

Integration and challenges of photovoltaic power generation in smart grids

Bo Zhu

China Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., Bijie, Guizhou, 553100, China

Abstract

Integrating photovoltaic power generation into the smart grid is crucial. It offers renewable, clean, environmentally friendly, widely distributed, and energy-independent characteristics, with high initial investment but low operational costs. Integrating photovoltaic power can optimize the energy structure, enhance grid flexibility, meet growing electricity demand, promote energy conservation and emission reduction, and drive power technology innovation. However, the integration process presents numerous challenges, such as unstable power generation, poor power quality, difficulties in grid planning and layout, inadequate energy storage technology, complex communication and control systems, and incomplete policy and market mechanisms, along with a shortage of specialized talent. Therefore, it is necessary to adopt measures like optimizing power source structures and dispatch management, addressing power quality issues, to facilitate the integration of both and promote the development of the smart grid.

Keywords

photovoltaic power generation; smart grid; integration; challenges

光伏发电在智能电网中的集成与挑战

朱波

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 中国·贵州 毕节 553100

摘 要

光伏发电集成到智能电网里很重要。它有可再生、清洁环保、分布广泛、能源独立的特点, 而且初始投资高但运营成本低。把光伏发电集成进来, 能优化能源结构、让电网更灵活、满足电力需求增长、促进节能减排, 还能推动电力技术创新。不过, 集成过程有很多挑战, 像发电不稳定、电能质量有问题、电网规划布局难、储能技术不行、通信与控制复杂、政策市场机制不完善, 还有专业人才不够。所以, 要采取优化电源结构和调度管理、治理电能质量等办法, 推动两者融合, 促进智能电网发展。

关键词

光伏发电; 智能电网; 集成; 挑战

1 引言

现在全球对清洁能源的需求越来越多, 光伏发电因为可持续、无污染, 在能源领域越来越重要。智能电网是现代电力系统的发展方向, 它高效、可靠、灵活, 能更好地接纳新能源接入。把光伏发电融入智能电网, 既能缓解能源危机、减轻环境污染, 又能推动电力行业技术升级和可持续发展。但是, 这个融合过程很难, 有技术、经济、管理等方面的挑战。深入研究光伏发电在智能电网中的集成和挑战, 对实现能源转型、构建高效智能电力系统很重要。

2 光伏发电的优势

2.1 可再生性

太阳能是用不完的可再生能源。只要太阳在, 光伏发电就能一直进行, 不受传统化石能源储量的限制。我国西部地区地广光足, 很多大型光伏电站靠这些优势稳定发电。比如青海有个大型光伏电站, 面积很大, 铺了很多太阳能电池板, 把太阳能变成电能, 给当地居民生活生产供电, 多余的电还能送到周边地区, 推动区域经济发展。这种可再生的特点, 让光伏发电成为解决能源可持续问题的重要办法, 特别是现在全球能源危机严重, 各国都想减少对进口化石能源的依赖, 它的优势更明显。

2.2 清洁环保

光伏发电过程很干净, 不产生温室气体, 也不排放二氧化硫、氮氧化物等污染物。传统火电在能源转换时污染严重, 发一度电大概排放 0.8 千克二氧化碳。而光伏发电几乎

【作者简介】朱波 (1987–), 男, 中国贵州息烽人, 本科, 工程师, 从事火电厂、光伏发电研究。

没排放。在空气质量不好的城市,要是大规模推广光伏发电,代替部分火电,能大大减少环境污染。有数据显示,某城市光伏发电占比提高后,空气中二氧化硫、氮氧化物等污染物浓度明显下降,对改善空气质量、应对气候变化有好处,是实现绿色能源发展的关键技术。

2.3 分布广泛

太阳能到处都有。像四川凉山州部分偏远山区,电网不好覆盖,居民用电难。但用分布式光伏发电,在居民屋顶、村子空地装发电设备,就能解决用电问题。在新疆、内蒙古的沙漠地区,光照足、地方大,建大型光伏电站,把电送到全国各地。城市屋顶、工业园区也能装光伏发电设备,这给分布式光伏发电发展提供了很大空间,能满足不同地方的电力需求。

2.4 能源独立性

光伏发电系统在一些地方能自己供应能源。偏远地区或用电独立的场所,像远离城镇的边防哨所,以前靠集中供电电网,电网出问题或者远距离输电断了,就会断电。建了光伏发电设施后,哨所装了独立的太阳能发电系统,能把太阳能存起来。电网有故障时,也能用自己发的电,保障正常运转和设备运行,供电更自主可靠,减少了断电风险,保证了特殊区域正常运行^[1]。

