



泰国罗勇府屋顶光伏电站的效益分析

刘其永^{*}, 肖 辉

(中国水电基础局有限公司, 天津 301700)

摘 要: 介绍了泰国罗勇府 3 MW 屋顶光伏电站的系统构成, 从理论上计算了该电站在泰国罗勇府气候条件下的发电能力, 并进行了效益分析, 展望了屋顶光伏电站在泰国罗勇府地区的应用前景。

关键词: 太阳能; 建设技术; 屋顶光伏电站; 效益分析

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A

0 引言

泰国全年日照充足, 太阳能资源十分丰富, 最丰富区的年均太阳辐射量为 1790.1 kWh/m²。得益于泰国政府对可再生能源, 尤其是太阳能的大力支持, 泰国的可再生能源投资逐渐兴起, 其也成为东南亚地区作太阳能投资的关键地区。根据泰国能源监管委员会的报告, 截至 2018 年 9 月, 泰国的离网独立发电项目 (IPS) 大多数是以屋顶光伏电站的形式出现。对于并网光伏项目, 2019 年 4 月, 泰国通过了《泰国电力发展规划 2018~2037(PDP2018)》, 修订了其未来 20 年的光伏发展目标, 其中包括 10 GW 的屋顶光伏项目^[1-2]。竞争开始转向了屋顶光伏电站的开发。

近年来, 我国国内光伏产品出现巨大的产能过剩, 从而将市场目标转向了东南亚地区, 在该地区泰国相对于其他国家由于政治稳定、经济繁荣、政策支持, 成为我国光伏产品制造商的首选国家; 而作为我国政府首批认证的“境外经济贸易合作区”之一的泰中罗勇工业园就位于泰国东岸的罗勇府。罗勇府滨临泰国湾, 属于热带气候, 年均气温约为 28 ℃, 日照条件充足, 为太阳能资源丰富区; 该地区入住企业的厂房多为钢结构, 屋顶面积大, 而且建筑物之间的间距较大, 不存

在遮挡阳光等问题, 因此适合屋顶光伏电站的建设。本文以泰国罗勇府某工厂 3 MW 屋顶光伏电站为例, 对屋顶光伏电站的系统构成及电站效益进行了研究。

1 电站概况

该屋顶光伏电站的装机容量为 3 MW, 光伏组件分别安装在工厂内 3 个车间的屋顶。其中, A 车间屋顶安装有 3002 块 305 W_p 的组件, 装机容量为 915.61 kW_p; B 车间屋顶安装有 3212 块 310 W_p 的组件, 装机容量为 995.72 kW_p; C 车间屋顶安装有 3002 块 310 W_p 的组件, 装机容量为 930.62 kW_p。3 个车间屋顶的光伏组件实际装机容量为 2.84 MW_p。

该电站采用组件分块发电、集中并网的方案, 每 19 块组件串联为 1 个方阵, 每 6 个方阵配置 1 台型号为 SUN2000-28KTL 的逆变器, 并网构成 1 个发电单元; 再经汇流箱汇流后接入变压器升压侧; 最终将 3 MW 并网发电系统并入厂区电网, 为日常生产用电供电。图 1 为该屋顶光伏电站的系统框图, 表 1 为该电站的主要设备清单。该屋顶光伏电站已于 2016 年 12 月建设完成, 并于 2017 年 1 月正式投运。

收稿日期: 2019-05-07

通信作者: 刘其永 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事屋顶光伏电站建设、建筑工程等领域的研究。qiyongliu0117@gmail.com

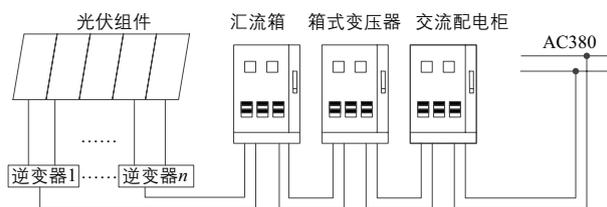


图 1 3 MW 屋顶光伏电站的系统框图

Fig. 1 System block diagram of 3 MW rooftop PV power station

表 1 3 MW 屋顶光伏电站主要设备清单

Table 1 The list of 3 MW rooftop PV power station major equipment

设备名称	规格型号	数量
光伏组件 1	305 W _p	3002 块
光伏组件 2	310 W _p	6214 块
逆变器	SUN2000-28KTL	100 台
汇流箱	NXK1	19 台
箱式变压器	ZGSB11-Z-1250/20	3 台

