

光伏发电技术在分布式能源系统中的应用与发展

毕帅帅

胜通和科技有限公司江苏分公司, 江苏 南京 210003

DOI:10.61369/WCEST.2026010012

摘 要： 能源结构提速转型推进中，分布式能源系统凭借灵活、高效、就地消纳的特点，获得大量关注。光伏发电作为重要的可再生能源形式，依托清洁环保、易于分布式部署等优势，在分布式能源系统中被广泛采用，并逐渐成为系统的重要电源组成；结合储能、微网及智能控制技术协同布置，光伏发电切实增强系统供电可靠性与能源利用效率。但出力波动、电能质量控制及系统协同运转等问题，仍制约应用拓展。本文围绕关键技术优化与系统集成发展，系统研究光伏发电在分布式能源系统中的应用模式与发展方向。

关 键 词： 光伏发电；分布式能源；系统集成；能量管理；低碳发展

Application and Development of Photovoltaic Power Generation Technology in Distributed Energy Systems

Bi Shuaishuai

Jiangsu Branch of Shengtonghe Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210003

Abstract： As the energy structure accelerates its transformation, distributed energy systems have garnered significant attention due to their flexibility, efficiency, and ability to consume energy locally. Photovoltaic (PV) power generation, as an important form of renewable energy, is widely adopted in distributed energy systems owing to its advantages of being clean, environmentally friendly, and easy to deploy in a distributed manner. It has gradually become a crucial power source component of the system. Combined with energy storage, microgrids, and intelligent control technologies for coordinated deployment, PV power generation effectively enhances the reliability of system power supply and energy utilization efficiency. However, issues such as output fluctuations, power quality control, and coordinated system operation still constrain its application expansion. This paper systematically studies the application modes and development directions of PV power generation in distributed energy systems, focusing on the optimization of key technologies and the development of system integration.

Keywords： photovoltaic power generation; distributed energy; system integration; energy management; low-carbon development

引言

围绕“双碳”目标，伴随能源结构深度调整，集中式供能模式在灵活性和安全性上的局限慢慢显现。布式能源系统渐成能源发展的核心方向，光伏发电技术拥有清洁、高效、易于分布式部署的特质，在分布式能源系统表现出强劲应用潜力。光伏发电在系统接入、运行控制及协同配置相关环节已取得一定进展，但稳定性和系统优化仍有进步空间。本文梳理光伏发电与分布式能源系统的协同应用路径，全面分析关键技术及发展趋势，为后续研究奠定基础。

一、光伏发电技术在分布式能源系统中的技术基础

（一）光伏发电的基本原理与技术类型

光伏发电以半导体光生伏特效应基本原理，当光子能量超过半导体禁带宽度时，材料内部产生电子—空穴对，在内建电场作用下形成定向电流，从而实现光能向电能直接转化。目前，主流晶硅光伏组件的能量转换效率当前稳定在18%~22%，实验

室测试中已突破26%。光照强度、温度及入射角等因素影响组件输出，组件温度每升高1℃，输出功率降幅约0.35%~0.45%^[1]。

按技术类型划分，单晶硅光伏组件存在晶格完整、载流子迁移率高的属性。组件效率普遍超出多晶硅2~3个百分点，适配屋顶这类面积有限的分布式场景；多晶硅组件制造成本偏低，大量用于大规模分布式项目；薄膜光伏（如非晶硅、碲化镉、铜铟镓硒）具有弱光响应好、温度系数低等长处，高温或阴影环境下年

发电量稳定，异质结、TOPCon及钙钛矿叠层等新型技术。在效率与衰减控制上呈现发展潜力，为分布式系统高效运转提供技术支持^[2]。如表1所示。

表1 不同光伏发电技术关键性能参数对比

光伏技术类型	组件效率（%）	温度系数（%/℃）	年衰减率（%）	典型应用场景
单晶硅	20 ~ 22	-0.35 ~ -0.40	0.4 ~ 0.5	屋顶分布式、BIPV
多晶硅	17 ~ 19	-0.40 ~ -0.45	0.5 ~ 0.6	工业园区、地面分布式
薄膜光伏	12 ~ 15	-0.20 ~ -0.30	0.7 ~ 0.8	高温、弱光环境
高效新型（TOPCon/HJT）	23 ~ 24	-0.30 ~ -0.35	0.3 ~ 0.5	高效分布式系统

