

# 分布式光伏发电系统的并网安全性 评估方法探讨

● 刘文阳



**[摘要]** 分布式光伏发电系统凭借清洁、高效的特点,在全球范围内得到广泛应用。然而,其并网过程中可能产生的安全性问题对电力系统的稳定性提出了严峻挑战。本文从分布式光伏发电系统的组成、并网模式及技术要求出发,分析了并网潜在的安全性问题,并构建了并网安全性评估的指标体系。在此基础上,探讨了包括定性评估、定量评估以及结合大数据与人工智能的综合评估方法,并通过案例对所提方法的可行性与有效性进行了分析验证。

**[关键词]** 分布式光伏发电系统;并网安全性;评估指标体系

随着可再生能源的快速发展,分布式光伏发电系统因其环境友好性和高效性被得到了广泛应用。然而,分布式光伏发电的并网对电力系统提出了新的技术要求,还可能引发电压波动、电网稳定性下降等一系列安全性问题。如何科学地评估并网的安全性,已成为学术界和工程界亟待解决的重要课题。本文旨在探讨分布式光伏发电系统并网的安全性评估,通过构建评估指标体系,结合多种评估方法,提出更具科学性和实践性的评估框架,为未来大规模分布式光伏发电系统的安全运行提供了理论支持。

## Q 分布式光伏发电系统概述

### (一) 分布式光伏发电系统的组成与特点

光伏组件、逆变器等设备构成了分布式光伏发电系统的主体,而配电装置、监控设备及其他辅助设备则共同支撑着这一系统的稳定运行。将太阳能直接转换为直流电的装置即光伏组件,其作用至关重要;电网所需的交流电正是由逆变器将直流电转换而来;在电能传输与分配过程中,配电装置扮演着至关重要的角色;实时运行数据的监测与管理由监控设备予以执行。在分布式光伏发电系统的应用场景中,储能装置的融入对于提升电能利用效率具有重要意义。与集中式光伏发电相比,分布式光伏发电系统凸显出分散布局、适应性强以及安装场所多样性等诸多优势。所述设施的安装位置,可以是住宅建筑的屋顶、工业生产场所的顶部以及公共用途的建筑物等。我国户用光伏装机总量已跨越70吉瓦大关,此数值在总光伏装机容量中的比例超过了

15%,并展现出迅猛上升的趋势。该系统紧邻负荷核心,能够有效降低长途输电所受的损失,极大提高能量运用效能。规模较小的系统,因其布局分散,对并网技术的应用及运行管理提出了更为严苛的挑战。在分布式光伏系统中,并网模式的调整空间广泛,彰显了其独特的灵活特性。在满足不同需求的前提下,全网络接入、自主使用或二者融合的运用方式被广泛采纳。分布式光伏发电之多样化特性,使其成为推动能源结构变革的关键动力。

### (二) 并网模式与技术要求

光伏发电系统并网模式分为全额上网与自发自用两种。在全额上网模式下,发电量悉数输送至电网,电网公司依照协议进行电量收购。在工业及公共建筑领域的大型项目中,此模式展现出其适用性,因其体量庞大,确保了电力输出的稳定性。用户优先运用自发自用模式,以实现自身用电需求,多余电力进而上网。家庭与企业对这种模式青睐有加,近年来其受欢迎程度显著提升。数据显示,截至2023年,我国投运的分布式光伏项目之中,约60%采用自发自用模式。在分布式光伏并网实施过程中,电能质量、并网稳定性以及控制系统兼容性等要素的技术规范尤为关键。分布式光伏发电在并网环节,必须确保电能质量符合规定,不得干扰电网电压波动及频率稳定性,且谐波含量须符合国家设定的标准(总谐波失真率小于5%)。系统需具备应对短暂电网波动或故障的能力,以便迅速恢复正常运行,保证电网稳定。在电力系统中,逆变器的迅速反应性能以及其主动为电网提供支撑的特性和作用,诸如无功补偿和低

电压穿越能力，同样起着至关重要的作用。在江苏省，分布式光伏装机量已突破 20 吉瓦，这一成就使其跻身全国领跑者行列。区域电网的稳定性在实施大规模并网时面临挑战，进而对并网设备的可靠性及技术兼容性提出更为严格的考验。

