

屋顶分布式光伏电站优化设计探析

代大海

(苏州中信博新能源电力科技有限公司, 江苏 苏州 215300)

摘要: 2025 年起国家实施行业新规, 分布式光伏电站的开发建设进入了一个新的发展阶段。为了做好分布式光伏电站建设工作, 必须对电站设计进行优化, 以确保其既满足最新的政策要求, 也符合新政下的项目技术经济性要求。通过对分布式光伏电站设计的关键环节进行优化探析, 以提高电站收益和适应新时期发展要求。

关键词: 分布式光伏电站; 组件及安装倾角选择; 组串接线形式; 设计优化

中图分类号: TM615

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2601F027

CSTR: 32400.14.ncdqh.2601F027

Exploring Optimal Design Strategies for Rooftop Distributed Photovoltaics

DAI Dahai

(Suzhou Arctech Solar Energy Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215300, China)

Abstract: The release and implementation of the 2025 "Measures for the Administration of the Development and Construction of Distributed Photovoltaic plants" mark a new phase in the deployment of distributed photovoltaic (PV) plants. To effectively advance such projects in this new era, optimizing the design of distributed PV stations has become essential. This optimization ensures that stations not only comply with the latest policy requirements but also meet the technical and economic benchmarks under the new regulatory framework. By exploring and refining key design aspects, this paper provides a reference for enhancing project returns and adapting to the development demands of this new period.

Keywords: distributed PV power station; PV module and tilt angle selection; string connection method; design optimization

近年来, 我国在分布式光伏领域已取得长足发展。为了促进分布式光伏电站项目健康可持续发展, 2025 年国家发布《分布式光伏发电开发建设管理办法》(国能发新能规〔2025〕7 号), 明确了不同类型分布式光伏电站的定义, 规定了其并网的技术要求以及在备案、消纳保障和市场化交易等方面的政策。

新政实施过程中, 由于可利用的优质工厂屋顶资源日益减少, 有效安装面积受限, 在有限空间建设电站时, 工厂消纳能力确定后, 为确保电站技术经济性, 光伏组件选型、安装倾角确定、组串接线方式选择等环节, 对电站后期发电量以及项目投资收益影响较显著, 需要进行设计优化。本文结合实际案例, 对上述关键环节展开分析。

1 大功率高效组件选型及组件安装倾角选择优化分析

目前, 我国屋顶分布式光伏电站建设在大功率

收稿日期: 2026-01-26

高效组件选型方面研究较少, 关于大功率高效组件安装倾角的研究也不多, 已有研究主要基于传统多晶硅或单晶硅的小功率低效组件。

目前行业主流大功率高效光伏组件主要有 TOPCon、BC、HJT 3 种技术路线的产品。其中, TOPCon 及 HJT 组件具备较好的双面发电性能, 而 BC 组件因正面无汇流栅线, 光线吸收率更高, 外观更美观, 但其背面发电能力较 TOPCon 与 HJT 组件要弱一些。3 种技术路线对应的光伏组件特点见表 1。

应用于屋顶分布式光伏电站的大功率高效单晶组件, 其功率主要集中在 580~700 Wp 之间。以同一地区 50 kWp 电站容量为例(容配比按 1.1 计算, 实际装机容量约 55 kWp, 混凝土屋顶采用最佳倾角, 彩钢瓦屋顶采用平铺方式), 布置方案按照组件竖向方案设计。组件横向布置相较于竖向布置会增加支架材料的用钢量及电缆工程量^[1-2]。以下从布置容量、发电量 2 方面对 640 Wp BC 组件、630 Wp TOPCon

表1 行业主流大功率高效组件特点

技术类型	TOPCon	BC	HJT
特点	具有双面率高、衰减低、温度系数低、弱光效应好	正面无栅线，入照光线利用率高、结合减反射膜提高开压特性	双面对称结构提升发电效率且制备工艺简单
主要功率段/Wp	580~700	580~680	630~740
效率	量产效率为23%~25%，理论极限效率为28.7%	量产效率为23%~26%，理论极限效率为29.1%	量产效率为23.3%~26.3%，理论极限效率为29.52%

