

某光储直柔微电网系统的设计研究

吴家坤

(深圳市鹏清建筑与规划设计有限公司)

【摘要】在现有典型的建筑设计中,引入了太阳能光伏发电、储能系统、直流配电和柔性控制,形成光储直柔微电网系统。它通过“直流母线”来连接分布式的光伏、储能与负荷,提升了负荷用电的灵活性,同时提高了太阳能的利用率。文章以某高级中学光储直柔微电网系统设计项目为例,对该光伏微电网系统的设计结构与应用进行详细说明。

【关键词】光储直柔;太阳能光伏发电;储能电池;直流配电;柔性控制

中图分类号:TM721.1;TM615

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.127

Research on the Design of a Photovoltaic-Energy storage-DC-Flexibility Microgrid System

WU Jia-kun

(Pang Tsing Architecture and Planning Design Ltd.SZ)

【Abstract】In the existing typical architectural design, solar photovoltaic power generation, energy storage system, DC power distribution, and flexible control have been introduced to form a photovoltaic-energy storage-DC-flexible microgrid system. It connects distributed photovoltaic, energy storage, and loads through a "DC bus", enhancing the flexibility of load power consumption and improving the utilization rate of solar energy. This article takes the design project of a photovoltaic-energy storage-DC-flexibility microgrid system for a high school as an example, providing a detailed explanation of the design structure and application of the photovoltaic microgrid system.

【Keywords】photovoltaic-energy storage-DC-flexibility; solar photovoltaic power generation; energy storage battery; DC Power distribution; flexible control

1 引言

当前,我国已是全球太阳能光伏发电增长最快的国家,光伏发电连续3年新增装机容量占世界领先地位。光伏发电应用主要体现于光伏电站和屋面光伏发电,通过太阳能光伏发电、储能、直流供电、柔性控制用电四大技术,形成一个微型的电网系统,能够有效解决太阳能光伏发电的供电不稳定性、不可靠性的缺陷,实现电力的高效分配与灵活调节。下文以某高级中学光储直柔微电网系统设计项目为例,对光伏微电系统的设计结构与应用进行详细说明。

2 项目概况

本项目总建筑面积约70000m²,位于深圳市宝安区,建筑地上最高十四层,主要功能为宿舍楼、教学楼、食堂餐厅、报告厅及体育场等。共设置一个直流配电间,一个储能电池室。

此项目的光伏微电网系统中主要包括以下系统:教学楼屋顶太阳能光伏系统及其接入系统、储能

系统、直流配电系统、直流照明系统和柔性运行策略等(见图1)。



图1 光储直柔微电网架构图

2.1 光伏系统

光伏系统主要组成部分有太阳能光伏组件、组串变流器、汇流箱、直流配电柜、并网柜、电缆及电气保护单元、传输线缆及通信接口、监测和显示单元、安装支架等。

太阳能光伏组件位于综合楼屋顶,地理位置所

处的年均气温为19℃~26℃,年日照小时数平均值为1427.9h。光伏发电系统的预测年发电量为40.2万kW·h,按下式计算:

$$E_p = H_A \times \frac{P_A}{E_a} \times K \tag{1}$$

式(1)中: E_p 为年发电量(kW·h/a); H_A 为水平面年太阳能总辐射量kWh/(m²·a); P_A 为光伏组件安装容量(kWp); E_a 为标准条件下的辐照度(kW·h/m²); K 为综合效率系数,包括光伏组件类型修正系数、转换效率修正系数、光伏组件的位置修正系数、光照利用率和光伏发电电气系统效率等^[1]。

光伏并网方式为直流母线侧并网,由光伏系统引至地上直流配电房的直流配电间内,并入直流微电网。光伏DC/DC变换器安装地上直流配电间内,变换器宜采用非隔离升压型直直变换器,变换器具备最大功率点跟踪和降功率限压功能,具备限功率稳压功能,参数见表1所示。

表1 光伏DC/DC变换器技术参数

模式	参数	光伏DC/DC变换器
输入参数	额定输入电压	620V
	最大输入电压	1100V
	满载MPPT电压范围	500V~800V
	MPPT电压范围	150V~1100V
输出侧参数	额定输出电压	750V
	输入电压允许范围	750V±10%
	最大负载功率	110KW
	功率方向	单向/双向
	稳压精度	≤0.01xU额定
	最大效率	98.0%
其他侧参数	外壳防护等级	IP21
	工作温度	-10℃~+40℃
	待机损耗	≤30W
	绝缘耐压	500V
	保护	过流、过压、过温停机、封脉冲、上报故障等

项目具备完善的运行状态监控系统,通过RS485的数据总线将所有需要监控的设备连接,将各种数据传输至计算机。数据采集包括发电量、发电功率、日照、温度等。

2.2 储能系统

采用电化学储能形式,电池组选择了固态铅蓄电池,包括储能电池模组、储能变换器、电池管理系统。储能电池的容量按下式计算。

$$C_0 = DFP_0 / (UK_a) \tag{2}$$

式(2)中: C_0 为储能电池容量(kW·h); D 为最长无日照期间用电时数; F 为储能电池放电效率的修正系数(通常为1.05); P_0 为平均负荷容量(kW); U 为储能电池的放电深度(0.5~0.8); K_a 为包括逆变器等交流回路的损耗率(通常为0.7~0.8)^[2]。综合计算,项目设计存储容量为240kW·h,共安装了30kW储能双向DC/DC变换器4台。

建筑储能系统在储能电池荷电状态过低和完全放电等状况下,通过储能变换器对储能电池进行充电。电池管理系统实时监测并向上层监控系统反馈电池电压、充放电电流、荷电状态、能量状态、最大允许充放电功率等信息,具有电气保护、安全监测和消防报警功能。储能电池应满足建筑整体用电柔性调节,储能电池的使用年限应大于10a,充放电循环效率大于90%。