### （三）并网可能引发的安全性问题

在分布式光伏发电系统的并网过程中，不可避免地暴露出若干关乎系统安全的潜在隐患。光伏发电因天气因素（例如光照强度与云层密度）影响显著，常引发电压波动问题，进而造成输出功率波动。在短时间内，若实测数据表明光照强度波动幅度超过 30%，则配电网电压有可能上升或下降，增幅或降幅超 5%，从而对用电设备的正常运作产生不利影响。逆变器在分布式光伏系统运行期间，有可能会输出谐波，干扰邻近设备运作，并诱发电网损耗的加剧。谐波含量一旦突破 8%，电网损耗的潜在增幅可能高达 10%。在众多光伏系统集中接入的特定区域，谐波现象愈发显著。实施分布式光伏并网，电网调度与稳定性面临潜在威胁。光伏发电在用电高峰期难以为继，而在低谷时段，过剩的电能可能导致电力逆向输送。电网因不匹配问题承受更大的调峰压力，严重时甚至可能触发区域电网的崩溃。在特定试点城市中，若光伏发电量超过区域总负荷的 20%，电网频率波动幅度将明显超出其安全运行标准。逆变器大面积脱网现象往往由雷击或短路等突发状况触发，此类事件可能引起电网波动。为了确保分布式光伏系统安全接入电网，必须全面考量技术、管理以及政策等多重维度，进而构建起一套系统化的安全性能评估与改进策略。

## Q 分布式光伏并网安全性评估指标体系

### （一）并网安全性评估的目标与原则

分布式光伏并网安全性评估的目的是保障电网的安全稳定运行，同时最大化分布式光伏发电的利用效率，避免因并网问题导致的电力供应风险和设备损坏。具体来说，评估应识别并网过程中可能存在的潜在安全问题，并量化这些问题对电网运行的影响，为优化并网设计和运行提供参考依据。通过安全性评估，还可以为相关部门和企业制定相关政策和技术规范提供数据支撑。

评估原则主要包括全面性、科学性、动态性和可操作性四个方面。全面性要求评估指标覆盖并网的各个环节，包括电能质量、系统稳定性和运行经济性等。科学性体现在指标的量化及评估方法的严谨性，如采用合理的数学模型和实际数据分析。动态性则强调评估应考虑分布式光伏出力的波动特性（如日照变化和季节性差异）及电网负荷的变化。例如，假设光伏发电波动率  $\Delta P = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max}}$ ，在某

区域实测数据中，日内波动率可高达 30%，评估需反映这些特性。可操作性则要求评估结果能够为实际应用提供明确指导，例如在分布式光伏密集区域的逆变器配置中需增强低电压穿越(LVRT)功能。通过确立明确的目标与原则，评估能够在保障电网安全的基础上，促进分布式光伏的持续健康发展。

### （二）评估指标体系构建

#### 1. 电能质量指标

电能质量是并网安全的重要基础。具体指标包括电压偏差率( $\Delta V = \frac{V_{\text{实测}} - V_{\text{额定}}}{V_{\text{额定}}} \times 100\%$ )频率偏差(如  $|\Delta f| < 0.5\text{Hz}$  为安全区间)及谐波含量(THD, 总谐波失真)。根据实测数据，在分布式光伏占比 20% 以上的配电网中，部分地区电压偏差率超过 3%，已超出国家标准 GB/T 12325-2008《电能质量供电电压偏差》中 2% 的要求。

#### 2. 运行稳定性指标

稳定性评估主要关注分布式光伏系统在扰动条件下对电网的影响。指标包括低电压穿越能力(LVRT, 通过模拟短时电压骤降过程验证逆变器在小于等于 0.2V 额定条件下运行不脱网)、功率波动率(公式见前述)和电网频率响应时间( $t$  响应)，实测数据显示快速响应时间应小于 200ms 以维持系统稳定。

#### 3. 经济性指标

虽然并网安全性是评估重点，但经济性也需考虑。关键指标包括分布式光伏并网后的单位发电成本(LCOE)和电网调峰成本变化率。例如，在某试点城市中，因调峰需求增加，电网调度成本上升了约 12%。

## Q 分布式光伏并网安全性评估方法

### （一）定性评估方法

在分布式光伏并网实施过程中，运用定性评估方法，通过对可能产生的主要问题进行详尽分析，并从逻辑推理与经验判断双重视角，对整体安全性实施系统性的深入剖析。此策略摒弃繁复的数学模型，适用于方案初探与政策制定的全过程。定性评估分布式光伏并网，通常以因果分析法为基，辅以专家评议。运用因果分析法，梳理光伏发电并网可能产生的主要安全隐患（诸如电压波动、谐波干扰、电网频率波动等）及其成因，为解决方案的设计提供了重要参考。在分布式光伏系统中，若逆变器性能不稳，将引发谐波总量超标(超 10%)，此现象在光伏密集接入区尤为突出。领域专家依据评议法则对特定并网情境中存在的可能风险进行深入剖析，进而归纳提炼出核心的安全隐患。例如，针对某地区并网项目的评估中，专家提出，逆变器的低电压穿越能力不足是导致区域电网频繁跳闸的主要原因。定性评

