

基于 PVsyst 的分布式校园屋顶光伏电站设计及应用 ——以包头轻工职业技术学院为例

王继明

包头轻工职业技术学院, 内蒙古 包头 014035

DOI: 10.61369/VDE.2025280030

摘要 : 文章以包头轻工职业技术学院 1.8MWp 分布式屋顶光伏电站为例, 介绍了项目的技术方案设计, 分析了项目的特点和效益, 为创建绿色校园及推进可再生能源在学校建设领域的应用提供了有益借鉴。

关键词 : 分布式; 光伏电站; 可再生能源; 绿色校园

Design and Application of Distributed Campus Rooftop Photovoltaic Power Station Based on PVsyst—A Case Study of Baotou Light Industry Vocational and Technical College

Wang Jiming

Baotou Light Industry Vocational and Technical College, Baotou, Inner Mongolia 014035

Abstract : Taking the 1.8MWp distributed rooftop photovoltaic power station of Baotou Light Industry Vocational and Technical College as an example, this paper introduces the technical scheme design of the project, analyzes the characteristics and benefits of the project, and provides a useful reference for the construction of green campuses and the promotion of renewable energy in the field of school construction.

Keywords : distributed; photovoltaic power station; renewable energy; green campus

引言

在全球能源转型和绿色低碳发展的大背景下, 建筑光伏一体化作为新能源与建筑行业深度融合的产物, 已逐渐成为推动建筑行业绿色转型的重要力量^[1]。“光伏+学校”模式成为众多学校的绿色低碳转型方向, 通过开展学校建筑屋顶光伏行动, 推动光伏与建筑一体化发展, 将加快推动学校建筑用能电气化和低碳化, 深入推进可再生能源在学校建设领域的规模化应用^[2]。本项目通过光伏建筑一体化设计, 将光伏电站与校园建筑完美结合, 不占用额外的地面空间, 不仅为建筑带来了独特的外观和功能, 实现了能源的自给自足与环境的保护。

一、项目概况

包头轻工职业技术学院(以下简称学院)校园分布式屋顶光伏电站利用校园19栋建筑物23852平方米屋面面积, 规划容量1.7996MWp, 一次建成, 采用0.4kV低压系统接入政府低压配电系统, 选择550Wp光伏组件3272块, 33kW、50kW、80kW和110kW组串式逆变器24台, 同时选择15台0.4kV的低压并网箱, 接入校内低压配电系统。所利用屋顶均为混凝土结构, 上人屋面, 结构承载力可满足项目的建设要求, 该项目经过三个月建设于2024年投产。项目建成后, 年均发电量241.1万kWh, 等效年均满负荷运行小时数1290.1h。

二、技术方案

项目采用“光伏+建筑”的建设方式: 光伏组件与校区内混

凝土屋面采用BAPV的方式建设, 将光伏组件安装于既有建筑物屋顶, 将光伏电站和既有建构物相结合, 在不影响建构物本身功能和美观的情况下, 提高土地的利用率。同时, 光伏电站的发电量可供既有建筑物内的用电负荷使用, 实现建筑物用电的自给自足。

(一) 资源条件

项目建设地点位于内蒙古自治区包头市, 属内陆半干旱中温带大陆性季风气候, 主要的气候特征为: 春季干旱风沙大、夏季炎热降雨集中、秋季空气清爽日照长、冬季寒冷雨雪少; 无霜期短, 降水量少而集中, 昼夜温差大, 光照充足, 雨热同季, 太阳能资源比较丰富, 日照百分率为64%~73%, 多年平均日照小时数2800h以上^[3]。本项目场址中心位置约为: 北纬40°22′7.50″、东经109°58′43.48″。观测场海拔高度为1049m, 气压表海拔高度1049m, 年水平面总辐射年辐照量为5812.92MJ/m², 即1642kWh/m²。地势平缓, 地形开阔, 交通便

