

光伏发电并网关键技术及对策研究

孙冉冉

海南欣城电力设计工程有限公司 海南 海口 570100

摘要：在全球对清洁能源需求持续攀升的背景下，光伏发电作为重要的可再生能源发电形式，发展迅猛。然而，光伏发电并网面临电能质量、功率波动、电网适应性等诸多技术难题。本文深入剖析光伏发电并网的关键技术，涵盖最大功率点跟踪技术、并网逆变器技术、孤岛检测技术等，并详细分析当前并网存在的问题。针对这些问题提出切实可行的对策与建议，旨在提升光伏发电并网的稳定性与可靠性，推动光伏发电产业迈向高质量发展阶段。

关键词：光伏发电；并网关键技术；电能质量；功率波动；孤岛检测

1 引言

能源是人类社会发展的基石，传统化石能源的日益枯竭以及环境问题的不断加剧，使得开发利用可再生能源成为全球能源发展的必然选择。光伏发电凭借其资源丰富、分布广泛、无污染等显著优势，近年来实现了快速发展。但光伏发电具有间歇性、波动性和随机性等特点，大规模并网会对电网的电能质量、稳定性和安全性产生不可忽视的影响。因此，深入研究光伏发电并网关键技术及对策具有重要的现实意义。

2 光伏发电并网概述

2.1 光伏发电原理

光伏发电基于半导体界面的光生伏特效应，将光能直接转化为电能。当太阳光照射到光伏电池上时，光子能量大于半导体禁带宽度的部分会被吸收，激发电池中的电子从价带跃迁到导带，从而产生电子-空穴对。在电池内部电场的作用下，电子和空穴分别向电池的两端移动，形成电流^[1]。多个光伏电池通过串联和并联的方式组成光伏组件，多个光伏组件再进一步组成光伏阵列。光伏阵列产生的直流电经过逆变器转换为交流电后并入电网。

2.2 光伏发电并网的意义

从能源角度看，光伏发电并网有助于缓解能源短缺问题，减少对传统化石能源的依赖，降低能源进口风险。以我国为例，太阳能资源丰富，若能充分利用，可有效补充能源供应。从环境角度而言，光伏发电过程中不产生温室气体排放和污染物，有助于减少环境污染，应对气候变化。据测算，每安装1兆瓦的光伏发电系统，每年可减少二氧化碳排放约1000吨。从经济角度分析，光伏发电产业的发展能够带动相关产业链的发展，创造大量就业机会，促进经济增长。

3 光伏发电并网关键技术

3.1 光伏组件与逆变器的适配设计

光伏组件与逆变器之间的匹配直接影响系统的整体效率和稳定性。在工程设计中应重点关注以下几个方面：一是电压匹配：光伏组件串联后的开路电压应在逆变器允许的最大输入电压范围内，并留有一定裕量（通常为80%~90%）。同时，在低温条件下组件开路电压会上升，需进行极端工况校验。二是功率匹配：组件总功率应略大于逆变器额定容量（一般不超过1.2倍），以提升逆变器利用率并避免“弃光”现象。三是MPPT数量与范围：多组组件接入时，应根据朝向、倾角、阴影遮挡等因素合理分配MPPT通道。每台逆变器支持的MPPT数量和电压范围决定了其对复杂阵列结构的适应能力。四是环境适应性：选用具备良好防尘、防水等级（如IP65以上）的逆变器，适用于户外安装；同时应具备宽温度工作范围，适应不同地区气候条件。

3.2 系统通信与自动化控制

随着新能源场站智能化水平的提升，光伏发电系统需具备完善的通信功能，实现远程监控、数据采集与自动控制，具体包括：（1）通信协议标准化：采用主流通信协议如Modbus RTU/TCP、IEC 61850、DL/T 645等，便于接入调度系统或能量管理系统（EMS）。（2）远程监测与控制：通过SCADA系统实现对逆变器运行状态、组件发电效率、故障信息等的实时监控，并支持远程启停、参数设置等功能。（3）AGC/AVC协调控制：大型光伏电站需接入区域调度中心，参与有功功率调节（AGC）和无功电压调节（AVC），提高电网运行稳定性。（4）数据采集完整性：配置必要的传感器和智能电表，采集发电量、电压、电流、频率、功率因数等关键运行参数，满足计量结算和运行分析需求^[2]。

3.3 并网运行安全性与电网适应性

光伏发电站点接入电网后，必须确保不引起电网运行异常，尤其要防止线路过载、电压越限等问题的发

生。根据配电网承载能力合理确定光伏装机容量，避免造成线路重过载或电压升高。对于分布式光伏，建议接入用户侧低压电网时单点接入容量不宜超过变压器容量的25%。光伏逆变器应具备低电压穿越（LVRT）、高电压脱网、频率异常响应等功能，符合《GB/T 19964-2012 光伏发电站接入电力系统技术规定》等相关标准。逆变器输出应满足 $THD < 3\%$ ，并配备滤波装置或采用高频调制技术，减少对电网的谐波污染。部分场景下需配置SVG或电容器组，用于调节功率因数，满足电网对并网点功率因数不低于0.95（滞后）的要求。