组件、700 Wp HJT 组件进行对比，结果见表2。

由表2可知，从布置方案总造价来看，630 Wp (TOPCon) < 640 Wp (BC) < 700 Wp (HJT)。但从组件效率和总质量来看，640 Wp BC 组件较630 Wp TOPCon 组件和700 Wp HJT 组件有一定的优势。

使用 PVsyst 软件对上述3种组件在不同场景进

表2 不同大功率光伏组件组成的光伏方阵布置造价表

	TOPCon: 630	BC: 640	HJT: 700
组件规格/Wp	(2 382 mm × 1 134 mm × 30 mm)	(2 382 mm × 1 134 mm × 30 mm)	(2 384 mm × 1 303 mm × 33 mm)
组件效率/%	23.33	23.72	22.57
单块质量/kg	33.1	33.5	37.5
安装容量/kWp	55	55	55
方阵所需混凝土屋顶有效面积/m ²	446.25	436.65	458.63
方阵所需彩钢瓦屋顶有效面积/m ²	341.30	333.94	352.01
组件数量	88	86	79
单块组件价格/元	434.7	486.4	581
组件价格合计/元	38 253.6	41 830.4	45 899
混凝土屋顶租赁合计/元	11 156.25	10 916.25	11 465.75
彩钢瓦屋顶租赁合计/元	8 532.5	8 348.5	8 800.25
混凝土屋顶造价合计/元	49 409.85	52 746.65	57 364.75
彩钢瓦屋顶造价合计/元	46 786.1	50 178.9	54 699.25

行发电量仿真模拟，混凝土屋顶组件以最佳倾角安装形式进行模拟，彩钢瓦屋顶组件以平铺安装方式进行模拟，得到如表3所示的各场景下各组件对应的发电量情况。

表3 不同大功率光伏组件各场景下发电量统计表

组件规格/Wp	TOPCon: 630	BC: 640	HJT: 700
安装容量/kWp	55	55	55
方阵在混凝土屋顶首年发电量/(kW·h)	68 730	69 830	67 110
方阵在彩钢瓦屋顶首年发电量/(kW·h)	63 640	64 850	62 250
方阵在混凝土屋顶25年年均发电量/(kW·h)	64 584.4	65 667.2	63 017.6
方阵在彩钢瓦屋顶25年年均发电量/(kW·h)	59 609.2	60 768.4	58 326.8

由表3可知，从首年发电量来看，700 Wp (HJT) < 630 Wp (TOPCon) < 640 Wp (BC)，年均发电量情况亦如此。

通过方案造价及发电量对比可知，屋顶分布式光伏电站采用630 Wp (TOPCon) 组件造价相对最低，而640 Wp (BC) 组件在发电效率、总体质量及发电量方面有一定优势。大功率高效组件 TOPCon 与 HJT 具有良好的双面发电功能，BC 组件的正面发电性能优异。在屋顶分布式电站建设中，混凝土屋顶的光伏组件距离混凝土屋面有一定距离，可以使双面组件利用背面增益提升发电量，且增益随组件距屋面高度不同而变化，一般距离屋面高度在0.3~1 m 之间^[3]，因此，混凝土屋顶宜采用大功率高效 TOPCon 或 HJT 组件。对于彩钢瓦屋顶，由于光伏组件平铺安装，安装角度只能与屋顶排水坡度一致，组件背面与屋面间距仅约0.1 m，在此间距下双面组件的背面发电增益功能无法充分发挥，故彩钢瓦屋顶光伏电站不宜采用 TOPCon 或 HJT 双面大功率高效组件，宜优先考虑使用大功率高效 BC 组件。

混凝土屋顶项目中，大功率高效光伏组件安装倾角的选择须进行认真对比分析。以上述某地（最佳倾角25°）为例，使用630 Wp TOPCon 大功率高效组件，平均电价0.827 元/(kW·h)，混凝土屋顶有效利用面积1 200 m²，对不同安装倾角的装机容量、发电量、成本收益情况进行对比。倾角从5°开始，每5°一档，直至35°，覆盖全国经济发达区域混凝土厂房屋顶光伏组件的安装角度范围。发电量仿真