利，建设条件良好。

利用 Meteororm 软件对包头附近气象数据的分析运算，现阶段选用包头气象数据作为基本气象要素和辐射观测代表气象站，参考收集到的气象站资料进行分析，包括 2008 年~ 2020 年的历年各月日照小时数、历年平均气温、历年各月的太阳辐射数据。

表 2-1 包头气象站近 13 年累年主要气象要素统计表

项目	数值	发生日期	项目	数值	发生日期
平均气温 (°C)	4.7	—	年平均沙尘暴日数 (d)	3.9	—
多年平均气压 (hPa)	862.5	—	年平均降水量 (mm)	258.5	—
年平均无霜期 (天)	145	—	平均雷暴日数 (d)	26.7	—
平均相对湿度 (%)	50	—	年扬沙日数 (d)	8.4	—
平均日照时数 (h)	2853.7	—	年平均冰雹天数 (d)	1.9	—

结合包头气象站的太阳辐射年际变化趋势和相关气象典型数据的分析和选择方法，由于近 13 年辐射量年际变化的趋势与日照时数年际变化及年变化的趋势基本相同，本项目代表年的选择以 2008 年~ 2020 年间辐射数据为基础的数据中来挑选。采用统计学原理并结合项目特点，项目代表年数据应为一组历年发生概率高、并对未来具有很好预测性的数据。

表 2-2 项目代表年各标准月太阳辐射值

标准月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
辐射值 (MJ/m ²)	289.8	360.7	505.1	607.7	701.6	648.7
标准月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
辐射值 (MJ/m ²)	644.4	602.3	486.7	423.4	291.6	250.9
年总辐射值 (MJ/m ²)	5812.9					

项目代表年水平面总辐射年辐照量为 5812.92MJ/m²，即 1642kWh/m²，站址地太阳能资源总量“很丰富”，代表年月平均总辐射日辐照量最低值为 8.09MJ/m²，最高值为 22.63MJ/m²，两者的比值为 0.357，稳定度等级属于 C “一般”。

(二) 电网接入条件

校内有 10kV 配电房，电压等级包含 10kV 和 0.4kV。校园内目前的用电负荷主要集中在室内外的照明、动力设备、空调通风、教学设备以及办公用电。

2020 年学院全年用电量约为 458 万 kWh。考虑光伏发电为白天时段，此时段学校用电量约占全天用电量的 45%，即 225 万 kWh，项目建成后光伏电站发电量可被校区部分消纳，消纳比例约为 89%。

项目按照“自发自用，余电上网”模式开展建设，光伏电站 0.4kV 并网点就近并入附近的配电间低压侧。分 15 个并网点，每

个并网点配置相应数量的 33kW、50kW、80kW 和 110kW 组串式逆变器和 1 台低压并网箱，共计 24 台逆变器和 15 台低压并网箱。

(三) 设备选型

光伏组件是分布式光伏电站的核心部件，其性能参数的优劣直接影响着整个项目的发电性能。由于本项目装机容量较小，所以设计优先选用大功率光伏组件，以充分利用屋顶面积，降低组件安装量，从而缩短施工工期、减少故障几率，同时接触电阻小，线缆用量少，系统整体损耗相应降低^[4]。项目选用某品牌由 182mm 硅片封装的峰值功率为 550Wp 的单晶硅单面光伏组件，且具有抗 PID 特性。产品具有高功率、高效率、高可靠性等优势。无焊带设计赋予其最佳的长期可靠性；全并联电路设计，提供了更低的组件工作温度和更优异的抗热斑性能及阴影条件下的发电性能。产品的高光电转换率带来了更高效的土地资源利用率，更有效地降低 LCOE。