估也存在不足，其结果依赖于评估者的专业水平和经验，缺乏精确量化的支持。为弥补这一不足，定性评估通常作为定量分析和大数据分析的补充手段，为后续深入研究提供方向性指导。

### (二) 定量评估方法

运用定量评估方法，通过构建数学模型及仿真分析工具，精确量化分布式光伏并网过程中各类安全问题的相关影响。在诸多评估手段中，仿真分析、敏感性分析以及数据统计分析等定量评估方法，扮演着至关重要的角色。运用电力系统仿真软件（诸如 PSCAD/EMTDC 与 DigSILENT 等）对分布式光伏并网的运行特性实施动态仿真模拟。在某市区域，装机容量达 100MW 的分布式光伏项目，通过仿真分析技术探究，当光伏发电量至 80% 且负载相对较低，配电网电压最大上升值达 8%，已超相关标准上限 5%。系统对光伏渗透率或负荷水平等输入变量的变动表现出不同程度的敏感性。此分析对理解系统响应至关重要。在上述区域，光伏渗透率提升至 50% 后，电网频率波动幅度增至约 3 倍。在并网安全性评估过程中，数据统计分析扮演了举足轻重的角色。例如，通过对全国范围内分布式光伏并网故障数据的统计发现，约 40% 的并网故障与逆变器的控制参数设置不当有关，而 35% 的故障则与设备质量问题相关。

### (三) 结合大数据与人工智能的评估方法

人工智能与大数据技术融合，为分布式光伏并网安全性评估带来了创新性的解决方案。光伏发电、并网运行与电力市场等多源数据，经大数据技术采集、处理与分析，旨在揭示系统内潜藏的安全隐患。经某市数据监测，光伏并网运行逾五年，波动较大的时段主要集中于夏晨与冬昏。数据剖析有助于策略调优，减少波动风险。运用人工智能技术，通过构建预测模型及优化算法，对并网过程的安全性实施评估与预测。光伏并网过程通过机器学习故障预测模型，能够预先辨识潜在故障及其概率。实际研究应用支持向量机(SVM)算法对某区域逆变器的故障进行预判，该算法的准确度之高，达到了 95%。长短时记忆网络(LSTM)这一深度学习技术，在预测光伏发电短期出力变化、优化并网控制策略方面，显著提高了评估的准确性。分布式光伏并网运行，依托大数据与人工智能技术融合，实现实时优化效能显著提升。

## Q 案例分析

江苏某工业园区安装了总容量为 50MW 的分布式光伏发电系统，其中 70% 的电量用于自发自用，30% 余电上网。项目投运初期，由于并网设备配置不足，园区频繁出现电压波动和逆变器脱网问题，影响了正常供电和设备运行。通过对该项目的并网安全性进行详细评估，发现主要问题包括逆变器低电压穿越能力不足、电压偏差率超标（最高达 ±6%）、谐波含量超出国家标准（THD > 8%）。针对上述问题，项目组采用了多层次的评估方法：（1）通过仿真分析优化了逆变器的参数设置；（2）基于大数据监控平台，实时采集光伏系统与电网的运行数据，发现问题高发时段为中午峰值出力时；（3）引入人工智能预测模型，对未来发电波动进行预警，并动态调整并网运行模式。

## Q 结束语

分布式光伏发电系统的并网安全性是保障电网稳定运行的重要课题。本文从系统组成、技术要求与安全性问题入手，提出了一套科学的安全性评估指标体系，并结合定性定量评估方法，以及大数据与人工智能技术，构建了综合性评估框架。案例分析表明，所提方法能够准确识别并网过程中潜在的安全风险，并为优化并网设计提供决策支持。未来，随着分布式光伏技术和评估手段的不断进步，可进一步完善评估体系，为智能电网的建设和运行提供更有力的支持。

## Q 参考文献

- [1]熊楠.加油站分布式光伏发电系统的安全风险及防范[J].石油库与加油站,2022,31(02):26-29.5.
- [2]边萌萌,张昕宇,李博佳,等.整县屋顶分布式光伏发电系统应用的技术要点分析[J].太阳能,2021,(11):41-47.
- [3]张国祥,严兴宇.分布式光伏发电与 APF 协调统一控制策略[J].电力电子技术,2021,55(11):71-74.
- [4]何德卫.浅析分布式光伏对配电网的影响[J].农村电气化,2021(10):73-74.
- [5]黄榕希,李佳珍,薛芙蓉,等.分布式光伏发电系统建模与仿真[J].电脑知识与技术,2021,17(22):158-160.

### 作者简介:

刘文阳(1992-),男,汉族,江西九江人,本科,助理工程师,深圳港华能源工程有限公司,研究方向:电气工程及其自动化。