模拟采用 PVsyst 软件，得到综合对比分析结果见表 4。

由表 4 可知，在最佳安装倾角下，尽管度电成本相对最低，等效发电小时数相对最高，但安装容量却不大。当屋顶有效利用面积较小时，为在有限空间内安装大功率高效组件，不能直接根据项目地经纬度信息查询或者计算出的最佳倾角进行安装，而应综合考虑不同倾角对应的装机容量及发电量来确定。

同时也可以看出，当大功率高效双面组件倾角低于 10° 时，尽管装机容量最大，但等效发电小时数最低，度电成本也最高。结合图 1 可知，这是因为倾角低于 10° 后，双面组件背面距离屋面更近，其背面接收到屋面的反射光、后排组件正面的反射光及大气散射光均会减少，背面发电增益随之降低。同时，正面太阳入射角增大，导致组件表面接收的太阳法向直射光减少，影响发电效率。此外在

2°~6° 倾角下安装的组件正面下部容易积灰^[4]，冬季积雪不易滑落，会进一步导致发电量降低，若清洗不及时，组件底部积灰层还可能形成热斑，造成组件损坏。

由上述分析可知，屋顶分布式光伏电站在进行大功率高效组件选型时，对于混凝土屋顶或有倾角及组件安装高度要求的场景，宜选用 TOPCon 大功率高效双面组件。即便屋顶利用面积偏小，光伏组件安装倾角也不应低于 10°，宜根据屋顶有效利用面积及不同安装倾角对应的容量及发电量进行综合比选，合理选择组件安装倾角。在彩钢瓦屋面平铺安装时，宜选用 BC 大功率高效光伏组件。

2 不同组串接线形式及对应发电量情况

从表 5 对比采用双面高效组件时不同接线方式对应的发电量情况，在我司苏州地区某自投分布式光伏电站建设时，先使用 PVsyst 软件分别对采用一

表4 不同组件安装倾角下综合对比表

倾角/(°)	装机容量/kWp	年均发电量/(kW·h)	等效发电小时数/h	建设成本/万元	总收益/万元	度电成本/(元·(kW·h) ⁻¹)
5	229.32	245 424.0	1 070.23	59.623 2	447.790 9	2.429 4
10	212.94	228 912.0	1 075.01	55.364 4	417.911 2	2.418 6
15	196.56	221 364.0	1 126.19	51.105 6	406.564 5	2.308 7
20	180.16	204 024.0	1 132.46	46.841 6	374.978 0	2.295 9
25	180.16	205 160.0	1 138.77	46.841 6	377.326 7	2.283 2
30	147.42	166 545.2	1 129.73	38.329 2	344.390 1	2.301 4
35	147.42	166 111.6	1 126.79	38.329 2	305.106 5	2.307 4