项目所在地多年极端最低气温 -37.4°C，根据所采用的单晶 550Wp（系统电压 1500V）组件参数，计算出最低温度对应的组件串（18 个组件串联）开路电压为 1288.6V/996V，在最大允许输入直流电压范围内。优选单晶硅 550Wp 光伏组件，开路电压为 49.62V，峰值功率电压 40.9V，温度系数为 -0.35%/°C。由于站址地区年平均气温是 4.7°C，多年极端高温为 38°C，多年极端低温是 -31.4°C，逆变器其工作温度可以控制在允许范围内。组件的工作温度在 -40°C ~ 85°C 之间，虽然组件的板面温度高于周围环境温度，通过组件周围的空气自然流动可实现组件的对流散热，场址的环境温度对组件的安全运行不产生影响。

表 2-3 光伏组件技术参数表

技术参数	单位	指标
组件功率	Wp	550
组件效率	%	20.9
开路电压 (Voc)	V	49.2
短路电流 (Isc) A		13.9
峰值功率电压 (Vmppt)	V	41.3
峰值功率电流 (Imppt)	A	13.08
峰值功率温度系数	%/K	-0.34
开路电压温度系数	%/K	-0.26
短路电流温度系数	%/K	0.05
功率误差范围	%	0 ~ +5
正面最大承压	pa	5400
接线盒类型		IP68
组件串并联光伏专用电缆 线长度	mm	+350/-250
配套接插件型号规格		MC4/IP68
框架结构		阳极氧化铝合金
尺寸	mm	2278 × 1134 × 30
重量	kg	27.6

该项目为屋顶分布式光伏项目，通过经济性分析，选用组串

式逆变器，逆变器基本性能要求不应低于表2-4所列数值。

表2-4 逆变器主要参数

技术参数	单位	组串式	组串式	组串式	组串式
额定功率	kW	110	80	50	33
最大输入电压	V	1100	1100	1100	1100
MPPT电压范围	V	180~1000	200~1000	200~1000	160~1000
MPPT数量	路	9	4	5	3
每路最大电流	A	270 (9×30A)	176 (4×44A)	200 (5×40A)	90 (3×30A)
额定输出功率	kW	110	80	50	33
最大交流输出功率	kVA	121	88	55	36.3
额定电网频率	Hz	50/60	50	50	50/45-55
功率因数范围		0.8超前-0.8 滞后	0.8超前-0.8 滞后	0.8超前-0.8 滞后	0.8超前-0.8 滞后
最大效率	%	98.6	98.8	98.7	98.6
中国效率	%	98	98.5	98.3	98.08
尺寸(宽×高×深)	mm	953× 804×350	586× 788×267	782× 645×310	605× 575×245
重量	kg	80	70	62	38
工作温度范围	°C	-30~60	-30~60	-30~60	-30~60
散热方式		智能强制风冷	智能风冷	智能强制风冷	智能强制风冷
防护等级		IP66	IP65	IP66	IP66
最高海拔	m	4000	4000m	4000m	4000m

根据逆变器参数以及光伏组件工作环境等因素进行修正后，选取单晶硅光伏组件的最佳串联数为18串。按最佳光伏电池组件串联数计算，则每一组串单晶硅电池组件串联的额定功率容量=550W_p×18=9.9kW_p。根据110kW逆变器的额定功率计算，需要并联的路数N=110×1.26/9.9=14路。

在分布式光伏电站的设计中，光伏组件方阵的安装方式直接影响系统对太阳总辐射量的接收，从而影响项目的发电能力。光伏方阵的安装方式有简单的固定式、倾角调节式和自动跟踪式三种类型。光伏组件阵列推荐采用固定式安装方式，占地面积最小、直接投资最低、运行维护工作量最小。

(四) 组件安装设计

项目建设规模1.8689MW_p，采用单晶硅550W_p组件3398块，每串18块光伏组件。选用110kW逆变器15台，光伏支架与坡面平铺安装。

本项目光伏组串由18块光伏组件组成，混凝土屋顶采用15度倾角固定支架安装，前后排光伏组件中心间距为4100mm，组件

东西向留有500mm的检修通道；彩钢瓦屋顶采用双块布置，相邻两块组件之间的间距为20mm，每串组件之间留有500mm的检修通道。依据设计规范，光伏方阵各排、列的布置间距，无论是固定式还是跟踪式均应保证全年9:00~15:00(当地真太阳时)时段内前、后、左、右互不遮挡，也即冬至日当天时段内前、后、左、右互不遮挡^[4]。利用PVsyst7.2.10光伏电站专业设计软件模拟最佳倾角，并验证组件不被遮挡的太阳轨迹图。