3 光伏发电集成到智能电网的必要性

3.1 优化能源结构

传统电力系统太依赖化石能源发电,能源结构单一,还面临资源用完和环境污染问题。我国有些地区以前长期靠煤炭发电,空气里二氧化硫、氮氧化物等污染物超标,空气质量变差,雾霾多。把光伏发电集成到智能电网,能增加清洁能源在能源结构里的占比。某省大规模推广光伏发电,建了很多大型光伏电站和分布式光伏发电项目,清洁能源占比从30%提到40%,能源结构变得更多元、更清洁,减少了对化石能源依赖,能源供应更安全稳定,当地生态环境也变好了。

3.2 提升电网灵活性

智能电网本来就灵活适应能力强,光伏发电接入能让它更强。智能电网用先进调度和控制技术,能根据光伏发电实际发电情况和用电负荷变化,灵活分配电力。白天光照足,光伏发电多,智能电网能把多余电能存到储能设备,晚上或阴天用,也能把电送到其他用电地方。用电高峰时,智能电网能合理调配各种电源,先用光伏发电,不够的部分用火电、水电等补充,电力传输利用更高效,电网应对不同情况能力变强,保证电力供应稳定可靠。

3.3 满足电力需求增长

经济发展、社会进步,电力需求一直增加。我国近十年,全社会用电量平均每年涨5%左右。工业生产规模变大,新产业起来,居民家里电器越来越多,电力需求涨得快。光伏

发电作为新的电力供应方式,能给电网提供更多电力。夏季用电高峰,有些城市分布式光伏发电能满足10%-20%的电力需求,缓解了电网供电压力。某大城市在商业建筑、居民小区屋顶建分布式光伏发电设施,夏天给空调等设备供电,减轻了电网负担,满足了不断增长的用电需求。

3.4 促进节能减排

光伏发电很清洁,集成到智能电网后,更多清洁电力送到用户那。统计显示,用1万千瓦时光伏电力,能少排大概8吨二氧化碳。这就大大减少了传统高污染、高能耗发电方式的使用。一些工业园区以前主要用火电,碳排放多。引入光伏发电并集成到智能电网后,部分电力由光伏发电提供,园区二氧化碳排放量明显降低,实现了节能减排目标,对环保很重要,推动了可持续发展理念在能源领域的落实^[2]。

3.5 推动电力技术创新

光伏发电和智能电网集成,涉及电力电子、通信、控制等很多领域技术融合。这让相关技术不断创新。为精准监测控制分布式光伏发电,研发出更先进的通信协议和智能电表。新通信协议在复杂环境能稳定传数据,智能电表能实时监测光伏发电量和用户用电量。电力电子技术方面,新型逆变器不断出现,电能转换效率提高,能量损耗降低。这些技术创新推动了光伏发电和智能电网集成技术进步,还让整个电力行业升级,为建设更先进智能的电力系统打基础,促进电力行业向智能化、高效化发展。

4 光伏发电在智能电网集成中的现存问题

4.1 发电间歇性和波动性

光伏发电受天气、昼夜影响很大,发电功率不稳定。阴天时,光伏发电量可能只有晴天的10%-30%。下雨天,雨滴影响光线,发电量大幅下降甚至不发电。晚上没光照,就发不了电。光照强度变化快时,比如太阳被云快速挡住又露出来,几分钟内发电功率能波动50%以上。这给智能电网调度和稳定运行带来大麻烦。电网得随时调整发电计划和电力分配,不然电网频率和电压会不稳,影响电力供应质量,一些对电压稳定要求高的设备就没法正常工作^[3]。

4.2 电能质量问题

光伏发电系统接入智能电网,容易有电能质量问题。逆变器等设备工作会产生谐波,逆变器把直流电变成交流电,里面电力电子器件开关动作,会产生非正弦波电流,注入电网后让电压波形变形。电压波形变形会让电机发热,电机里铜损和铁损增加,效率降低,寿命缩短,还影响其他用电设备。光伏发电功率变得快,还可能引起电压波动和闪变。在一些分布式光伏发电多的地方,电压波动能达到±5%以上,电能质量变差,影响用户用电体验和设备寿命。

4.3 电网规划与布局难题

光伏发电分布广还随机,集成到智能电网,给电网规划和布局带来困难。规划时,要考虑太阳能资源分布、当地

用电需求、电网结构等。不同地方太阳能资源不一样，有的地方光照足，有的弱。当地用电需求也不同，城市和工业区用电多，偏远农村用电少。规划不好，局部电网可能过负荷或者供电不足。有些地方盲目建分布式光伏发电项目，没考虑当地电网承受能力，配电网受不了大量光伏发电接入，就经常停电，影响居民和企业用电。

4.4 储能技术瓶颈

要让光伏发电稳定，储能技术很关键。但现在储能技术有不少问题。锂离子电池储能系统成本高，每千瓦时2000 - 3000元，大规模建储能设施太贵，限制了应用。而且电池充放电次数多了，性能会下降，循环寿命一般1000 - 2000次。用一段时间后，电池储能容量降低，要换电池，成本和维护难度都增加。其他储能技术，像铅酸电池成本低，但能量密度低、寿命短，也满足不了大规模储能需求。

