

新能源光伏并网系统中智能电网技术及应用研究

葛良志

华润新能源投资有限公司安徽分公司，安徽 合肥 230031

DOI:10.61369/EPTSM.2025070010

摘 要： 全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严重，新能源技术的发展和應用已成为解决能源危机和减少碳排放的重要途径。光伏发电作为一种清洁、可再生的能源形式，具有广泛的应用前景和一定的发展潜力。光伏发电系统的并网接入和运行管理面临着诸多挑战，如电网稳定性、功率波动、电能质量等问题，需要借助智能电网技术来提高系统的可靠性、安全性和经济性。智能电网技术是一种集成了信息通信、控制和能源管理等技术的新型电力系统，能够实现对电力系统的实时监测、智能控制和优化调度，提高系统的运行效率和可靠性。在新能源与光伏并网系统中，智能电网技术可通过实时监测光伏发电系统的运行状态和电网负荷需求，实现光伏发电系统的最大功率跟踪、功率平衡和电能质量控制，从而提高系统的发电效率和电网的稳定性。

关 键 词： 新能源；光伏并网系统；智能电网技术；实践应用

Research on Intelligent Grid Technology and Its Application in New Energy Photovoltaic Grid-Connected System

Ge Liangzhi

Huarun New Investment Co., Ltd. Anhui Branch, Hefei, Anhui 230031

Abstract： With the continuous growth of global energy demand and the increasing severity of environmental issues, the development and application of new energy technologies have become crucial approaches to addressing the energy crisis and reducing carbon emissions. Photovoltaic (PV) power generation, as a clean and renewable energy source, holds broad application prospects and significant development potential. However, the grid integration and operational management of PV power generation systems face numerous challenges, such as grid stability, power fluctuations, and power quality issues. These challenges necessitate the use of smart grid technologies to enhance the reliability, safety, and economic efficiency of the systems. Smart grid technology is a novel power system that integrates information communication, control, and energy management technologies, enabling real-time monitoring, intelligent control, and optimized scheduling of the power system, thereby improving operational efficiency and reliability. In new energy and PV grid-connected systems, smart grid technology can enhance power generation efficiency and grid stability by real-time monitoring of the operational status of PV power generation systems and grid load demand, achieving maximum power tracking, power balancing, and power quality control of the PV systems.

Keywords： new energy; PV grid-connected system; smart grid technology; practical application

智能电网技术在光伏并网系统中的应用，包括先进的传感与量测技术、信息通信技术、智能设备技术、智能控制方法、决策支持与可视化技术等。智能电网技术在新能源发展中的作用，包括提高电网稳定性和可靠性、提高新能源消耗和降低环境影响，以及促进新能源技术的发展和應用。

一、光伏并网系统及其特点

光伏并网系统是将太阳提供的光能转换为直流电能，再经过逆变和升压等处理后，直接输送到公共电网中，与电网一起为各类用电设备供电的系统。

1. 系统组成。核心设备，光伏组件（单晶硅 / 多晶硅 / 薄膜技术）负责光能到电能转换，并网逆变器实现直流电到与电网同频

同相交流电的转换，配电柜、测控保护装置及环境监测等设备构成辅助系统，电网连接，需满足电压、频率、谐波等并网标准，通过电表实现双向计量。

2. 运行模式。一般包括全部自用，自发自用 + 余电上网及全额上网。全部自用：所有光伏发电全部供给本地负荷使用，无电能传输至电网；自发自用 + 余电上网：优先满足本地负载，多余电力馈入电网；全额上网：全部电能输送至电网。

3. 技术特点。系统输出的电能与公共电网的电能保持同频率、同相位、同电压；系统的发电功率由光照强度决定，具有间歇性、随机性和波动性^[1]；对电网系统有一定支撑能力，如当电网出现瞬间电压跌落时，系统不仅不脱网，还能向电网提供无功支持，帮助电网电压恢复。

