

超低能耗建筑电气系统中光伏发电接入技术研究

文 / 叶明达 安庆皖江高科建筑安装工程有限公司

摘要: 在世界范围内提倡可持续发展, 能源转型是一个至关重要的课题。建筑行业作为能源消耗“大户”, 能耗问题已引起了人们的高度重视。超低能耗建筑的出现已成为当前建筑领域节能减排工作的一个重要发展方向。同时光伏发电以其清洁和可再生的特点在能源领域快速兴起。光伏发电与超低能耗建筑电气系统的连接, 不仅可以给建筑带来绿色能源, 还可以促进建筑朝着低碳化的方向发展。但在这一整合过程中面临着许多技术挑战, 例如接入技术选择, 电气系统冲击和优化策略。深入研究上述问题对于实现超低能耗建筑广泛利用以及光伏发电高效利用具有重要意义。

关键词: 超低能耗建筑; 电气系统; 光伏发电; 接入技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.072

引言

在科学技术迅速发展的今天, 建筑能耗和能源供应的矛盾也越来越突出。超低能耗建筑由于具有节能和环保等特点已逐渐成为建筑行业发展的趋势。而光伏发电这一新兴绿色能源技术对我国能源结构调整起到了至关重要的作用。随着光伏发电进入超低能耗建筑电气系统, 能源和建筑深度变革正在悄然进行。这一整合不仅使建筑能源供应模式发生了变化, 而且对电气系统稳定性和电能质量也有着深刻影响。如何克服技术难题并发挥二者优势已成为目前急需解决的课题, 同时也引发了人们对于相关接入技术研究的进一步深入。

一、光伏发电接入技术类型

(一) 集中式接入技术

集中式接入技术的核心思想是在光线充足的地方, 例如荒漠和戈壁, 集中布置大量的太阳能电池板, 从而

构建大型的光伏发电站, 然后经高压输电线路把发出的电与电网主干网相连。该技术类型核心优点是可充分利用大范围场地资源对太阳能资源进行有效采集与转化^[1]。集中式光伏电站经规模化建设后, 可利用大型高效太阳能电池组件及先进逆变器设备来降低单位发电成本并提高发电效率。以中国西部大沙漠为例, 许多GW级集中式光伏电站已建立。这些电站运行时通过集中监控与管理系统实现发电设备的实时监控与检修, 确保发电稳定可靠。同时集中式接入方便了电力调度与统一管理, 可对区域乃至全国电力供应提供强有力的支持, 对缓解大范围用电需求起到了举足轻重的作用。但它也有局限性, 例如对输电线路依赖性强、电力传输时损耗大、与负荷中心距离远、会造成电力供需错配(图1集中式接入技术)。

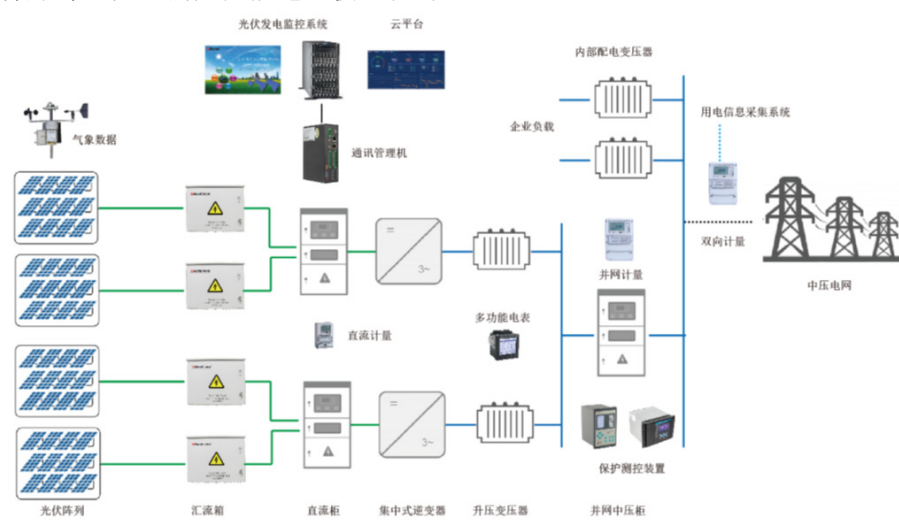


图1 集中式接入技术

(二) 分布式接入技术

分布式接入技术实现了光伏发电系统在用户侧的分散安装, 例如在建筑物的屋顶、工商业园区和居民住宅等地。这样, 发电的电能可以方便地接入低压配电网, 从而实现电力的自主使用和余电的上网^[2]。该接入方式充分挖掘建筑物闲置空间且不需要占用多余土