可由以下公式计算：

$$D = L \cos \beta + L \sin \beta \frac{0.707 \tan \phi + 0.4338}{0.707 - 0.4338 \tan \phi}$$

式中：L—阵列倾斜面长度，m

D—两排阵列之间距离，m

β—阵列倾角，deg

φ—站址纬度(在北半球为正、在南半球为负) deg

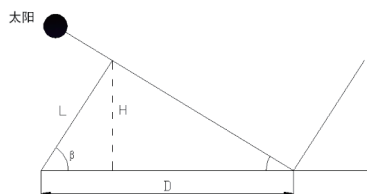


图2.1 光伏方阵间距示意图

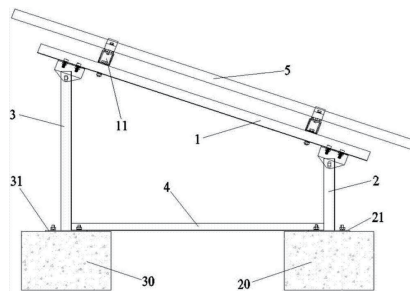


图2.2 光伏方阵安装方式示意图

光伏支架阵列行间距计算：根据该电站所处位置，经过对单晶硅光伏方阵按不同倾角计算，混凝土屋顶光伏组件采用15度倾角固定安装，方阵前后排行间距经计算为4.1m，可保证其满足规范不遮挡的条件，屋顶光伏方阵前后排行间距按每两个支架单元间留有0.5m的列间距，既可以使单元支架两两之间阴影不受遮挡，又可以做检修维护安全步道使用。

三、项目消纳及收益

(一) 电力接入方案

项目采用“自发自用、余电上网”运营模式，结合项目的性质、位置、容量等情况，制定光伏电站0.4kV并网就近并入附近的配电房变压器低压侧接入系统方案。

项目采用550W_p单晶硅光伏组件共3398块，总安装容量1.8689MW_p。共设4个0.4kV并网，每18块光伏组件串联为一串，每个并网配置3-4台110kW组串式逆变器和1台低压并网柜，共计15台逆变器和4台低压并网柜。

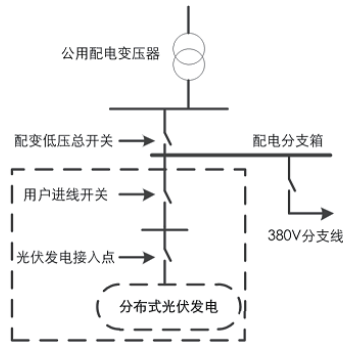


图3.1 分布式校园屋顶光伏电站接入公共电网结构图

(二) 平均上网发电量

由于太阳能光伏发电技术已经成熟、可靠、实用，目前行业内公认的光伏组件寿命为25年~30年，校园电站发电量按运营期25年计算，按照组件参数，第1年衰减率2.0%，之后每年衰减率不超过0.55%，根据PVsyst软件计算模拟^[9]，得到的逐年发电量如表3-1所示。

表3-1 光伏电站逐年（25年）发电量（万kW·h）

第1年	第2年	第3年	第4年	第5年
273.26	271.73	270.20	268.66	267.13

表3-2 学校2020年用电量统计表

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
用电量(kWh)	540850	202450	217150	229750	143500	450800	461600	252300	426350	560200