4. 应用场景。主要应用场景包括户用分布式系统、工商业分布式系统、大型地面电站系统等。

5. 发展趋势。系统架构从单一到融合，标配或预留储能接口成为必然。储能不仅能平滑光伏出力波动、实现峰谷套利，还能在电网故障时通过离网切换技术保障重要负载的供电连续性；电网关系从适配到支撑，构网型技术是核心趋势，通过模拟同步发电机的特性，为电网提供惯性支撑和电压稳定能力，从根本上提升高比例新能源电网的稳定性与韧性。

二、新能源光伏并网系统中智能电网技术的智能监控与优化

1. 智能监控与优化数字孪生与 AI 诊断。传统监控只是数据采集和报警，而智能监控即感知层是数字孪生底座，基于如 IoT 技术，实时采集电站的全面数据（风光功率预测数据、发电功率、发电量、设备状态、环境温度、辐照度、红外热成像等），并利用算法进行初步分析和预警；数字孪生及数字层是整个系统的“数字底座”，其是一个与物理电站完全镜像的虚拟电站模型，模型不仅仅是 3D 外观，更重要的是包含了所有设备的设计参数、物理属性、电气连接关系和实时运行数据，可以实时映射、双向交互、模拟仿真；AI 诊断与优化即分析层是系统的“大脑”，基于数字孪生提供的海量实时和历史数据，利用机器学习、深度学习等 AI 算法，进行故障的精准诊断、性能衰退分析、发电量预测，并自动给出或执行优化策略^[2]。智能监控开展全面感知与数据同步，基于遍布电站的各类传感器、智能电表、无人机、摄像头等各类数据采集设备，实时采集各类数据，如电气数据：组串/逆变器的电压、电流、功率，环境数据：如辐照度、环境温度、风速、组件背板温度；设备状态数据：如逆变器、变压器、汇流箱等的工作状态和告警信息；图像数据：如无人机自动巡检拍摄的红外热成像和可见光图像；各类数据实时同步到对应的数字孪生体中，确保虚拟电站与物理电站的状态完全一致。数字孪生模型开展数字孪生仿真与映射，实时映射：如在 3D 界面上直观地看到哪一块组件温度异常（显示为红色）、哪一个组串发电效率偏低；物理仿真模拟不同光照、温度条件下的理论发电效率，为后续 AI 分析提供基准；根因溯源，通过虚拟模型中的异常组件，可以立刻追踪到其所在的组串、汇流箱和逆变器，极大缩短故障定位时间。AI 大脑的诊断与决策是价值创造的核心，AI 算法基于数字孪生的全量数据进行分析，可以包括异常检测与诊断，AI 识别出逆变器停机、组串限发等常规告警，分析红外图像，自动识别热斑（Hotspots）、二极管故障、蜗牛纹、组件裂纹等肉眼难以发现的缺陷并进行关联分析，如当一个汇流箱下的多个组串发电效率同时异常时，AI 会判断可能是汇流箱故障，而非单个组件问题。性

能分析与预测可以包括发电量预测，结合天气预报和历史数据，精准预测未来几天甚至几小时的发电量，助力电网调度和电力交易；性能衰退评估，通过长期数据追踪，分析组件效率的衰减率是否在正常范围内，评估电站的健康状态；收益损失分析，精确计算因每一处故障导致的发电量损失和电费损失，让决策更具经济性。

