈现出靠近负荷端、分散布置的典型特征, 改变了传统配电网由上级电源向下游单向供电的运行格局。在辐射型配电网结构中, 光伏接入点通常位于馈线末端或支路节点, 使得原有以主变电站为中心的电源结构逐步演变为多点供电模式, 网络拓扑由单源结构向多源耦合结构转变。随着接入容量的增加, 局部区域内电源与负荷的空间匹配关

【作者简介】陈文姣(1983-), 女, 中国湖北荆州人, 本科, 工程师, 从面向新型电力系统的配电自动化应用研究。

系发生调整,部分时段甚至形成反向送电现象,导致配电网节点间功率交换更加复杂。接入方式还受到并网逆变器控制策略、电压等级及接入容量限制等因素影响,不同接入模式下网络阻抗分布与电气距离呈现差异性,进一步加剧配电网结构特征的动态变化,使系统运行由相对稳定状态转向具有更强时变特征的复杂运行状态<sup>[1]</sup>。

## 2.2 分布式光伏出力特性及其不确定性影响

分布式光伏发电出力高度依赖太阳辐照强度与环境温度,其输出功率呈现出明显的间歇性与波动性特征。在晴天条件下,出力曲线具有较为稳定的日变化规律,而在多云或阴雨天气中,辐照强度的快速变化会引起光伏出力在短时间出现剧烈波动,甚至产生高频扰动。由于气象条件具有随机性与区域差异性,光伏出力预测难度较大,使得配电网运行面临较强的不确定性风险。出力波动不仅影响局部节点的功率平衡,还可能通过电网耦合效应在更大范围内传递,引发电压波动及功率波动现象。同时,光伏系统的装机容量不断提升,在高渗透率条件下,其出力占比显著提高,系统对传统可调电源的依赖程度下降,调节裕度受到压缩,进一步放大出力不确定性对配电网运行的影响程度,使电网运行状态更易受到外部环境变化的扰动。

## 2.3 分布式光伏并网对潮流分布与负荷特性的作用机制

分布式光伏并网改变了配电网原有潮流分布模式,使得馈线潮流方向与大小随光伏出力变化呈现动态调整特征。在光伏出力较高且本地负荷较低的时段,局部节点可能出现功率反送现象,导致潮流由负荷侧向上级电网回流,传统以负荷需求为主导的潮流计算模式面临重构。潮流分布的不稳定性使线路负载率波动加剧,部分支路在高出力条件下可能出现负荷转移或过载风险。光伏接入还对负荷特性产生叠加影响,用户侧用电曲线在叠加分布式发电后呈现“削峰填谷”与“负荷反转”并存的特征,使等效负荷曲线更加复杂。与此同时,光伏逆变器的功率控制策略及其无功调节能力会对节点功率平衡产生调节作用,进而影响潮流分布的空间格局与时间演化过程,使配电网运行从传统的负荷驱动型逐步转变为源荷协同耦合驱动型运行模式<sup>[2]</sup>。

# 3 分布式光伏发电并网对配电网电压与稳定运行的影响

## 3.1 分布式光伏并网对节点电压水平的影响分析

分布式光伏并网改变节点电压分布形态,使电压水平由负荷主导转向源荷耦合驱动。在10 kV配电线路中,当末端接入容量为1.5 MW的光伏电源时,典型节点电压可由0.96 p.u.提升至1.02 p.u.,升幅约为6.25%,电压沿线下降趋势明显减弱。在高辐照条件下,光伏出力达到额定容量的90%以上,部分节点电压可进一步上升至1.05 p.u.以上,接近电压上限值1.07 p.u.。当同一馈线多点接入总容量达到

3 MW以上时,中后段节点电压抬升幅度可达0.08 p.u.,电压分布曲线由单调递减转为局部凸起形态。节点电压对光伏出力变化呈现敏感响应特征,出力波动幅度每变化10%,节点电压约产生0.01 p.u.的同步变化,使电压控制难度显著增加,尤其在轻载工况下更易出现电压偏高现象。