地资源, 灵活性高, 适应性强。以居民楼顶光伏为例, 家庭用户可将光伏发电设备安装到自己房顶上, 日间所发电用优先满足住户用电, 富余部分可向电网出售, 这样就能得到部分经济收益。对工商业园区而言, 分布式光伏发电系统既可以减少企业用电成本, 又可以提升企业绿色能源利用比重, 提升企业社会责任感与

品牌形象。采用分布式接入技术也能有效地降低电力远距离传输时的损失，并提高能源利用效率。另外，由若干分布式光伏系统构成的分布式电源网络可以提

高配电网供电的可靠性与灵活性，一定程度减轻配电网供电的压力，有利于电力系统稳定运行（图2分布式接入技术）。

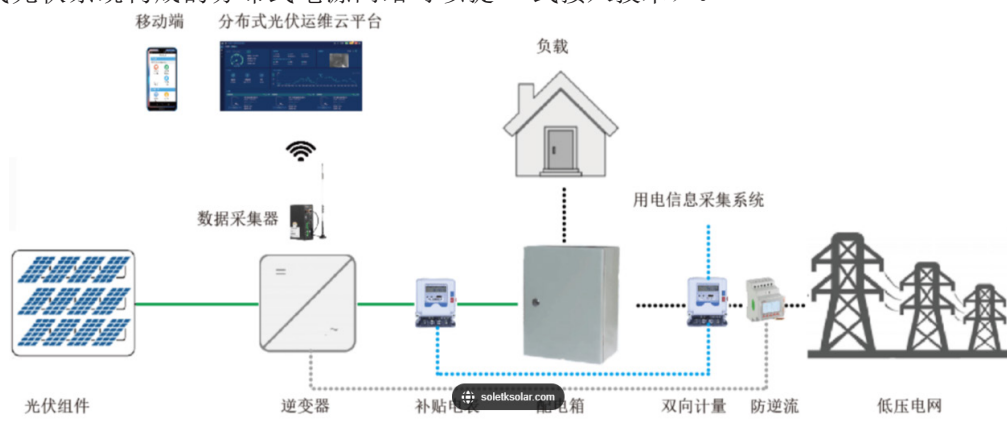


图2 分布式接入技术

（三）光伏建筑一体化（BIPV）技术

光伏建筑一体化（BIPV）技术实现了太阳能光伏组件与建筑材料的有机融合，不仅保留了建筑的传统功能，还具备了太阳能光伏发电的能力。它不单纯是把光伏组件固定在建筑物表面上，而把光伏组件看作是建筑物结构中的一个组成部分，例如光伏屋顶，光伏外墙和光伏遮阳板^[3]。就拿光伏屋顶来说吧，经过特殊设计制作而成的光伏瓦从外表上看类似于传统瓦片，但是它有发电的功能，不仅可以起到防水，保温的效果，还可以把太阳能变成电能。光伏外墙可以作为传统建筑外墙材料的有效替代，通过采用多样的颜色和图案设计，不仅能满足建筑审美的需求，还能实现光伏发电功能。BIPV技术具有充分利用建筑空间、不需要额外占地、建筑和能源完美结合等优点。另外由于光伏组件设置于建筑物的表面上，更接近用电负荷，降低电力的传输损耗。同时BIPV技术也可以增强建筑节能效果、减少建筑能耗、为超低能耗建筑的实现提供强有力的技术支撑。

（四）微电网接入技术

微电网接入技术就是把分布式电源，储能装置，负荷，监测与保护装置构成一个自治的小电力系统。在光伏发电接入方面，微电网可以将多个分布式光伏系统进行整合，并结合储能设备和其他分布式电源（例如风力发电，小型水电），形成一个相对独立运行的电力网络。微电网不仅能和大电网并网，并在电网正常情况下双向交互用电，向主电网输送过剩光伏电力，还能从主电网取电；还能在电网发生故障或者特殊情况时脱离大电网单独运行以保证关键负荷供电。以偏远农村地区或者海岛为例，构建含光伏发电微电网系统可以有效地解决本地用电难题，增强供电可靠性与稳定性。微电网接入技术通过智能控制与能量管理系统也能优化调度光伏发电，储能设备及负荷等，从而达到高效利用与合理分配能量的目的，降低对传统能源依赖程度，推动可再生能源消纳利用。