2. 规模化调度管理。随着新能源装机容量的急剧增长，管理单个电站已不足够，规模化、集群化的调度管理已成为保障电网安全、提升消纳水平的核心挑战。规模化调度的核心思想是“化零为整”，通过技术手段将分散、不可控的电源聚合为一个相对稳定、可控的“虚拟电厂”，从而参与电网调度。目标分为三个层次，安全层，确保电网稳定运行，不因新能源的波动而引发故障。消纳层，最大限度减少“弃风弃光”，提高新能源利用率。经济层，通过参与电力市场，实现集群效益最大化。对于新能源电站应当具备下列技术与能力，全面、高精度、标准化的数据采集与感知能力，包括智能传感器、SCADA 系统、数据采集网关等，为调度提供准确、及时的电站运行状态和环境数据，是一切优化的基础；高精度发电功率预测、设备健康状态智能评估的预测与数据分析能力，包括超短期/短期功率预测模型、AI 诊断平台、数字孪生技术等，降低不确定性，为调度计划制定提供依据；实现预防性维护，减少非计划停运；接受并执行调度指令，参与调峰、调频等辅助服务的协调与控制能力，包括 AGC/AVC 系统、协调控制器（ACCU-100）、快速响应 EMS 等，直接响应电网需求，维护系统安全稳定；优化本地用电，提升经济性；将电站作为资产参与电力市场交易，获取多重收益的市场与交易能力，包括支持电力交易的 EMS 系统、AI 交易 Agent 等，通过峰谷套利、辅助服务、绿电交易等市场化手段，显著提升电站收益；严格遵守网络安全规程，遵循统一的通信协议和数据标准，确保调度指令畅通、数据安全可靠，是规模化接入和可信互动的前提。

三、智能发电与并网控制

1. 功率追踪与电能质量监测。智能发电与并网控制中的功率追踪与电能质量监测是保障电网稳定运行的关键技术，功率追踪技术，动态负荷响应，光伏系统需根据光照强度动态调整发电功率，通过智能控制器（如 SmartGridBox）实时匹配电网需求，避免因间歇性发电导致的电压波动。逆变器控制优化，采用 SVG 等动态无功补偿装置调节逆变器输出，解决光伏并网导致的功率因数降低问题，确保电网侧功率因数 ≥ 0.95 。电能质量监测体系，分层监测架构，数据采集层：部署电能质量分析仪、谐波监测仪等设备，监测电压、电流、谐波等参数，关键监测点包括变电站和重要用户接入点^[3]。平台处理层：通过统计分析、趋势预测实现数据清洗与预警，阈值触发机制可快速定位电压暂降或谐波超标问题。标准化设备应用，如 APView400 等监测装置支持 35kV 以下系统的谐波分析、闪变监测等功能。综合治理策略，谐波治理，针对逆变器产生的各类谐波，采用动态无功发生器（SVG）

替代传统 LC 补偿器，避免并联谐振风险。预防性维护，构建电能质量知识库，积累案例与治理经验，支持主动运维决策。技术发展趋势，智能监测系统正朝多源数据融合方向发展，结合光纤专网与云端存储提升实时性，同时强化网络安全防护以应对关键基础设施的 OT 风险。

2.多模式并网技术。智能发电与并网控制中的多模式并网技术是实现新能源高效消纳和电网稳定的关键，其核心在于通过动态调节技术适应不同发电场景和电网需求。并网模式选择技术，支持逆变器在并网与离网模式间切换，通过控制系统状态机实现不同运行模式的快速转换。例如，Simulink 模型中的双闭环控制可实时监测电压、频率、相位参数，自动触发断路器合闸以减少并网冲击。智能控制与保护技术，无功控制：通过调节逆变器功率因数满足电网无功需求，提升系统稳定性。防逆流技术：防止电能倒流至电网，保障电网安全。过压 / 过流保护：采用硬件与软件协同的快速保护机制（如 6.7Ap-P 过流保护阈值）。规模化与协同管理，针对多个分布式电站，通过并网规模化管理技术实现电力调度优化。固态氢能发电示范中，电氢融合技术通过存储 - 发电 - 加氢一体化，解决新能源波动性问题。自动化与效率提升，自动并网柜通过智能监控实现参数匹配与合闸操作，显著提升并网效率。智能控制技术集成远程监测与故障诊断，优化发电全生命周期管理。未来，随着电氢融合等变革性技术的成熟，多模式并网将更深度支撑新型电力系统构建。