4.5 通信与控制复杂性

智能电网要通过通信网络实时监测控制光伏发电设备，保证安全稳定运行。但光伏发电系统分布广，通信环境复杂。山区、偏远地区容易受地形、气候影响，通信会中断或者数据传输延迟。山区地形崎岖，信号被山体挡住会变弱或中断；偏远地区通信基础设施差，网络覆盖不够。不同厂家的光伏发电设备和智能电网控制系统可能不兼容，设备接口、通信协议不一样，增加了控制难度，影响系统运行效率，很难对光伏发电设备实时监测和精准控制^[4]。

5 应对光伏发电集成到智能电网挑战的策略

5.1 优化电源结构与调度管理

为解决光伏发电不稳定问题，智能电网可以增加其他稳定电源，像水电、燃气发电，形成多电源互补结构。某区域电网建了水电、光伏联合电站，利用水电调节灵活的特点。光伏发电不够时，比如阴天或晚上，水电能马上补充电力，保证电力稳定供应。用先进智能调度系统，根据天气预报、实时发电用电数据，精准预测光伏发电功率。通过大数据和人工智能算法，预测未来光照强度、天气变化，合理安排各种电源发电计划，让电力平稳供应，保证电网稳定运行，提高电力供应可靠性。

5.2 电能质量治理措施

针对光伏发电带来的电能质量问题，可以安装滤波器等设备来抑制谐波。在光伏发电系统逆变器输出端装有源电力滤波器，它能实时检测电网里的谐波电流，自己产生相反的电流来补偿，把电网电压总谐波畸变率控制在5%以内，保证电压波形正常，让用电设备正常运行。用动态无功补偿装置，能快速调节无功功率，根据光伏发电功率变化及时调整补偿量，解决电压波动和闪变问题，把电压波动幅度控制在±2%以内，提高电能质量，给用户稳定可靠的电力。

5.3 科学规划电网

电网规划时，要考虑光伏发电的分布和特点。用地理信息系统（GIS）等技术，评估不同地方的太阳能资源，结

合当地用电需求和电网现状，合理确定光伏发电设施接入点和容量。比如在城市规划中，优先在工业园区、公共建筑屋顶等用电多的地方建分布式光伏发电项目。这些地方用电量，光伏发电能就近用，减少输电损耗。同时，要升级改造配电网，增加线路容量、优化网络结构，提高电网承载能力和适应性。通过新建或改造输电线路，增加变电站容量，让电网能更好地适应光伏发电接入和电力传输^[5]。

5.4 推进储能技术发展

要加大对储能技术研发的投入，鼓励科研机构和企业一起研究，突破技术难题。一方面，研发新型储能材料和技术，像固态锂电池、液流电池等，提高储能设备的能量密度、循环寿命和充放电效率。固态锂电池比传统锂离子电池能量密度高、更安全，能提升储能设备性能。另一方面，通过政策引导和市场机制，推动储能技术商业化应用。给建设储能设施的企业税收优惠，降低成本，比如减免税费，减轻企业资金压力，促进储能产业发展，让光伏发电更稳定。

5.5 完善通信与控制系统

要建立可靠、高速的通信网络，把光纤通信、无线通信等方式结合起来，提高通信稳定性和抗干扰能力。在山区等地形复杂的地方，以光纤通信为主，用无线通信补充，保证信号稳定传输。制定统一的通信协议和接口标准，让不同厂家的光伏发电设备和智能电网控制系统能兼容。通过标准化的协议和接口，不同设备能正常通信和合作。用大数据、云计算技术，快速处理和分析大量运行数据，精准控制光伏发电设备，提高系统响应速度，保证系统安全稳定运行，及时发现和解决设备问题。

6 结语

光伏发电集成到智能电网是能源可持续发展的趋势。虽然现在有很多挑战，但通过优化电源结构和调度管理、治理电能质量、科学规划电网、发展储能技术、完善通信与控制系统、健全政策与市场机制、加强专业人才培养等办法，能有效应对，推动两者深度融合。这不仅能改善能源结构、促进节能减排，还能构建高效、可靠、智能的现代电力系统打下基础，支撑经济社会可持续发展。未来，随着技术进步和政策完善，光伏发电在智能电网中的应用前景会更好。

参考文献

- [1] 王建, 张文浩. 智能电网视域下新能源配电网调度优化方法研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (02): 28-29+33.
- [2] 车孝轩. 日本太阳能光伏发电的现状与未来展望[J]. 水电与新能源, 2025, 39(01): 1-7.
- [3] 林江丽. 2030年起新增风电光伏发电项目实现全面入市[N]. 济南日报, 2024-12-21(002).
- [4] 郭前程. 基于智能电网的光伏电站电能损耗分析方法研究[J]. 光源与照明, 2024, (11): 126-128.
- [5] 沈宁. 基于数据驱动的智能电网光伏能源预测方法研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 193-197+204.