2 设备选型

2.1 光伏组件

该屋顶光伏电站中，峰值功率不同的 2 种光伏组件均采用中利腾晖光伏科技生产的型号为 TP672P 的组件，组件参数如表 2 所示。3 个车间屋顶上光伏组件的面积分别为 5825、6233、5825 m²，光伏组件总面积为 17883 m²。

表 2 2 种光伏组件的参数

Table 2 The parameter values for two kinds of PV modules

参数	光伏组件 1	光伏组件 2
峰值功率 P _{max} /W _p	305	310
开路电压 V _{oc} /V	45.1	45.2
短路电流 I _{sc} /A	8.97	9.07
最大功率点电压 V _{mpp} /V	36.2	36.3
最大功率点电流 I _{mpp} /A	8.43	8.55
最大系统电压 V _s /V	1000	1000
转换效率 /%	15.7	16.0

组件最大串联数 S_n 要小于等于组件最大系统电压 V_s 与组件开路电压 V_{oc} 的比值，即 $S_n \leq \frac{V_s}{V_{oc}}$ 。根据表 2 中的数据可知，S_n 的理论值约为 22 块^[3]。本屋顶光伏电站中的光伏方阵采用的是 19 块组

件进行串联，未超过 S_n 值。A 车间屋顶 1 个光伏方阵的 V_{oc} 为 856.9 V，B 和 C 车间屋顶 1 个光伏方阵的 V_{oc} 均为 858.8 V。

2.2 逆变器

逆变器采用华为技术有限公司生产的型号为 SUN2000-28KTL 的组串式并网逆变器，具体参数如表 3 所示。

表 3 逆变器的参数

Table 3 The parameter values for inverter

参数	数值
最高效率 /%	98.7
最大输入功率 /W	28200
最大输入电压 /V	1000
最大输入电流 /A	54
MPP 电压范围 /V	480 ~ 800
额定输入电压 /V	620
最大输入路数	6
MPPT 数量	3
额定功率 /W	27500
输出电压频率 /Hz	50/60
最大输出电流 /A	33.5
显示方式	图形化 LCD

该逆变器采用三电平拓扑，最高效率为 98.7%，用认可度最高的现场性能测试 Photon 测试对该逆变器进行测试，结果为“双 A+”；单机具备最多 3 路 MPPT，对发电量提升显著。该逆变器能够进行三相交流并网，具有智能、高效、安全、可靠的优点。逆变器整机自然散热，无需单独配置风扇，能够符合长期室外应用的需求，被广泛应用于屋顶、山地等室外光伏发电系统中；能够对 6 路组串线路进行智能监控，自动检测设备中的组串故障，故障检测用时减少 80%；多机并联智能电网自适应，电能质量优，可更好地满足电网接入要求；能够对电网进行远程监控和管理；交流输出电压为 480 V，降低了 30% 的交流线损耗；无零线，可节约 20% 的交流线缆；可安全躲避 PID 效应，主动防止触电并隔离；无熔丝设计，避免直流侧故障引起的火灾隐患，内置

交直流防雷模块，防雷等级高。

2.3 汇流箱

汇流箱采用正泰电气股份有限公司生产的型号为 NXK1 的低压封闭式汇流箱，汇流箱参数如表 4 所示。

表 4 汇流箱的参数

Table 4 The parameter values for combining manifolds

参数	数值
额定工作电压 / V	480
额定电流 / A	250
额定频率 / Hz	50
额定短时耐受电流 / kA	20

该汇流箱的工作模式为“6 输入 1 输出”，即输入相同的 6 路交流信号后汇流成 1 路交流输出；防护等级为 IP65，防水、防尘、防锈、防晒，符合室外安装要求；对电路系统作控制、漏电保护，以及电动机的过载、短路、缺相保护及各种控制；设计外形美观，使用安全可靠。