由表3-2可知，学校2020年2、3、4、8月份用电量低于其他月份，经分析，学校在3月前未正式开学，8月份为学校暑假期间，其用电量相对其他月份较低，通过统计可知学院全年用电量约为458万kWh，如不受假期等因素影响，其用电量约为500万kWh。考虑光伏发电为白天时段，此时段学校用电量约占全天用电量的45%，即225万kWh。校园光伏电站建成投运，年平均发电量约为254.86万kWh，根据目前学校的用电负荷，本项目消纳比例约为89%。在满足学院自发自用的基础上，剩余电力还可以并网上传。

(四) 项目收益

本项目直流侧实际安装容量约为1.8MWp，25年内年平均上网电量约为241.1万kWh，与相同上网电量的火电厂相比，每年节约标煤726.94吨，减少烟尘排放量约15.99千克，减少二氧化碳排放1996.38吨，减少排放二氧化硫约243.52千克、氮氧化物约366.48千克。

参考文献

- [1] 国家能源局关于报送整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点方案的通知，2021.
- [2] 教育部《关于印发绿色低碳发展国民教育体系建设实施方案的通知》，教发〔2022〕第2号；2022.
- [3] 首页 - 印象包头 - 包头概况 - 自然地理，包头市人民政府网站，市政府地方志研究室，2025.
- [4] 刘全兵. 坪北油田分布式光伏发电的应用研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023.
- [5] GB 50797-2012, 光伏电站设计规范[S].
- [6] 吕丹, 买发军, 姚一波. 基于PVsyst的斜单轴光伏跟踪系统倾角及发电量计算[J]. 太阳能, 2017(8):4.DOI:CNKI:SUN:TYNZ.0.2017-08-004.
- [7] 桂存兵, 刘洋, 何业军. 基于LCC谐振电路阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, (1).DOI:10.3969/j.issn.1007-2683.2013.01.018.
- [8] 曹石亚, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 光伏发电技术经济分析及发展预测[J]. 中国电力, 2012, (8).DOI:10.3969/j.issn.1004-9649.2012.08.017.
- [9] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, (20).DOI:10.3321/j.issn:1000-1026.2006.20.022.
- [10] 赵争鸣, 等. 编著. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 科学出版社, 2005.

第6年	第7年	第8年	第9年	第10年
265.59	264.06	262.53	260.99	256.5
第11年	第12年	第13年	第14年	第15年
257.93	256.39	254.86	253.33	251.79
第16年	第17年	第18年	第19年	第20年
250.26	248.73	247.19	245.66	244.12
第21年	第22年	第23年	第24年	第25年
242.59	241.06	239.52	237.99	236.46

由上表可知，首、末年等效满负荷运行小时数分别为1462.16h、1265.22h。年等效满负荷运行小时数为1363.69h。

年发电量 = 装机容量 × 年等效满负荷运行小时数 = 254.86万kW·h。

(三) 项目消纳

学校的用能主要是电能，校区内目前的用电负荷主要集中在室内外的照明、动力设备、空调通风以及其他教室和办公用电。根据对学校用电量的统计，收集到学校2020年1~10月份的用电统计表，见表3-2所示：

整个25年经济运行寿命期间将节约标煤18173.55吨，减少烟尘排放量约399.82千克，减少排放温室效应性气体二氧化碳49909.45吨，减少排放大气污染气体二氧化硫约6087.99千克、氮氧化物约9162.12千克。项目的建设，将为包头市节约能源，减少有害气体排放工作做出积极的贡献。

四、结语

包头轻工职业技术学院1.8MWp分布式屋顶光伏项目，响应国家“碳达峰、碳中和”的目标，利用现有屋面建设分布式光伏电站，既满足学校的用电需求，减少用电成本，又可以把学校作为新能源的科普基地，为师生提供光伏电站的学习实践场所。该项目作为内蒙古地区高校绿色低碳转型的典型实例，对于促进节能减排、打造低碳城市产生积极的推动作用，实现社会、环境和经济三方效益，也为建设资源节约型绿色校园提供了借鉴价值。