

引用格式: 欧阳章智, 牟征辉, 曹长胜, 等. 基于煤矿排土场的光伏发电项目方案优化 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊1): 14-18. OUYANG Zhangzhi, MU Zhenghui, CAO Changsheng, et al. Optimization of photovoltaic power generation project based on coal mine dump [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 14-18. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.03.

基于煤矿排土场的光伏发电项目方案优化

欧阳章智^{1,✉}, 牟征辉¹, 曹长胜¹, 卢风华²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550008)

摘要: [目的] 通过“以光治荒”的方式推进煤矿排土场光伏发电项目的建设, 将生态保护与绿色高效能源战略有机融合, 以达到良好经济发展和生态环境治理的效果。[方法] 以某煤矿排土场光伏发电项目优化为例, 原方案采用的全固定支架形式, 考虑到红线调整、地质影响、施工进度可控等因素, 现调整为固定支架+柔性支架组合方案, 场地较平缓部分区域考虑布置固定支架, 柔性支架主要设置在坡面与跨沟处, 占比为40%~45%。结合固定倾角、发电效率、光伏组串布置间距等因素进行优化, 方案一固定支架倾角按16°, 柔性支架东西向固定倾角按4°, 南向及偏南方向顺坡布置。方案二根据最佳倾角确定, 固定支架倾角采用24°, 柔性支架固定倾角采用19°。[结果] 方案一比方案二增加8 MWp左右; 25 a总发电量: 方案一比方案二增加10%~15%。发电系统总效率: 方案一比方案二减少2%左右。[结论] 研究表明本方案的优化保证其装机容量、工程安全等的同时, 煤矿排土场边坡布置柔性支架增加了本工程创新性, 为后续相关工程起到示范作用。在工程设计优化过程中, 不仅仅考虑效率因素, 更多的是需关注多目标因素优化带来的经济效益。

关键词: 煤矿排土场; 柔性支架; 发电效率; 光伏板倾角; 发电项目

中图分类号: TM615; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0014-05

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.03

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Optimization of Photovoltaic Power Generation Project Based on Coal Mine Dump

OUYANG Zhangzhi^{1,✉}, MU Zhenghui¹, CAO Changsheng¹, LU Fenghua²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. POWER CHINA Guizhou Electric Power Engineering Co., Ltd., Guiyang 550008, Guizhou, China)

Abstract: [Introduction] To promote the construction of photovoltaic power generation project in coal mine dump based on the concept of "desertification control with a PV project", and organically integrate ecological protection with green and efficient energy strategies to achieve the purpose of sound economic development and ecological environment governance. [Method] The optimization of photovoltaic power generation project in a coal mine dump was taken as an example, in the original plan, a fully fixed support is used. After taking into account factors such as boundary line change, geological influence, and controllable construction progress, now a combination of fixed supports and flexible supports is adopted. In areas with relatively flat terrain, fixed supports are considered, and the flexible supports are mainly used for slopes and cross ditches (40% ~ 45%). Optimization is carried out based on factors such as fixed inclination angle, power generation efficiency, and spacing of PV strings. Option 1: The fixed support has an inclination angle of 16°, a flexible support fixed inclination angle of 4° in the east-west direction, and it is arranged on the slope in the south and slightly south directions. Option 2: the fixed support has an optimal inclination angle of 24° and a flexible support inclination angle of 19°. [Result] The power generation in Option 1 is about 8 MWp higher than that of Option 2, and the total power generation is increased by 10% ~ 15% in 25 years. The total efficiency of the power generation system in Option 1 reduces by about 2% compared to Option 2. [Conclusion] The

study has shown that the project optimization guarantees the installed capacity, safety, etc. At the same time, it's an innovation to arrange flexible supports on the slope of the coal mine dump in this project, so it serves as a model for future projects. In the process of project design optimization, we should not only consider the efficiency, but also pay more attention to the economic benefits brought by multi-objective factor optimization.