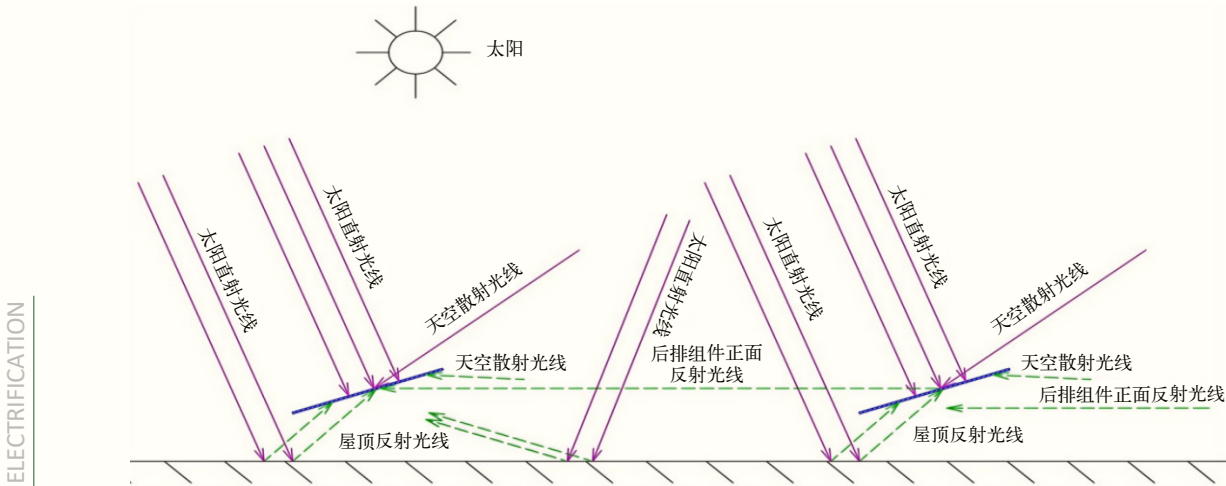


图1 双面光伏组件最佳工作状态时光线入射图

字形及 C 字形接线方式的逆变器发电量进行了模拟仿真。软件设置时,除组串接线方式不一致、直流线损稍有不同外,其余参数均保持一致。同时,监测电站建成后逆变器各月发电量数据,所得结果见图 2。

表5 2 台逆变器对应的设备材料表

序号	设备	规格型号	数量	备注
1	光伏组件	590 Wp ($I_{mp} = 13.36\text{A}$ 、 $U_{mp} = 44.17\text{V}$)	96	TOPCon 双面
2	光伏逆变器	50 kW($P_{max} = 55\text{kW}$ 、 $U_0 = 380\text{V}$)	2	U_0 为并网电压
3	直流电缆/m	Pfg1169-1 × 4 mm ² (DC1100 V)	784	NB01:258 m NB08:220 m

注: 40 ℃ 时,铜导体的电阻率 ρ 为 $0.0192\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; L 为光伏电缆长度; S 为光伏电缆截面积。

本项目低压 380 V 并网,其中 2 台 50 kW 逆变器各接 6 串光伏组串,每串接 16 块 590 W 双面 TOPCon 组件,组件安装倾角 15°。NB01 逆变器组串采用一字形接线, NB08 逆变器组串采用 C 字形接线,详见图 3。

从接线形式可以看出,采用一字形接线时,光伏直流专用电缆较采用 C 字形接线多。NB01 逆变器直流电缆总用量较 NB08 逆变器多 38 m,即 NB01 直流电缆线损比 NB08 稍大。

2023 年 12 月并网,电站建成 1 a 后,监测 2 台逆变器从 2024 年 1—12 月各月实际发电量情况。从图 2 可知, PVsyst 软件模拟的逆变器发电量较实际逆变器发电量要高,月均相差 2.57%。无论是软件模拟还是实际发电量数据, C 字形接线逆变器在某些月份及整体发电量方面比一字形接线逆变器稍低,两者相差约 0.92%。由此可见,分布式光伏电站在

组串设计时,若有一字形接线条件,宜采用一字形接线形式。

3 同场景下不同组串接线形式的逆变器发电量差异原因分析

2 台逆变器额定功率及制造厂商相同,逆变器容配比均为 1.1,接入组串数量、组件型号及容量、组件安装倾角及前后间距均相同,组件均朝正南。不同之处在于逆变器直流组串接线方式不同,接入逆变器 MPPT 的方案也不同。

在不改变光伏阵列原设计安装间距的情况下,尤其是在屋顶障碍物较多、有效利用面积较小时,如何提高屋顶电站的发电量是设计人员应充分考虑的问题。我国位于北半球,太阳东升西落,光伏组件朝正南布置。每天随着太阳逐步升起,光伏子阵前后阴影是由长变短,直至中午 12:00,光伏子阵前后阴影影响最小;随着太阳西落,光伏子阵前后阴影又逐步加长。如图 4 所示,根据阴影运动的规律可知,若光伏组串接线全部采用 C 形型式,在每天 06:00—09:00 和 15:00—17:00 时段,这些组串会因为受前排阴影遮挡,导致该时段发电量降低,从而影响该逆变器的累计发电量。