（二）分布式能源系统的结构组成与运行特性

分布式能源系统聚焦用户侧打造，协调分布式电源、储能装置、负荷及能量管理系统的集成供能系统，一般包含分布式发电单元、能量转换与控制设备、储能系统以及通信与监测平台。系统规模以1千瓦级到1兆瓦级为主，通过实现就地发电、就地消纳和就近平衡，可有效降低输配电损耗，压缩能源输送距离，调整能量调度路径，将传统集中供能时6% ~ 8%的输电损失率降到2%以下^[3]。

分析运行特性，分布式能源系统具备多能互补、运行模式灵活的属性，能按照负荷变化切换并网、离网或微网运行状态；系统对电源侧响应速度、调节能力设定的标准偏高，普遍具备分钟级乃至秒级功率调节能力，应对负荷波动及可再生能源出力变动；同时，系统需在电压稳定性、频率控制及功率质量层面符合配电网技术标准，系统需对接入电源的功率波动幅度与谐波水平进行规范控制，以维持供能的稳定性与可靠性。

（三）光伏发电与分布式能源系统的技术匹配性分析

光伏发电具备分散布局、模块化拓展、建设周期短等特点，与分布式能源系统“靠近负荷中心”的建设理念高度吻合。光伏组件可直接布设到建筑屋顶、厂房立面或闲置场地，实现和用能负荷的空间对应；日负荷曲线和光伏出力重叠度较高的情形，自发自用占比可提升至60% ~ 80%，大幅削减系统购电需求^[4]。

从系统调度层面考量，光伏发电出力具有明显间歇性和随机性。晴转阴等工况里，功率变化速率能到额定功率的10% ~ 20%/min，对分布式系统调度和稳定运行造成挑战；因此，在技术适配过程中，应结合储能容量配置、逆变器快速功率调节能力及能量管理策略进行协同优化。常规情形下，装设10% ~ 30%额定容量的储能系统能有效平抑短时功率波动，令系统运行参数达到分布式能源系统对电源灵活性和稳定性的技术要求^[5]。

二、光伏发电技术在分布式能源系统中的应用模式

（一）光伏发电在分布式供能系统中的接入方式

并网型光伏系统是当前分布式能源系统里应用最广的接入方式。通过逆变器将直流电转换为符合配电网技术标准的交流电，从低压或中压侧接入公共电网，常规接入电压等级为0.4 kV或10 kV；逆变器功率因数通常可在0.9及以上范围内调节，并具备一定的无功调节能力。并网型系统运行采用“自发自用、余电上网”为主模式，能切实压低用户侧用电负荷峰值，同步降低配电网线路功率反向传输引发的电压波动风险。

聚焦离网型及微网系统，光伏发电常属核心或关键电源类

型，和柴油机、风电及储能装置一起组成独立供能系统，这类系统多投用在电网覆盖不足或供电可靠性要求较高的场景，通常把系统运行频率控制在50 Hz±0.2 Hz区间。提高逆变器控制精度和响应速度的标准，合理协同光伏发电和储能系统，是保障离网系统稳定运行的核心。储能容量一般按日均负荷的20% ~ 40%配置，能有效缩小昼夜功率落差，提升供能连贯性^[6]。

（二）光伏发电在典型分布式能源场景中的应用

工业园区分布式能源系统内，光伏发电大多和大规模用电负荷直接相连，构建“源一荷”匹配度高的应用模式。园区屋顶和厂房闲置空间可布设兆瓦级光伏阵列，年等效满负荷利用小时数常规范围为1100 ~ 1400 h。与园区负荷曲线保持较高同步性运行，白天产能高峰时段光伏发电消纳比例高，可减少园区最大需求，缩减变压器容量冗余配置，优化整体供能架构。