Key words: coal mine dump; flexible support; power generation efficiency; PV panel inclination angle; power generation project
 2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.
 This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

气候变化不断为人类社会敲响警钟, 实现碳中和对全球气温快速提升发挥着重要控制作用。完成能源消费结构从化石能源为主体向零碳新能源为主体的转型, 是实现碳中和目标的首要任务^[1-3]。

据不完全统计, 我国现有各类排土场 5 000 余座, 累计矸石堆积量超过 30 亿 t^[4-5]。针对矿渣排土场土地的开发、利用及治理, 光伏电站的建设既可以解决发展低碳经济、节能减排、开发绿色清洁能源、实现能源结构调整面临的问题, 也可以实现对矿渣排土场的综合治理, 是综合治理矿渣排土场的创新性解决方案, 对其他类型排土场的治理具有示范作用^[6-7]。

文章以某煤矿排土场光伏发电项目为例, 以用地利用与装机容量最大化为目标, 对系统总体方案优化进行分析, 并提供边坡柔性光伏支架设计方案, 供同类工程设计人员参考。

1 项目概况

某煤矿排土场光伏电站项目原规划交流侧装机容量为 50.40 MW, 采用全固定支架形式, 直流侧装机容量 64.35 MW_p, 共布置 16 个标称容量 3.15 MW 的组串式逆变方阵, 新建一座 110 kV 升压站, 年均上网电量 92.454 4 GWh。建设用地场址如图 1 所示。



图 1 建设用地场址

Fig. 1 Construction site

2 方案调整

1) 原方案红线范围约 77.46 hm², 最新红线范围仅仅 46.73 hm² 左右, 较原方案少 30.73 hm² (南坡用地急剧减少)。同升压站位置调整至光伏场区内。

2) 原方案采用的全固定支架形式。现调整为固定支架+柔性支架组合方案, 场地较平缓部分区域考虑布置固定支架, 柔性支架主要设置在坡面处, 占比为 40%~45%。光伏组串布置如图 2 所示。

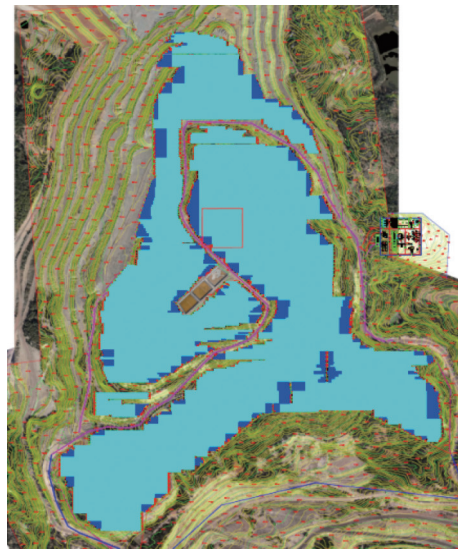


图 2 组串布置图

Fig. 2 String arrangement diagram

3 系统总体方案优化设计

3.1 方案优化

不同倾角下度电投资变化情况如表 1 所示。当倾角在 15°~25°变化时, 发电量变化较小; 由于倾角变化导致的土地面积及支架倾角变化, 在 15°~25°时, 度电成本 16°~20°接近, 19°度电成本最优。

1) 方案一: 固定支架倾角按 16°, 柔性支架东西向固定倾角按 4°, 南向及偏南方向顺坡布置。对于

表 1 不同倾角下度电投资变化情况表

Tab. 1 Changes in kWh investment at different angles

倾角/(°)	年等效满负荷 小时/h	单位千瓦静态 投资/[元·(kW) ⁻¹]	度电投资/ [元·(kWh) ⁻¹]
15	1 470.62	4 081.5	2.768 8
16	1 473.50	4 083.5	2.765 0
17	1 475.80	4 085.5	2.764 8
18	1 477.66	4 087.5	2.764 3
19	1 479.38	4 089.5	2.764 0
20	1 480.40	4 091.5	2.764 2
21	1 481.23	4 093.5	2.764 6
22	1 481.50	4 095.5	2.765 0
23	1 481.52	4 097.5	2.765 7
24	1 481.29	4 099.5	2.766 2
25	1 480.59	4 101.5	2.768 2