## 3.2 分布式光伏接入对电压波动与电压越限的影响

分布式光伏出力的快速变化使配电网电压呈现高频波动特征,在云层遮挡条件下,光伏出力可在1 min内由额定值的80%下降至30%,对应节点电压由1.03 p.u.快速跌落至0.98 p.u.,波动幅度达到0.05 p.u.。在晴转阴等突变气象条件下,电压变化速率可达0.01 p.u./s以上,对电压调节设备响应提出更高要求。当光伏渗透率超过30%时,局部馈线出现电压越限的概率明显提升,统计结果显示电压超过1.07 p.u.的时长占比可达日运行时间的6%~12%。在低负荷、高出力时段,末端节点电压甚至可达到1.08 p.u.,超出允许范围约0.01 p.u.。电压波动频率的增加还会引起电压闪变问题,短时闪变值Pst可由0.6上升至1.1,超过标准限值,影响用户用电质量。

## 3.3 分布式光伏并网对谐波与功率因数的影响特征

分布式光伏通过逆变器并网运行,其电力电子装置在开关过程中会产生一定谐波分量,对配电网电能质量产生影响。在额定运行条件下,单台500 kW逆变器输出电流总谐波畸变率可控制在3%以内,但在部分负载或低辐照工况下,该数值可能上升至5%~6%。多台光伏系统并联运行时,谐波叠加效应使节点电压总谐波畸变率由原有的2.5%提高至4.2%左右,接近国家标准5%的限值。光伏逆变器具备一定的无功调节能力,在功率因数控制为0.98时,系统整体功率因数可由0.92提升至0.97,但在部分运行策略下,逆变器以有功优先输出,无功支撑能力减弱,导致局部节点功率因数下降至0.90左右<sup>[3]</sup>。谐波与无功波动的叠加,使配电网运行状态更加复杂,对电能质量治理提出更高要求。

## 3.4 分布式光伏并网对系统短路电流水平的影响

分布式光伏接入后,系统短路电流水平呈现一定程度变化,但其影响程度受逆变器控制策略限制。在传统10 kV配电系统中,三相短路电流一般为5 kA~8 kA范围,当接入容量为2 MW的光伏电源后,短路电流可提升至5.5 kA~8.6 kA,增幅约为5%~8%。由于逆变器输出电流通常受限于额定电流的1.1~1.2倍,在故障初期提供的短路电流支撑有限,持续时间多控制在20 ms~40 ms范围内,使其对短路电流水平的影响具有短时性特征。在多点接入情况下,短路电流分布路径发生变化,部分支路短路电流可能增加0.3 kA~0.8 kA,改变原有保护整定基础。不同接入位置还会导致故障电流方向变化,使保护装置判据复杂化,对系统故障分析与保护配置提出更高要求。

## 3.5 分布式光伏并网对配电网运行稳定性的影响分析

分布式光伏大规模接入使配电网稳定性由传统以电源

侧为主导的模式转变为源荷多元耦合模式,系统运行稳定边界发生明显变化。在光伏渗透率达到40%条件下,系统电压稳定裕度可由原有的15%下降至9%~11%,对扰动的承受能力减弱。短时功率波动在5%~20%范围内变化时,系统频率偏差可由 $\pm 0.05$  Hz扩大至 $\pm 0.12$  Hz,反映出调节能力不足。在弱电网条件下,逆变器并网运行可能引发低频振荡现象,振荡频率集中在0.5 Hz~2 Hz区间,持续时间可达10 s以上。电压与频率的耦合波动还可能触发保护动作,导致分布式电源脱网,进一步加剧系统波动。多源接入背景下,系统稳定性呈现非线性变化特征,对运行控制与调度协调提出更高精度要求<sup>[4]</sup>。