2.3 直流配电系统

供电电源包括了市政电源、光伏电源、集中储能蓄电池,直流母线可通过AC/DC双向变换器连接交流侧AC380V,或通过DC/DC变换器连接屋顶光伏汇流箱,还可以通过DC/DC变换器连接储能电源。三种电源的智能协调工作模式,优先采光伏发电用电,当光伏输出功率不足时,由储能电池和市政电源共同对母线负荷进行供电,光伏发电系统有剩余时对储能电源进行充电。本系统母线结构为单极性母线结构,电压等级为750V和375V。主要输出负荷对象包括了LED照明、空调室内机、750V直流充电桩和直流变频空调。

2.4 直流照明系统

直流照明是本项目的重点用电对象,不同于其他微型电网采用的直流48V供电,本项目选择直流375V灯具,在满足压降范围内,具有更远的供电距离。原因在相同功率下,电压越高,电流越小。375V直流系统的电流远低于低压直流(如48V)或交流220V系统,线路损耗显著降低。在远距离供电场景中,线路损耗可减少30%以上,大幅提升整体系统能效。

楼梯间采用吸顶灯、走道采用吸顶灯或嵌入式筒灯。其他一般场所采用高效LED直管灯(盘)或其他紧凑型LED节能型灯具。LED灯具采用高效节能型灯具,色温4000K~5000K,显色指数Ra应不低于80。

2.5 直流断路器选型、线缆选择及线路敷设

直流断路器选型依据： $U_e \geq U$, $I_e \geq KI$ 。 U_e ：断路器额定电压， U ：线路最大电压， I ：线路最大电流， K ：可靠系数1.1~1.3。

直流电气系统线缆选择了多芯护套型。本建筑中同时存在交流和直流配电系统，采用不同符号和颜色予以明确标示。

直流输电的优势是不存在感抗、容抗和集肤效应，同等截面积电缆，直流载流量通常不小于交流载流量，直流输电的电缆截面按以下公式计算：

$$I_{PC} \geq I_c \quad (3)$$

$$S_c = \rho \frac{2LI_c}{\Delta U_p} \quad (4)$$

式(3)~式(4)中： I_{pc} 为电缆允许载流量，A； I_c 为回路允许电压降长期工作计算电流，A； S_c 为电缆计算界面， mm^2 ； ρ 为电阻系数，铜导体 $\rho=0.0184 \cdot \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ； L 为电缆长度，m； ΔU_p 为回路允许电压降，V。

2.6 柔性控制策略

本项目采用基于直流母线电压的自适应控制策略，利用直流母线电压允许大范围波动特性，建立起直流母线电压与建筑设备功率之间的联动关系^[3]。通过采取整体调节、设备控制、用户可感知信号等策略以及对接虚拟电厂管理平台的方式，发掘建筑自身负荷调节能力，增高光伏消纳和自用率，减少光伏弃电量，提高光伏系统经济效益。

本方案的柔性用电控制策略基于直流母线电压实现。当AC/DC或DC/DC在控制直流母线电压升高或者降低时，各末端设备就会自动切换运行模式、调节功率大小，进而实现对建筑取电功率的控制。

3 效益对比分析

光储直柔系统通过减少能量转换损耗、优化负荷调度，显著降低运营阶段的能耗与维护成本，是其经济效益的核心优势。

传统交流系统中，光伏发电需经逆变器（损耗3%~5%）转为交流，终端设备（如LED灯、空调）再整流为直流（损耗5%~10%），总转换损耗达8%~15%；而光储直柔微电网系统通过直流配电直接供电，转换损耗降至2%~3%，年节电率可达10%~15%。

直流设备（如直流断路器、母线）无交流系统的电磁干扰、相位失衡问题，故障率降低30%~50%。

同时，光伏与储能系统通过智能化监控实现预测性维护，减少人工巡检成本，年维护费用比传统系统低20%~30%。

以全生命周期（通常按25a计算）为维度，光储直柔系统的总成本（初始投资+运营成本）低于传统系统，投资回收期约在5a~7a。

同时，从能源生产到消费的全链条减少环境负荷，既是建筑领域实现“双碳”目标的核心技术路径，也是推动城市可持续发展、改善人居环境的重要抓手。随着技术成本下降和规模化应用，也凸显了光储直柔系统的环保效益。

4 结语

光储直柔微电网作为建筑能源系统的革命性创新，不仅重构了建筑与能源的关系，更成为连接“双碳”目标与可持续发展的关键纽带。它以建筑为能源生产与消费的核心载体，通过光伏的清洁发电、储能的时空调配、直流的高效传输、柔性的智能控制，实现了能源从“被动消耗”到“主动生产”的范式转变。

未来，随着光储直柔微电网与智慧城市、物联网的深度融合，它不仅是能源供应的“末梢神经”，更将成为连接用户需求、电网调度与碳交易的智能枢纽。从单一社区的独立运行，到多微网的协同互动，再到与主网的友好互补，这种“小而美”的能源系统将不断拓展边界，最终编织成一张覆盖城市肌理的绿色能源网络，让每一度电都带着阳光的温度，每一次调度都向着可持续的未来。

参考文献

- [1] 迭勇，陈旭，方蓁，张海涛，李丹. 分布式光伏发电系统设计流程及效益分析[J]. 现代建筑电气，2024，15（4）：63-68+90.
- [2] 安建民. 可视化无人巡查系统在灌区渠道巡查中的应用[J]. 陕西水利，2023（5）：179-181+184.
- [3] 刘晓华，张涛，刘效辰，江亿. “光储直柔”建筑新型能源系统发展现状与研究展望[J]. 暖通空调，2022，52（8）：1-9+82.