固定支架平地的间距根据固定倾角为 16°的净距离为 2 m, 偏南方向最小净距离为 1 m, 东西坡及偏北坡按遮挡确定组串之间的净距离。对于柔性支架, 固定倾角偏南方向、顺坡布置的最小净距离为 0.75 m, 偏北方向按遮挡因素确定组串之间的净距离。通过对倾角的优化处理, 平地及整体偏南区域考虑布置固定支架, 边坡区域考虑布置柔性支架。本方案共布置有 12 个方阵, 直流侧装机容量为 48.263 04 MWp。

2) 方案二: 根据最佳倾角确定, 固定支架倾角采用 24°, 柔性支架固定倾角采用 19°。对于固定支架平地的间距固定倾角为 24°的净距离为 2 m, 偏南方向最小净距离为 1 m, 东西坡及偏北坡按遮挡确定组串之间的净距离。对于柔性支架, 固定倾角朝南方向、顺坡布置的最小净距离为 1 m, 偏北方向按遮挡因素确定组串之间的净距离。固定倾角朝东西的间距为 2 m, 平地、整体偏南区域及小区域等考虑布置固定支架, 有边坡等区域布置柔性支架。本方案共布置有 10 个方阵, 直流侧装机容量为 40.219 2 MWp。

3.2 光伏发电工程年上网电量计算

1) 光伏发电系统效率分析

方案一: 首年的光伏发电系统效率约为 81.30%, 系统总效率约为 83.73%。

方案二: 首年的光伏发电系统效率约为 82.96%, 系统总效率约为 85.44%。

2) 发电量及首年利用小时数估算

方案一: 直流侧装机容量约为 48 MWp, 首年发电量约为 73.383 GW·h, 25 a 总发电量约为 1773.493 GW·h,

首年利用小时数约为 1 528.81 h, 25 a 年平均利用小时数约为 1 444.58 h。

方案二: 直流侧装机容量约为 40 MWp, 首年发电量约为 67.080 6 GW·h, 25 a 总发电量约为 1 584.613 3 GW·h, 首年利用小时数约为 1 560.01 h, 25 a 年平均利用小时数约为 1 474.06 h。

根据现有用地红线范围(46.73 hm²), 直流侧装机容量: 方案一比方案二增加 8 MWp 左右; 25 a 总发电量: 方案一比方案二增加 10%~15%; 发电系统总效率: 方案一比方案二减少 2% 左右。

4 边坡柔性光伏支架设计方案

柔性光伏支架利用钢索结构成功解决地形复杂的山地、煤矿排土场等受跨度和高度所限造成传统支架无法安装的技术难题^[8-10]。项目完工后的鸟瞰图如图 3 所示。



图 3 完工后的鸟瞰图

Fig. 3 Aerial view after completion

4.1 柔性支架形式设计

根据煤矿排土场当地的气候特点, 地理位置, 地貌特征以及受力荷载情况进行设计。

此项目柔性光伏支架可采用端部双立柱, 中间单立柱结构, 更适合煤矿回填区的地势特点, 利于支架结构在平面内及平面外进行调节。柔性支架形式如图 4 所示。

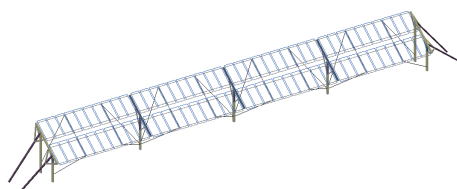


图 4 柔性支架形式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flexible support form

4.2 柔性支架结构及基础设计

构件要结合实际跨度、柱距通过计算设计结构方案和结构措施保证构件的强度、刚度、稳定性。保证拉索以及横梁的挠度要求。根据不同的温、湿

度环境以及特殊要求的地区采取特殊的防腐处理。支架跨度一般采用 12~25 m 设计,总跨度的长度根据地势进行调整,一般不超过 300 m。柔性支架计算流程如图 5 所示。