从图 2 不同接线方式对应的发电量、图 4 前后排影响趋势图可看出,一字形接线在屋顶分布式光伏电站设计中具有一定优势。同一项目地,影响光伏组串发电量的因素包括环境温度、太阳辐射值、组件转换效率、逆变器转换效率、直流电缆压降、线损及阴影遮挡等。本项目光伏逆变器 NB01 所有组串均采用一字形接线形式, NB08 所有组串均采用 C 字形接线形式,在其他条件相同的前提下,影响组串发电量的主要因素为直流电缆线损及前后排阴影遮挡。

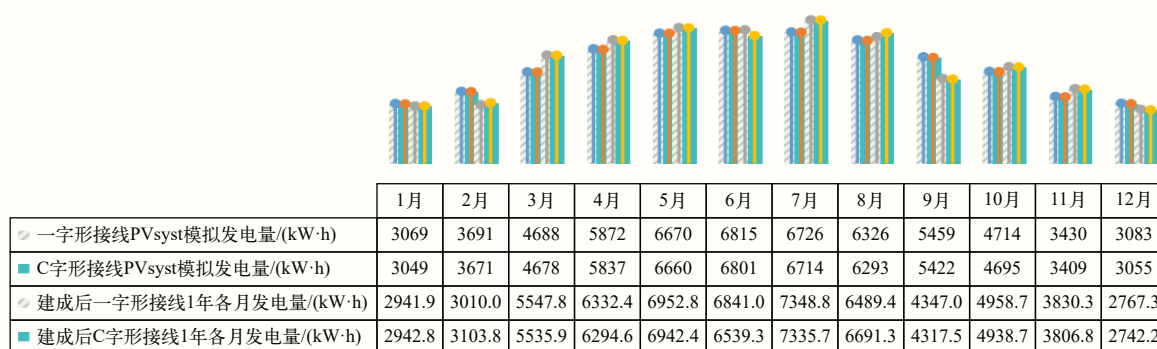


图2 NB01 与 NB08 前期模拟及并网后各月发电量情况

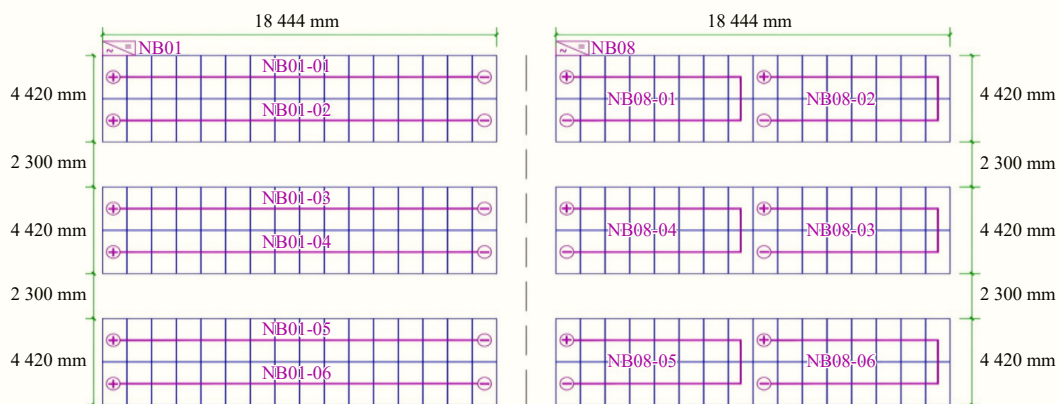


图3 NB01 与 NB08 采用不同组串接线方式

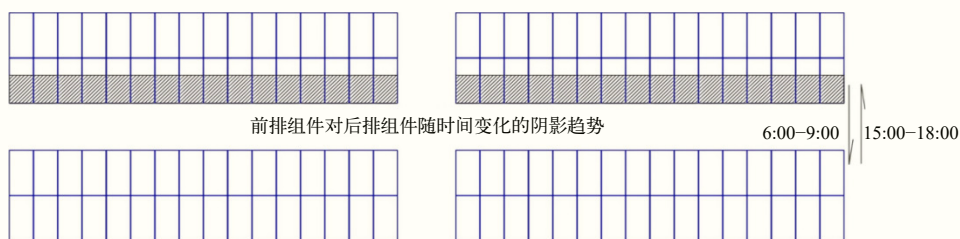


图4 光伏子阵在 06:00—09:00 和 15:00—17:00 前排对后排的阴影影响规律

NB01 直流电缆电压降:

$$\Delta U = IR = \frac{(I_{mp} 2\rho L)}{S} = 33.09 \text{ V}。$$

$$U\% = \frac{\Delta U}{U_{mp}} \times 100\% = 4.68\%。$$

$$\Delta P = 2 \frac{\Delta U I_{mp}}{1\,000} = 0.88 \text{ kW}。$$

NB08 直流电缆电压降:

$$\Delta U = IR = \frac{I_{mp} 2\rho L}{S} = 28.22 \text{ V}。$$

$$U\% = \frac{\Delta U}{U_{mp}} \times 100\% = 3.99\%。$$

$$\Delta P = 2 \frac{\Delta U I_{mp}}{1\,000} = 0.75 \text{ kW}。$$