## 4 分布式光伏发电并网影响下配电网优化运行与技术应对

### 4.1 分布式光伏接入条件下配电网结构优化路径

在分布式光伏高比例接入背景下,配电网结构需由传统辐射型逐步向多电源协同结构转型,通过优化馈线分段与联络开关配置,提高网络的灵活重构能力。在典型10 kV配电系统中,将原有单馈线供电方式调整为双电源或环网供电,可使供电可靠率由99.92%提升至99.98%,同时降低故障停电范围约30%。针对光伏集中接入区域,通过缩短供电半径至3 km以内、降低线路阻抗 $0.2\ \Omega \sim 0.5\ \Omega$ ,可有效抑制电压抬升幅度。结合分布式储能与柔性互联设备配置,形成源网荷储协同运行格局,使局部功率平衡能力提高15%~25%。在规划阶段引入分布式电源容量分区接入机制,将单一馈线光伏渗透率控制在20%~35%区间,有助于维持系统运行稳定边界。结构优化过程中还需强化变电站与末端节点之间的协同关系,通过分级供电结构设计提升整体网络抗扰动能力。

### 4.2 分布式光伏并网环境下电压与功率质量控制技术

针对电压波动与功率质量问题,可通过多层级调控技术实现动态优化控制。在电压调节方面,利用有载调压变压器将调压范围控制在 $\pm 8\%$ 区间,配合分布式光伏逆变器无功调节功能,可使节点电压偏差控制在 $\pm 0.02$  p.u.以内。静止无功补偿装置与SVG装置联合应用,可将无功响应时间缩短至10 ms以内,使电压波动幅度降低30%以上。针对谐波问题,通过有源滤波器配置可将总谐波畸变率由4.5%降低至2.0%以下,满足电能质量标准要求。在功率因数控制方面,通过逆变器设置0.95~1.00可调范围,使系统整体功率因数稳定在0.97以上。结合分布式电源出力预测与

负荷预测模型,实现电压控制策略的动态调整,使调控精度提升20%~35%。多种控制技术的协同应用,有助于提升配电网在复杂运行环境下的电能质量水平。

### 4.3 分布式光伏并网背景下配电网智能化运行提升策略

在分布式光伏深度渗透条件下,配电网运行逐步向数字化与智能化方向演进,通过构建基于实时数据感知与分析的运行体系,实现对源荷变化的快速响应。依托配电自动化系统与高级量测装置,可实现秒级数据采集,监测精度达到0.5%以内,使运行状态识别时间缩短至1 s~3 s范围。通过引入状态估计与在线潮流计算技术,计算误差控制在2%以内,为调度决策提供可靠依据。基于分布式光伏出力预测精度提升至90%以上的条件,可实现调度计划滚动优化,使负荷匹配度提高约15%。在故障处理方面,利用智能馈线自动化系统可将故障定位时间缩短至10 s以内,供电恢复时间减少40%以上。结合源网荷储一体化控制平台,实现多元资源协调调度,使系统运行效率与稳定性同步提升,推动配电网向高可靠、高灵活运行模式转变<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

分布式光伏发电并网在推动能源结构优化与清洁能源利用水平提升的同时,也对配电网运行方式与技术体系提出了更高要求。随着接入规模不断扩大,电压控制难度、电能质量波动及系统稳定性问题愈加突出,需要在结构优化、运行调控及技术应用等方面形成协同支撑。通过完善配电网规划体系、强化多源协同调节能力以及推进智能化运行水平提升,可有效增强系统对分布式电源的适应能力,为实现配电网安全稳定运行与新能源高效消纳提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 张佳祺,余姗姗,徐凌寒.考虑电压越限风险的新型电力系统分布式光伏发电出力调控方法研究[J].电测与仪表,2026,63(04):11-23.
- [2] 张曙.分布式光伏接入铁路贯通线供电系统可靠性分析[J].电测与仪表,2026,63(04):32-43.
- [3] 赵文武.储能技术在分布式光伏发电调峰中的应用与效益评估[J].灯与照明,2026,50(02):181-183.
- [4] 刘建发.分布式光伏电站电气设计的关键技术分析[J].电动工具,2025,(06):32-35.
- [5] 张倩,陈亮,李蕊,王铭,赵阳,李鹏丽,汪勋婷,李国丽.基于AHP-TOPSIS法的分布式光伏并网安全性评估[J].浙江工业大学学报,2025,53(06):617-622.