二、光伏发电接入对超低能耗建筑电气系统的影响

（一）对电气系统稳定性的影响

光伏发电间歇性强，波动性大，在光照强度和天气

的影响下输出功率将发生很大的改变。该功率波动在接入到超低能耗的建筑电气系统时，极易诱发电压波动和闪变等问题。比如当云层挡住太阳的时候光伏输出功率的突然降低会造成局部电压的瞬时降低；当光照变强，电压也会随之增加。经常发生电压波动与闪变会对电气设备正常工作造成影响，减少设备使用寿命甚至会造成设备故障以及电气系统工作稳定性下降等。与此同时，光伏发电功率波动也会对电网频率造成扰动，当大规模接入电网后，如果处理不好，就有可能打破整个电气系统频率平衡而影响到系统的平稳运行^[4]。

（二）对电能质量的影响

光伏逆变器及其他装置在运行时产生的谐波被注入超低能耗的建筑电气系统中后对电网电能质量造成了污染。谐波能引起电气设备附加发热、振动等现象，加大设备损耗、降低设备效率、严重时会造成设备损坏。另外光伏发电接入也会导致功率因数下降等问题。由于光伏电源在不同光照条件下输出有功功率与无功功率发生变化，如果不能对其实施有效的控制与补偿将导致系统功率因数脱离正常范围，加大了线路损耗、降低了电力传输效率、影响了电气系统电能质量及运行经济性。

（三）对电气系统设计与规划的影响

光伏发电进入超低能耗建筑电气系统后，使传统电力供应模式发生了变化，也给电气系统设计和规划带来新的需求。容量规划中，需充分考虑光伏发电过程中存在的不确定性因素，对光伏系统装机容量等备用电源进行合理分配，以避免供电不足或者容量浪费等问题。与此同时，还需要对系统的布置及接线方式重新规划，应把光伏发电系统和原电气系统有效地融合在一起，以保证电力可靠地传输与配置。另外，需要留足空间及接口供日后光伏发电系统拓展及升级使用，使电气系统设计及规划更为复杂多样。

（四）对电气系统运行管理的影响

传统超低能耗建筑电气系统的运行管理模式相对固定，在光伏发电并网之后，其运行管理又面临着新的挑战。由于光伏发电输出功率变化莫测，运行管理人员需实时对光伏系统运行状态及发电功率进行监控，并结合实际

情况对用电负荷及电力分配策略进行调整,从而达到能源高效利用的目的。

三、光伏发电接入技术的优化策略与措施

(一) 部署储能系统,平滑功率波动

作为光伏发电接入技术的核心支柱,储能系统在稳定功率波动上起到了至关重要的作用。从工作原理来看,其本质是构建一个“能量蓄水池”,当光伏阵列受充足光照产生超额电能时,储能设备迅速将电能转化为化学能(如锂电池)、机械能(如抽水蓄能)或其他形式储存起来;并且当光照减弱,发电不充分后,又把存储的能量逆向转化为电能输出。不同种类储能技术各有其优点,锂电池具有响应迅速,安装灵活等特点,非常适合分布式光伏场景;抽水蓄能技术因其强大的存储容量,特别适用于大型的集中式光伏电站。在电网层面上,储能系统能够有效地缓解光伏出力与负荷需求在时间和空间上的不匹配,避免功率急剧波动而导致电压崩溃、在参与调峰和调频等辅助业务时,频率失稳和其他风险提高了电力系统运行灵活性和韧性,促进了高比例可再生能源安全平稳接入。

某沿海工业园区分布式光伏发电工程,针对海洋性气候变化无常给光伏输出带来的冲击,工程各方布置了5MWh规模锂电池储能系统。这个园区拥有一个总装机容量为10MW的分散式光伏系统,它位于工厂的屋顶和未使用的空地上。由于经常受到不稳定的天气条件的影响,其日功率的波动往往超出30%。储能系统并网后通过所配置的智能能量管理系统对光伏输出,电网电价和园区负荷的变化情况进行实时监控。夏季台风过境造成光照骤减时,储能系统启动毫秒级响应速度的放电模式连续向园区半导体生产车间及其他关键负载提供电能,确保精密设备平稳工作;并且在光照较好的中午,储能系统会将电能优先存储起来,等待夜间用电高峰后再放出。