从上述理论计算可知, NB01 直流电缆总压降比 NB08 直流电缆总压降稍高, 高出 0.69%, 整体直流线损也比 NB08 多 0.13 kW。仅从理论计算, NB08 的日累计发电量应比 NB01 日累计发电量微高, 但从两台逆变器日累计发电功率曲线来看, 实际情况并不是这样, 详见图 5、图 6。

从图 5、图 6 可知, NB01 在 06:00—09:00 和 15:00—17:00 时段的发电量 S_{21} 和 S_{22} 比 NB08 此阶段的发电量 S_{11} 和 S_{12} 要高。从监控后台查询到的相关发电量数据可知 NB01 每天在 06:30 左右启动发

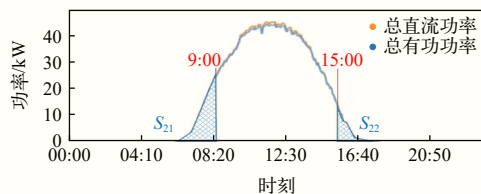


图5 NB01 逆变器日发电功率曲线

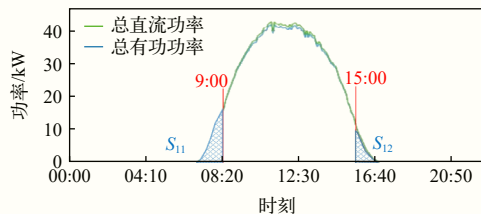


图6 NB08 逆变器日发电功率曲线

电, 有时甚至更早; 而 NB08 则在 07:00 左右才开始发电, 有时甚至更晚。

造成以上情况的主要原因是每天早晚, 前后组件阴影遮挡影响组串发电。晶硅组件的弱光性能较薄膜及钙钛矿光伏组件差, 一旦单串组件有 10% 的阴影遮挡, 整个组串发电量将减少约 50% 甚至更多; 遮挡越多, 发电量减少越多, 全部遮挡则无发电量输出。采用 C 字形接线方式的组串在每天 06:00—09:00 和 15:00—17:00 间因前排阴影遮挡, 导致整个

(下转第 60 页)



图6 地下站开关柜顶部防雨棚

验,确保功能正常。

2.4.4 注浆治理

地下站的渗水问题,通常难以像地上站那样,通过从屋顶处铺设防水材料等进行有效治理。由于地基沉降、墙面裂缝等的存在,地下站的各处墙面都有渗水可能。此时,在渗水部位进行打孔注浆,是比较有效的治理手段。