3.4 继电保护与调度配合

为保障光伏电站与电网的安全运行，继电保护配置需满足快速、可靠、可调的要求，并与主网保护策略相协调。保护类型配置包括：（1）直流侧：配置直流断路器、熔断器，防止组件短路或接地故障；（2）交流侧：配置过流保护、速断保护、零序保护等，防止逆变器故障或并网点异常；（3）孤岛保护：逆变器应具备主动检测孤岛效应的能力，防止非计划孤岛运行。保护动作整定值应避开正常运行波动范围，避免误动；同时与上级保护设备形成配合关系，保证选择性和灵敏性。光伏系统应具备接收调度指令的接口（如遥控信号或通信指令），可在紧急情况下迅速切除或调整出力，满足电网调度需求。系统应具备故障录波功能，记录保护动作前后电气量变化情况，便于事故分析与处理。

3.5 孤岛检测技术

被动式检测方法：通过监测电网的电压、频率、相位等参数的变化来判断是否发生孤岛效应。例如，当电网电压超出正常范围（如 $\pm 10\%$ ）或频率超出正常范围（如 $\pm 0.5\text{Hz}$ ）时，判定为发生孤岛效应。该方法实现简单，不需要额外的硬件设备，但检测盲区较大。在负载功率与光伏发电功率匹配时，电网参数可能不会发生明显变化，导致无法及时检测出孤岛效应。据统计，被动式检测方法的检测盲区可达10%-20%。

主动式检测方法：通过向电网注入一定的扰动信号，观察电网参数的变化来判断是否发生孤岛效应。常见的主动式检测方法有频率偏移法、阻抗测量法等。频率偏移法通过周期性地改变逆变器输出电流的频率，使电网频率发生偏移。如果电网正常连接，频率偏移会被电网的惯性所抑制；如果发生孤岛效应，频率偏移会逐渐增大，当超过设定阈值时判定为孤岛。该方法检测盲区小，检测速度快，但可能会对电能质量产生一定影响，如引起电压波动和谐波增加。阻抗测量法通过测量电网的阻抗来判断是否发生孤岛效应。当发生孤岛时，电网阻抗

会发生变化，通过检测阻抗的变化可以及时发现孤岛。但该方法需要精确的阻抗测量电路，成本较高。

3.6 电能质量控制技术

电压波动控制：通过合理设计光伏发电系统的容量和布局，采用无功补偿装置等措施，可以有效控制电压波动。例如，在光伏发电系统中配置静止无功发生器（SVG）或静止无功补偿器（SVC）。SVG可以快速、连续地调节无功功率的输出，响应时间可达几毫秒，能够有效抑制电压波动^[3]。SVC通过控制晶闸管的导通角来调节电容器或电抗器的投入量，从而调节无功功率。在实际应用中，根据电网电压的变化实时调节无功功率的输出，使电压波动控制在允许范围内。根据相关标准，电网电压波动范围一般应不超过 $\pm 5\%$ 。

谐波抑制：采用滤波器是抑制谐波的常用方法。常见的滤波器有无源滤波器、有源滤波器和混合滤波器。无源滤波器由电容器、电抗器和电阻器组成，结构简单，成本低，但只能滤除特定频率的谐波。例如，单调谐滤波器可以滤除某一特定频率的谐波，其滤波效果可达90%以上。有源滤波器通过实时检测负载电流中的谐波成分，产生一个与谐波电流大小相等、相位相反的补偿电流，从而抵消谐波电流^[3]。有源滤波器可以动态补偿谐波，抑制效果较好，响应时间可达几十微秒，但成本较高。混合滤波器结合了无源滤波器和有源滤波器的优点，先用无源滤波器滤除大部分谐波，再用有源滤波器滤除剩余的谐波，具有较好的性能和经济性。

三相不平衡治理：对于三相不平衡的光伏发电系统，可以采用三相不平衡补偿装置进行治理。该装置通过实时监测三相电流和电压的不平衡度，输出相应的补偿电流，使三相电流和电压达到平衡。三相不平衡度通常用负序电流与正序电流的比值来表示，一般要求三相不平衡度不超过2%。