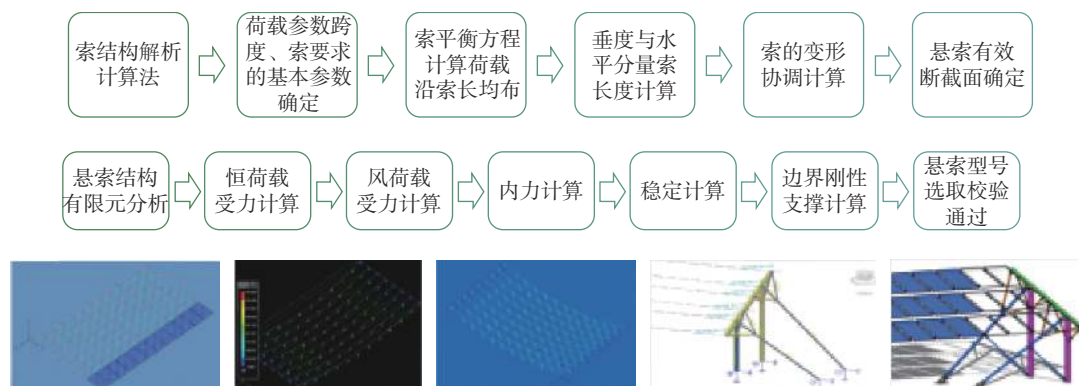


图 5 柔性支架计算流程

Fig. 5 Flexible support calculation flow

根据支架在各工况荷载的作用下所受力学分析设计光伏支架结构及基础。

结构设计中的相关控制参数如下:

- 1) 本工程结构的设计使用年限为 25 a。
- 2) 结构的安全等级为三级。
- 3) 结构重要性系数取 0.95。
- 4) 根据《建筑结构荷载规范》,项目地基本风压: 0.28 kN/m^2 (25 a), 取 0.3 kN/m^2 (25 a)。
- 5) 钢绞线铺设组件后下挠值: $f=150 \text{ mm}$ 。
- 6) 钢绞线初始张力: $H(\text{负})=15 \text{ kN}$ 。
- 7) 柔性支架东西坡高到低南向倾角 4° , 南、西南、东南向高到低随坡就势布置。
- 8) 柔性支架光伏面板下边缘离地高度不小于 2.5 m。
- 9) 组件功率: 550 Wp; 组件尺寸: $2\ 278 \text{ mm} \times 1\ 134 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 。

5 结论

本文以某煤矿排土场光伏发电项目为例,采取了倾角调整、平面布置调整与刚柔支架组合等一系列的优化措施,在实际工程中均得到了实现。得出以下几点结论:

1) 根据煤矿排土场地质条件,并结合项目自身特点、目前厂家支架技术水平、施工控制及安全、工程造价等因素,场地较缓区域考虑布置固定支架,柔

性支架主要考虑设置在地势起伏较大区域(主要设置在边坡面上)体现出它自身的优势。此方案保证其装机容量、工程安全等的同时,煤矿排土场边坡布置柔性支架增加了本工程创新性,为后续相关工程起到示范作用。

2) 在红线有限用地范围,为保证装机容量最大化,考虑固定支架固定倾角为 16° , 柔性支架布置依地形设置。直流侧装机容量: 方案一比方案二增加 8 MWp 左右; 25 a 总发电量: 方案一比方案二增加 10%~15%。发电系统总效率: 方案一比方案二减少 2% 左右。方案一发电系统总效率略低于方案二,但整体用地利用得到最大化,装机容量大大提升,因此在工程设计优化过程中,不仅仅考虑效率因素,更多的是需关注多目标因素优化带来的经济效益。

参考文献:

- [1] 邹才能, 薛华庆, 熊波, 等. “碳中和”的内涵、创新与愿景 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.005.
- ZOU C N, XUE H Q, XIONG B, et al. Connotation, innovation and vision of "carbon neutral" [J]. Natural gas industry, 2021, 41(8): 46-57. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.005.
- [2] 邹才能, 潘松圻, 马锋. 碳中和目标下世界能源转型与中国能源人新使命 [J]. 北京石油管理干部学院学报, 2022, 29(3): 22-32.
- ZOU C N, PAN S Q, MA F. The world energy transition under the carbon neutrality goal and the new mission of Chinese energy

- people [J]. Journal of Beijing petroleum managers training institute, 2022, 29(3): 22-32.
- [3] 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 48-58. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001.
ZOU C N, CHEN Y P, XIONG B, et al. Mission of new energy under carbon neutrality goal in China [J]. Bulletin of Chinese academy of sciences, 2023, 38(1): 48-58. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001.
- [4] 保瑞, 郁华嘉, 朱辉, 等. 某采石场露天边坡稳定性分析及治理 [J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 89-92. DOI: 10.13828/j.cnki.ckjs.2022.05.049.
BAO R, YU H J, ZHU H, et al. Stability analysis and treatment of open-pit slope in a quarry [J]. Mining technology, 2022, 22(5): 89-92. DOI: 10.13828/j.cnki.ckjs.2022.05.049.
- [5] 陈光木. 降雨对露天矿软弱基底排土场边坡稳定性的弱化效应 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(12): 56-62. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2022.12.004.
CHEN G M. Weakening effect of rainfall on slope stability of dump with weak base [J]. Mining research & development, 2022, 42(12): 56-62. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2022.12.004.
- [6] 王玉海. 研石场多元化生态修复及环保达标整治研究 [J]. 中国化工贸易, 2021(18): 193-194.
WANG Y H. Research on multi-ecological restoration and environmental protection standard regulation of gangue yard [J]. China chemical trade, 2021(18): 193-194.
- [7] 陈宏贵, 郑海军, 华绍广. 排土场资源综合利用对大气环境的影响研究 [J]. 现代矿业, 2021, 37(12): 29-30,34. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2021.12.010.
CHEN H G, ZHENG H J, HUA S G. Study on the influence of comprehensive utilization of dump resources on atmospheric environment [J]. Modern mining, 2021, 37(12): 29-30,34. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2021.12.010.
- [8] 李立, 吴林, 文红晏, 等. 大坡度斜坡光伏支架设计应用分析 [J]. 能源与节能, 2021(3): 202-204. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.03.088.
LI L, WU L, WEN H Y, et al. Analysis on design and application of photovoltaic support for large slope [J]. Energy and energy conservation, 2021(3): 202-204. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.03.088.
- [9] 杜航, 徐海巍, 张跃龙, 等. 大跨柔性光伏支架结构风压特性及风振响应 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 67-74. DOI: 10.11918/202112064.
DU H, XU H W, ZHANG Y L, et al. Wind pressure characteristics and wind vibration response of long-span flexible photovoltaic support structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(10): 67-74. DOI: 10.11918/202112064.
- [10] 杜航. 大跨度柔性光伏支架结构的风致效应及其控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002733.
DU H. Wind-induced effects and control of large-span flexible photovoltaic support structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002733.

作者简介:



欧阳章智

欧阳章智 (第一作者, 通信作者)

1986-, 男, 侗族, 高级工程师, 硕士, 主要从事建筑、市政、新能源等相关建设、技术管理工作 (e-mail) ouyangzhangzhi@gedi.com.cn。

牟征辉

1989-, 男, 学士, 研究方向为新能源设计和电力规划工作 (e-mail)mouzhenghui@gedi.com.cn。

曹长胜

1989-, 男, 学士, 研究方向为结构设计管理工作 (e-mail)caochangsheng@gedi.com.cn。

卢凤华

1994-, 男, 学士, 研究方向为新能源设计和电力规划工作 (e-mail)1069546036@qq.com。

(编辑 赵琪)