3 结束语

地下变电站是电力防汛的重中之重,本文分析了地下站的防汛特点,在预警监测、外围阻水、内部排水、应急补强等方面分别提出了针对性对策,构建了一套相对完备的“四位一体”防汛体系,相关措施的合理应用,能够有效守好防汛安全。

(上接第38页)

C字形组串发电量偏低;而采用一字形接线的组串在相同时段内,因至少保持其中一串处于正常发电状态,从而提高了累计发电量。在相同地点直流电缆压降及线损相差不大的情况下,组串采用一字形接线形式的发电量比采用C形接线形式的组串高。

4 结束语

在屋顶分布式光伏电站项目中,混凝土屋顶宜采用大功率高效 TOPCon 或 HJT 组件;彩钢瓦屋顶宜使用大功率高效 BC 组件。混凝土屋顶或其他有倾角及组件高度安装要求的场景,光伏组件安装倾角不应小于 10° 。屋面有效利用面积日趋紧张,组串接线形式将直接影响项目后期发电量以及建设单

参考文献

- [1] 王晓辉,夏中原,兰光宇,等.变电站静态防汛能力模糊综合评估[J].*电力科学与技术学报*,2024,39(6):60-68.
- [2] 王津宇,兰光宇,卢明,等.面向变电站防汛的熵权分配混杂风险评估[J].*电力系统及其自动化学报*,2023,35(7):74-82.
- [3] 曹梦馨,杨太华.变电站防汛改造工程施工风险评估及对策[J].*绿色科技*,2023,25(10):197-203.
- [4] 程刚.变电站防汛工作的问题分析与整改方案[J].*农村电工*,2022(7):30-30.
- [5] 袁晓明,朱亚平.地下变电站给排水设计优化措施[J].*华东电力*,2014,42(3):4-4.
- [6] 文涛陈.电网变电站防汛能力提升工作方法研究[J].*水电科技*,2024,7(9):70-70.
- [7] 赵林森.变电站智能防汛远程监测系统[J].*电力系统装备*,2021(23):205-206.
- [8] 郭斌,陈奇凤,黄冠南,等.福建电网变电站防汛能力提升研究[J].*海峡科学*,2024(10):50-52.
- [9] 崔洪波,王晖,李科文,等.LCC分析的变电站防汛能力提升可行性评估[J].*城市道桥与防洪*,2022(12):154-158.
- [10] 陈鹏,丁雪峰,潘岑诚,等.悬浮式防汛防暴门的研制及在变电站的应用[J].*中国高新科技*,2025(7):110-112.
- [11] 惠东军,毛峰.变电站自动排水防汛系统[J].*农村电气化*,2011(7):39-39.
- [12] 胡志锋,曹朋辉,张波,等.数字孪生技术在变电站防汛风险评估中的应用[J].*电力安全技术*,2024,26(3):26-29.
- [13] 毛诗森.基于多源数据融合的变电站防汛预警与应急资源调度[D].武汉:武汉理工大学,2023.

作者简介

杨建(1991—),男,硕士,工程师,从事变电站运维管理工作,E-mail: 1554205735@qq.com.

(责任编辑:张峰亮)

位的投资收益水平,且电站容量越大影响越显著。对于混凝土厂房屋顶和受近景或远景阴影影响的彩钢瓦屋顶,其光伏组串其接线宜采用一字形方式。

参考文献

- [1] 王敏,何文俊.光伏组件横排及竖排布置时支架用钢量对比[J].*科技资讯*,2019(2):79.
- [2] 谢丹,鞠健,于苗苗,等.光伏电池阵列布置模式的探讨[J].*太阳能*,2013(23):28-31.
- [3] 李宗玮.双面双玻光伏组件背面发电量的影响因素分析[J].*城市建设理论研究(电子版)*,2024(26):13-14.
- [4] 蒋领.光伏组件下沿泥带对发电量的影响分析及解决方案[J].*太阳能*,2024(3):89-93.

作者简介

代大海(1983—),男,本科,中级工程师,研究方向为光伏电站电气设计,E-mail: ddhai168@yeah.net.

(责任编辑:袁航)