4 光伏发电并网存在的问题

光伏发电并网面临电能质量、功率波动、电网适应性及标准规范不完善的问题。电能质量问题包括电压波动、谐波污染和三相不平衡，影响设备运行和电网效率，如精密仪器可能因电压波动受损，谐波增加损耗，三相不平衡则降低供电能力。功率波动源于光照和温度变化导致的输出功率间歇性和波动性，这给电网调度带来挑战，并可能导致稳定性问题甚至电网崩溃。电网适应性方面，部分光伏系统并网性能不佳，逆变器响应速度慢，低电压穿越能力不足，易在电网故障时脱网，加剧故障程度。此外，现有标准和规范不够完善，对电能质量和并网性能要求不明确，使得不同厂家设备性能差

异大,一些小型企业采用低质设备,进一步影响电网稳定运行。

5 光伏发电并网对策研究

5.1 加强电能质量控制

建立完善的电能质量监测网络,实时监测光伏发电并网点的电能质量指标,如电压、频率、谐波、三相不平衡度等。在并网点安装高精度的电能质量监测装置,将监测数据实时传输到电网调度中心。通过对监测数据的分析和评估,及时发现电能质量问题,并采取相应的措施进行处理。例如,当发现电压波动超过允许范围时,及时调整无功补偿装置的输出功率。加大对电能质量控制设备的研发和推广力度,鼓励光伏发电企业采用先进的无功补偿装置、滤波器等设备,提高光伏发电系统的电能质量。同时,加强对电能质量控制设备的运行维护和管理,确保其正常运行。定期对设备进行检测和校准,及时更换老化和损坏的部件。

5.2 缓解功率波动问题

储能技术可以有效缓解光伏发电的功率波动问题。通过在光伏发电系统中配置储能装置,如蓄电池、超级电容器等,在光照强度高、发电功率大时将多余的电能储存起来,在光照强度低、发电功率小时将储存的电能释放出来,从而平滑光伏发电的输出功率。例如,采用锂离子电池作为储能装置,其充放电效率可达90%以上,响应时间在毫秒级,能够快速响应功率波动^[4]。合理规划光伏发电系统的布局和容量,避免光伏发电功率的过度集中。根据不同地区的光照资源、电网结构和用电需求等因素,科学确定光伏发电项目的规模和选址。例如,在光照资源丰富的地区可以适当增加光伏发电项目的规模,但要考虑到电网的消纳能力;在用电负荷集中的地区,可以优先建设分布式光伏发电项目,就近消纳电能。

5.3 提高电网适应性

鼓励科研机构和企业加大对光伏逆变器的研发投入,提高光伏逆变器的性能和可靠性^[4]。研发具有快速动态响应、低电压穿越能力强等特性的光伏逆变器,使其能够更好地适应电网的要求。例如,采用先进的控制算法和电力电子器件,将逆变器的动态响应时间缩短至几

毫秒以内,提高其在电网故障时的低电压穿越能力。建立完善的光伏发电并网测试和认证体系,对光伏发电设备的并网性能进行严格测试和认证。只有通过测试和认证的光伏发电设备才能并网运行,确保光伏发电系统与电网的相互适应。测试内容包括并网电流质量、动态响应性能、低电压穿越能力等方面。

5.4 完善标准和规范

政府相关部门应加快制定和完善光伏发电并网的技术标准和规范,明确光伏发电系统的电能质量、并网性能、安全要求等方面的指标和测试方法。例如,制定详细的电能质量限值标准,规定电压波动、谐波含量、三相不平衡度等指标的具体数值。同时,加强对标准和规范的宣传和执行力度,确保光伏发电项目的建设和运行符合标准要求。积极参与国际光伏发电标准的制定和修订工作,加强与国际先进水平的接轨。通过国际合作与交流,借鉴国外先进的技术和经验,不断完善我国光伏发电并网的标准和规范体系。例如,与国际电工委员会(IEC)等国际组织合作,参与相关标准的制定和研讨。

结语

光伏发电并网面临电能质量、功率波动和电网适应性挑战,但通过优化关键技术如最大功率点跟踪、并网逆变器等可提升稳定性和可靠性。技术进步与成本降低将使光伏更加重要,智能电网和微电网的发展促进高效并网,储能技术增强消纳能力和电网稳定性。国际合作对于推动技术发展及实现全球能源转型和可持续发展目标至关重要。未来,随着相关技术的不断进步,光伏发电将在能源结构中扮演更为关键的角色。

参考文献

- [1]许志远,余佳成.光伏发电并网关键技术及优化对策研究[J].光源与照明,2024,(08):87-89.
- [2]李昂.光伏发电并网中的关键技术优化分析[J].集成电路应用,2025,42(02):334-335.
- [3]杜小波.大容量光伏发电关键技术及并网研究[J].电子产品世界,2024,31(03):60-63.
- [4]王璐凡.光伏发电并网系统及其关键技术分析[J].光源与照明,2023,(08):111-113.