3 项目效益分析

3.1 经济效益

该屋顶光伏电站的理论年发电量 E_L 可由式 (1) 求得：

$$E_L = \sum_k S_k \eta_k R \quad (k=A, B, C) \quad (1)$$

式中， S_k 为屋顶安装的光伏组件面积， m^2 ； η_k 为组件转换效率，%； R 为泰国的年太阳辐射总量， MJ/m^2 。

泰国的日均太阳辐射量为 $18.2 MJ/(m^2 \cdot d)^{[3-4]}$ ，因此，泰国的年太阳辐射总量 $R=18.2 \times 365=6643 MJ/m^2$ 。

将相关数据代入式 (1) 可得，该电站的 $E_L=5247610.17 kWh$ 。

实际运行中组件发电量达不到理论值，存在转换效率损失。电站的系统总效率 η 由光伏阵列发电效率 η_1 、逆变器转换效率 η_2 、并网效率 η_3 这 3 个因素共同决定^[2]，即：

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (2)$$

光伏阵列在能量转换时存在组件的匹配损

失、未利用的太阳辐射量损失、温度影响、直流线路损失、尘埃遮挡损失等（未考虑组件功率衰减效率），因此， η_1 取 85%； η_2 取 98.7%； η_3 取 95%^[5-6]。

则该电站第 1 年的实际发电量 E_1 为：

$$E_1 = E_L \eta \quad (3)$$

结合式 (1)~式 (3) 可知， $E_1=418.2$ 万 kWh。

屋顶光伏电站的寿命一般为 20~25 年，本电站取 21 年，考虑到每年组件的功率衰减率^[7]，则整个电站 21 年内的实际总发电量 E 为：

$$E = \sum_{i=1}^{21} E_i = \sum_{N=1}^{21} E_1 \eta_N \quad (4)$$

式中， E_i 为第 i 年的实际发电量，万 kWh；

η_N 为第 N 年的组件功率衰减率，%。

根据式 (4)，可得到整个屋顶光伏电站 21 年内的实际发电量，如表 5 所示。

表 5 屋顶光伏电站 21 年内的实际发电量

Table 5 Real power generation within 21 years of rooftop PV power station

时间 / 年	$\eta_N / \%$	年发电量 / 万 kWh	时间 / 年	$\eta_N / \%$	年发电量 / 万 kWh
1	100	418.2	12	90.5	378.5
2	97.6	408.2	13	89.9	376.0
3	96.8	404.8	14	89.2	373.0
4	96.0	401.5	15	88.3	369.3
5	95.5	399.4	16	87.7	366.8
6	94.7	396.0	17	87.2	364.7
7	94.2	393.9	18	86.4	361.3
8	93.5	391.0	19	85.7	358.4
9	92.6	387.3	20	84.9	355.1
10	92.0	384.7	21	84.3	352.5
11	91.4	382.2	合计 / 万 kWh		8022.8

整个屋顶光伏电站 21 年的总发电量为 8022.8 万 kWh，年均发电量为 382.0 万 kWh。

屋顶光伏电站总投入为 1704.5 万元，单位成本约 6 元 / W_p ，泰中罗勇工业园内工业用电价格约为 0.95 元 / kWh。由于泰国屋顶光伏电站普遍规模较小，所以泰国政府对屋顶光伏发电项目无补贴政策。因此，在无泰国政府补贴的情况下，

该电站回收成本需要的发电量 E_c 为 1.7942×10^7 kWh。

根据表 5 中的数据, 该电站前 4 年的发电总量为 1.6327×10^7 kWh。若要回收成本仍需 1.615×10^6 kWh 的发电量, 而第 5 年的发电量为 3.994×10^6 kWh, 因此仍需 0.404 年才能完全回收成本, 所以该电站的投资回收年限约为 4.40 年。

整个电站 21 年的总发电量为 8022.8 万 kWh, 项目总投入为 1704.5 万元, 则整个电站的平均发电成本为 0.21 元/kWh。该价格相较于泰国罗勇府地区工业用电价格 0.95 元/kWh 而言, 经济效益显著。

3.2 环境效益

光伏电站属于清洁能源利用, 不消耗煤炭资源, 不会产生 SO_2 、 CO_2 等污染物。

本电站的年均发电量为 382.0 万 kWh, 泰国供电煤耗率平均值为 $406.5 \text{ g/kWh}^{[8]}$, 因此年均标煤节约量 $Q_{\text{bm}} = 3.820 \times 10^6 \times 406.5 \approx 1552.8 \text{ t}$ 。