(二) 应用智能控制,实现精准调节

智能控制技术作为光伏发电精准调控的核心工具,通过对传感器技术,通信技术以及先进算法的深度结合,建立了高度自动化和智能化调控系统。传感器对光伏组件温度,光照强度,输出电压及电流等关键参数进行实时采集,并对电气系统负荷状态,电网电压频率及其他运行数据进行分析,通过通信网络将数据传送到中央控制系统。中央控制系统内部集成了多种优化算法,例如模型预测控制(MPC)和模糊控制等,这些算法能够依据预定的规则和实时数据,迅速地计算出逆变器的最优输出功率、负载分配方案以及储能设备的充放电策略。比如在发现光照强度变弱的情况下系统就会自动调节逆变器的参数以促进发电效率的提高;控制所述用电低谷时段内的过剩电力对所述储能设备进行充电。该动态,准确的调节方式既可以将太阳能资源发挥到最大化,又可以有效减少系统损耗,确保电气系统的平稳运行和能源高效优化分配。

某位于城市核心商圈的大型商业综合体,总建筑面积达30万平方米,其光伏建筑一体化(BIPV)项目装机容量为8MW,覆盖了建筑外立面和屋顶区域。为了使光伏发电效能得到充分的发挥,本工程介绍了一种基于物联网与人工智能相结合的智能控制系统。系统布放了上

百个高精度传感器对光伏组件的状态,室内外环境的参数及各层用电负荷等参数进行实时监控。在智能控制系统中内置深度学习算法可以通过历史数据进行学习与分析提前预测出不同时间段光照变化及用电需求情况。实际使用时,周末日间商场内人流量剧增,用电负荷增加的情况下,该系统快速调节光伏组件的工作方式以增加发电功率和优先保证商场内照明、空调和其他用电需求将多余电量存储到匹配2MWh锂电池储能系统中;当晚上商场关门时,该系统会自动转换到电网进行供电,同时在电价低谷时控制储能设备进行充电。经过一年的运行,该商业综合体的光伏电力利用率从初始的65%提升至85%,降低用电成本超300万元,在降低对城市电网依赖的前提下,切实提高能源使用效率,提高经济效益。

(三) 采用谐波抑制,净化电能质量

谐波问题来源于光伏发电系统电力电子器件所具有的非线性特点,特别是逆变器将直流电变换成交流电时产生了大量非正弦波电流并注入电网造成谐波污染问题。谐波抑制技术主要集中在“拦截”和“补偿”的双路径上:无源滤波器是由电容器,电感器以及电阻器等元件组成,经过具体的参数设计后组成谐振回路,对于特定频率谐波表现出低阻抗特性以分流谐波电流实现滤除,常被用于固定频率低次谐波抑制;有源滤波器利用高速采样芯片对电网电流进行实时监控,通过数字信号处理器对谐波成分进行分析,然后驱动功率器件输出与谐波电流幅度一致但相位相反的补偿电流,从而实现电流的动态抵消。另外优化逆变器拓扑结构是一个至关重要的方法,例如使用多电平逆变器和三电平拓扑可以减小开关器件电压和电流变化率并在源头上减小谐波的生成。通过这几种技术协同作用,可以显著减小电网谐波畸变率、确保电气设备的安全运行、促进电能质量稳定和纯净。

结语

总之,光伏发电进入超低能耗建筑电气系统既有实际意义,又面临着许多挑战。在接入技术的种类方面,集中式,分布式,光伏建筑一体化和微电网等接入技术各有优缺点,适合不同的场景。接入之后,给电气系统稳定性,电能质量,设计规划,运行管理等方面都带来明显的影响。然而通过配置储能系统,应用智能控制和采取谐波抑制的优化策略可以有效地解决上述难题。今后随着科技的进步,光伏发电与超低能耗建筑电气系统的连接会越来越成熟,可望促进能源行业可持续发展,同时达到建筑节能减排的目的。

参考文献

- [1] 李俊峰. 夏热冬暖地区超低能耗建筑设计研究[J]. 福建建筑, 2024, (11): 31-37+105.
 - [2] 李少勤. BIM技术在超低能耗建筑中的应用[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2024, 26(02): 40-43.
 - [3] 李宝印. 被动式超低能耗建筑电气设计探讨[J]. 工程建设与设计, 2021, (S1): 140-143.
 - [4] 康熙, 赵士永, 白佳慧, 等. 既有居住建筑被动式超低能耗绿色化改造实践研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(08): 18-23.
- 作者简介: 叶明达, 1991年1月, 男, 汉, 安徽省安庆市人, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑电气。