四、新能源光伏并网系统中安全与稳定性技术

传统电网依赖于同步发电机，其本身具有惯性（抵抗频率变化）和无功支撑能力（维持电压稳定）。而光伏电站等新能源电站通过电力电子逆变器并网，其固有特性包括低惯性与弱阻尼，易导致电网频率变化更快，抗扰动力下降；弱电压支撑能力，不主动参与电网电压调节，甚至在电网故障时可能加剧电压崩溃；抗干扰能力差，电网发生暂态故障（如电压跌落、骤升）时，易发生脱网，引发连锁故障；电能质量低，电力电子设备开关过程会引入谐波、间谐波，导致电压畸变；网络安全风险高，电站监控系统（SCADA）连接到网络，可能面临网络攻击，导致非法控

制或数据泄露^[4]。提升新能源光伏并网系统中安全与稳定性主要包括，频率稳定：虚拟惯性控制，逆变器通过控制算法，模拟同步发电机的惯性响应，当检测到电网频率变化率过大时，快速释放或吸收有功功率来“拖住”频率变化。一次频率调节，让光伏电站保留一定备用容量（降额运行），在电网频率超过阈值时，主动增加或减少有功出力，参与电网调频。电压稳定：无功功率调节，目前逆变器都具备无功调节功能，通过自动电压调节功能，根据并网点电压水平，自动发出或吸收无功功率，支撑电压稳定。静态同步补偿器，在大型光伏电站集中加装 STATCOM，提供快速、连续的无功补偿，是强大的电压稳定利器。暂态稳定性与故障穿越：低 / 高电压穿越已成为强制性并网要求，光伏逆变器必须能够在规定程度的电压跌落和升高期间保持并网，并向电网提供一定的无功电流，以帮助电网电压恢复。功角稳定性，通过先进的控制算法，确保逆变器在故障期间与电网其他电源保持同步。振荡抑制：阻抗重塑，改进逆变器控制策略，改变其输出阻抗特性，避免与电网阻抗在敏感频率段产生谐振。附加阻尼控制器，在逆变器控制系统中加入专门用于抑制特定频率振荡的辅助控制回路。电气保护，如直流侧保护，直流电弧故障检测与中断：直流电弧易引发火灾，需采用智能算法识别电弧特征并快速切断电路；逆流保护：防止电流反向流动。交流侧保护，过 / 欠压、过 / 欠频保护：在超出运行极限时安全脱网；防孤岛保护：检测电网停电状态并迅速断开连接，防止“孤岛运行”危及安全。网络安全保护，如边界防护：在电站监控网络与外部网络之间部署工业防火墙，进行访问控制和安全隔离。入侵检测与防御：部署 IDS/IPS 系统，实时监控网络流量，发现并阻断恶意攻击行为。安全认证与加密：对关键控制指令、运维操作进行双向身份认证和数据加密传输，防止篡改和窃听。安全审计与管理：建立完善的网络安全管理制度，定期进行漏洞扫描、风险评估和应急演练。

综上，智能电网技术在新能源领域的应用，不仅可提高电网的稳定性和可靠性，降低能源消耗和环境影响，还可促进新能源技术的创新和应用，在未来的发展中，智能电网技术将在新能源领域发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 刘新佳. 光伏并网发电系统中的储能技术应用研究 [J]. 工业控制计算机. 2020, (11)54-56.
- [2] 郑立明, 叶骏, 丛建鹏. 光伏并网发电系统中储能技术的应用探讨 [J]. 通信电源技术. 2022, 39(6)119-121.
- [3] 张新民. 光伏并网发电系统中的储能技术应用研究 [J]. 电力设备管理. 2022, (18)322-324.
- [4] 周春生. 储能技术在光伏并网发电系统中的应用 [J]. 建材发展导向 (上). 2021, (1)144-146.