标准煤 CO_2 排放系数为 2.47, 则年均 CO_2 减排量 $Q_{\text{CO}_2} = 2.47 Q_{\text{bm}} \approx 3835.5 \text{ t}$ 。

标准煤 SO_2 排放系数为 0.02, 则年均 SO_2 减排量 $Q_{\text{SO}_2} = 0.02 Q_{\text{bm}} \approx 31.1 \text{ t}$ 。

标准煤粉尘排放系数为 0.01, 则年均粉尘减排量 $Q_{\text{F}} = 0.01 Q_{\text{bm}} \approx 15.5 \text{ t}$ 。

由以上数据可以看出, 该屋顶光伏电站运行后的减排效益非常显著, 大幅降低了环境治理成本, 具有显著的环境效益。

3.3 社会效益

通过在罗勇府泰中罗勇工业园建设屋顶光伏电站项目, 可以在泰国罗勇府乃至整个泰国起到屋顶光伏电站建设示范作用, 推动罗勇府光伏产业的发展。而且屋顶光伏电站建设具有一定的展示性, 可改善生活空间, 缓解长期注视钢结构厂

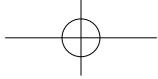
房造成的视觉疲劳, 带来一定的美感和舒适感。此外, 屋顶光伏电站还可以缓解泰国高峰用电需求, 提高清洁的可再生能源在所有能源应用中的占比^[9], 社会效益极大。

4 结论

本文通过对泰国罗勇府某 3 MW 屋顶光伏电站工程实例的效益分析可知, 该电站的投资回收期限为 4.40 年, 在整个电站 21 年的寿命周期内, 平均发电成本为 0.21 元/kWh, 相较于泰国罗勇地区工业用电价格 0.95 元/kWh 而言, 经济效益显著; 而且 CO_2 、 SO_2 、粉尘等有害物质的减排量显著。在现有政策和技术条件下, 在泰国罗勇府建设和发展屋顶光伏电站具有显著的环境效益和社会效益。

【参考文献】

- [1] 中国储能网新闻中心. 屋顶光伏成为增长点者 10 GW 泰国光伏装机容量不容错过 [EB/OL]. (2019-05-30). <http://www.escn.com.cn/news/show-738050.html>.
- [2] Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy. 泰国国家电力发展规划 (PDP)2018-2037 [EB/OL]. (2018-03-28). http://www.eppo.go.th/images/public_relations/PDP2018/PDP2018.
- [3] 陈林璞, 万志刚, 曹二营. 安阳市 1MW 太阳能并网光伏电站示范项目方案设计 [J]. 阳光能源, 2009(5): 66 - 68.
- [4] 张国辉. 分布式光伏发电项目后评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [5] 孙韵琳, 陈荣荣, 徐淑通, 等. 富华机械城 30 MW_p 光伏发电示范项目 [J]. 建筑电气, 2014(11): 729 - 733.
- [6] 芦玉珍, 刘涛. 某 90 MW 太阳能光伏并网电站方案设计 [J]. 硅谷, 2011(16): 108, 78.
- [7] 柳春, 申蕾, 王培康, 等. 分布式光伏发电在船厂钢结构厂房中的应用 [J]. 电气与能效管理技术, 2016(10): 66 - 71.
- [8] The Journal of the Royal Institute of Thailand [EB/OL]. (2012-12-22). http://www.royin.go.th/royin2014/upload/246/FileUpload/2887_2220.pdf.
- [9] 刘江. 建筑屋顶太阳能光伏发电项目的分析研究 [J]. 能源与节能, 2014(6): 85 - 86.



BENEFIT ANALYSIS OF ROOFTOP PV POWER STATION IN RAYONG OF THAILAND

Liu Qiyong, Xiao Hui

(*Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China*)

Abstract: A 3 MW rooftop PV power station is introduced which is located in Rayong of Thailand. The power generation capacity and benefit analysis are calculated theoretically, indicating rooftop PV power station has bright application prospects in Rayong of Thailand.

Keywords: solar energy; construction technology; rooftop PV power station; benefit analysis