城市建筑及公共设施里，分布式光伏系统以建筑一体化或屋顶光伏为主要类型，系统容量大多集中在几十千瓦到数百千瓦范围。这类系统更侧重和建筑用能的适配性，逆变器一般拥有低电压穿越及快速功率调节能力，契合城市配电网运行需求。农村及偏远地区的分布式能源系统，把提高供电覆盖率和供能稳定性作为目标。光伏发电整合储能和小型微网技术，可做到全天不间断供电，年平均供电可靠率可提高到99%以上，切实优化用能环境。

（三）光伏发电对分布式能源系统运行性能的影响

看系统运行稳定程度，光伏发电采用就地发电和就地消纳模式，减短电能传输路径，减少线路损耗和故障影响范围。分布式系统里光伏发电占比达20% ~ 30%，可显著缓解上级电网负荷压力，增强局部供能稳定性，但它的出力波动会让系统频率和电压控制面临更严格标准。需结合储能与控制策略协同调节，维持系统运行参数符合允许范围。

从能源利用效率和经济性的维度分析，分布式能源系统加入光伏发电，可明显拉高可再生能源占比，减少化石能源消耗。系统综合能源利用效率能从传统供能模式的60% ~ 70%，提升到80%以上，同时压缩购电成本及峰谷电价差引发的运行压力。看低碳属性这一项，光伏发电在运行环节几乎不排放碳，参照每千瓦时发电量减排二氧化碳0.7 ~ 0.9 kg核算。分布式光伏系统运行全程可明显降低单位供能碳强度，为分布式能源系统绿色发展筑牢关键支撑^[7]。如表2所示。

表2 不同光伏渗透率下分布式能源系统运行指标变化

光伏装机占比	系统综合能效（%）	电压合格率（%）	年碳减排量（t/MW）	储能配置比例
10%	72	99.5	750	10%
20%	78	98.8	820	20%

光伏装机占比	系统综合能效 (%)	电压合格率 (%)	年碳排放量 (t/MW)	储能配置比例
30%	82	97.5	900	30%
40%	83	95.8	960	40%

三、光伏发电技术在分布式能源系统中的发展趋势与挑战

（一）光伏发电在分布式能源系统应用中面临的技术问题

光伏发电的出力大小与太阳辐照条件密切相关，云量变化、气温升高及组件朝向等因素会一起影响设备功率，带有突出的随机、间断特质。构建分布式能源系统环节，光伏装机容量占系统总电源比例突破25%时，系统对功率波动的反应强度显著上升。典型晴转阴天况，光伏出力变化速率可至额定容量的15% ~ 30%/min，个别时段甚至可能出现幅值更大的瞬时功率波动，易造成系统频率偏移和电压越限状况。低压配电网内或负荷常变的场景，这类问题表现更明显，对调度系统响应速度、功率平衡能力及备用资源配置提更严标准。

集中接入分布式光伏还会对电能质量控制造成挑战，逆变器并网运行阶段，可能产生高次谐波、电压闪变及功率因数波动等问题，必须严格把谐波电流总畸变率控制在5%以内，才能契合现行配电网技术标准。多套光伏系统集中接入同一馈线，出力叠加影响容易造成局部电压上涨，部分节点电压偏差或超出±7%的允许区间，威胁用电设备的安全运行^[1]。当下部分分布式能源系统在协调控制与智能化层面仍存不足，光伏、电网、储能及负荷的协同调度多采用固定控制策略，不具备复杂工况下的实时优化与自适应调节能力，限制系统运行性能再提上去。

（二）关键技术发展方向与优化路径

依据光伏发电出力存在随机性和间歇性的特点，推动光伏、储能及负荷调节技术的协同发展，可成为分布式能源系统稳定运行的核心技术方案。搭载锂离子电池、超级电容等储能装置，可快速补偿秒级到分钟级时间尺度内的光伏功率波动。锂离子电池有两大优势：能量密度高，循环效率90%以上，支持中长时间功率调节；超级电容响应速度快、充放电效率高，可对瞬时功率波动抑制发挥关键作用。做工程实操时，储能系统功率配置比例多为光伏装机容量的20% ~ 40%，储能时长以1 ~ 2 h为主要控制区间，兼顾系统调节能力和经济性，引导可调负荷加入系统运

行，对空调、充电设施等负荷开展柔性调控，落实需求侧响应，可有效拉平供需差距，减少系统对储能容量的依赖。

从系统控制角度，智能控制与能量管理技术是提高分布式能源系统运行水平的核心依托，先进逆变器正逐步拥有电压、频率及无功功率自适应调节能力，可在并网点电压偏差超出±3%或频率波动突破允许范围时快速响应，控制响应时间已压缩至毫秒级。能量管理系统统筹分析光伏出力预测、负荷变化趋势及储能状态，制定日前、日内及实时多时间尺度的优化调度策略，借助这一基础，数字化和信息化技术应用持续拓展，系统运行数据采集精度提至秒级甚至亚秒级，为状态评估、故障预警及预测控制筑牢可靠数据基础，实现分布式能源系统运行效率和安全性同步升级。

（三）光伏发电在分布式能源系统中的未来发展趋势

从技术发展维度看，光伏发电正朝着规模化和高效化方向发展，组件转换效率持续走高，新型高效电池技术有能力把量产效率稳定到24%以上，同时把组件衰减率逐年控制在0.3% ~ 0.5%，大幅提升分布式光伏系统全生命周期发电能力。从系统维度，分布式光伏装机量持续增长，单体项目功率从早期几十千瓦逐步增长至兆瓦级，配电网适配要求同步升级。

分布式能源系统整体升级阶段，多能互补将是核心发展方向，光伏发电会和风能、天然气分布式能源及储能系统协同搭配，让不同能源在时间和空间维度互补运作。光伏发电会长期作为新型能源体系里的基础清洁能源，和智能电网及能源互联网深度融合，参与推进区域能源平衡及碳减排目标实现。政策环境和技术条件持续优化，光伏发电在分布式能源系统里的角色将从补充电源慢慢变成重要支撑电源，是能源系统可持续发展的核心构成。

四、结语

光伏发电技术依托清洁、高效和灵活部署等优势，在分布式能源系统中具备良好的应用潜力。采用合理的系统接入方法和多场景应用形式，光伏发电切实提升分布式能源系统的供能稳定性与能源利用效率，但波动性、电能质量及协同控制等问题，仍对系统运行有更高标准。储能、智能控制及数字化技术稳步提升，光伏发电将在分布式能源系统中承担更核心职责，为打造高效、低碳的新型能源体系筑牢坚实基础。

参考文献

[1] 陈淑媛. 分布式光伏并网发电系统的控制技术分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(11): 352–353.
[2] 李朋, 李文萱, 李亚男. 基于 Markov 模型的风光互补能源系统可靠性研究 [J]. 黑龙江工业学院学报 (综合版), 2024, 24(11): 112–116.
[3] 曲琪, 滕菲, 郭禹辛, 等. 考虑算力需求的港口综合能源系统分布式能源管理 [J]. 综合智慧能源, 2025, 47(01): 42–50.
[4] 陈磊. 太阳能光伏技术在分布式能源系统中的应用研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2024, (20): 130–134.
[5] 任凯, 黄馨漫, 黄贵东, 等. 分布式光伏发电系统在微电网中的应用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (30): 7–9.
[6] 司松平. 分布式能源与微电网技术在输配电系统中的应用 [J]. 内江科技, 2024, 45(10): 23–24+8.
[7] 李洋, 麻全周, 曹玉会, 等. 基于数字孪生技术的分布式光伏电站智慧能源管理平台设计及应用 [C]// 中国国际科技促进会智慧城市轨道交通专业委员会. 智慧城市与轨道交通 2024. 天津智能轨道交通研究院有限公司; 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 2024: 357–362.
[8] 官雅茹, 徐赵鹏, 李佳琳, 等. “双碳”背景下天然气分布式与光伏融合的智慧能源系统在工业项目中的应用 [C]//《煤气与热力》杂志社有限公司. 中国燃气运营与安全研讨会 (第十三届) 论文集 (下册). 中交城市能源研究设计院有限公司, 2024: 369–379.