

平单轴支架应用于屋顶分布式光伏项目的经济可行性分析

浙江正泰新能源开发有限公司 ■ 陈明月* 吴云来 朱高麟 陈辉 兰正权

摘要: 为了在有限的屋顶面积下实现屋顶分布式光伏项目度电成本最低的目标,利用度电成本的经济性分析模型,选取了11个不同纬度和光照资源条件的地区,对这些地区采用平单轴支架与固定支架2种排布方式的屋顶分布式光伏项目的度电成本进行了对比,并分析了平单轴支架应用于屋顶分布式光伏项目的经济可行性。

关键词: 平单轴支架;固定支架;屋顶分布式光伏项目;度电成本;经济可行性

0 引言

降低度电成本、实现平价上网已成为光伏行业的共同目标。特别是在“531”政策出台以后,光伏发电系统的降本增效更显得迫在眉睫。在2017年的光伏“领跑者”地面项目中,很多企业为了降本增效,均采用了跟踪支架。随着跟踪支架技术越来越成熟,其成本也在逐渐降低,被广泛应用于大型地面光伏电站中;然而近两年来,在屋顶分布式光伏项目中其也成为各大光伏企业投资的重点。既然跟踪支架能大幅提高地面光伏电站的系统效率,在荷载满足要求的屋顶分布式光伏项目中是否也能广泛应用跟踪支架,以达到提高系统效率、降低度电成本的目的^[1]?考虑到屋顶的面积有限,而斜单轴和双轴跟踪支架的占地面积较大,因此,本文仅对平单轴支架应用于屋顶分布式光伏项目的经济可行性进行了分析研究。

1 经济分析模型

1.1 度电成本(LCOE)计算模型

度电成本(LCOE)是指光伏电系统平均每度电的发电成本,成本越低,市场竞争力越大,企业利润空间也越大,因此,降低度电成本一直是行业关注的重点。在国内,LCOE的计算模型通常为光伏电站的初始投资、25年运营维护成本及25年屋顶租金之和除以25年年均发电量,但该模型并未考虑资金的时间价值^[2]。而国外的度电成本计算模型考虑了运维成本及屋顶租金在时间作用下所产生的价值,更能体现真正的成本。因此,本文采用国际上的LCOE测算模型^[3],其计算式为:

$$LCOE = \frac{I_0 P_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{P_0 M}{(1+i)^n} + \sum_{n=1}^{25} \frac{F}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^{25} \frac{Q_n}{(1+i)^n}} \quad (1)$$

收稿日期:2018-09-28

通信作者:陈明月(1990—),女,本科,主要从事光伏系统优化设计方面的研究。mingyue.chen@astronergy.com



式中, I_0 为系统每瓦投资成本, 元/ W_p ; P_0 为屋顶上安装的组件的装机容量, W_p ; M 为系统每年每瓦的运维成本, 元/ W_p ; F 为屋顶每年的租金, 元; n 为光伏发电系统运行年份, 年; i 为折现率, %; Q_n 为第 n 年光伏发电系统的发电量, kWh。

2 平单轴支架东西向间距按全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡排布的经济性分析

2.1 经济性影响因素

一般而言, 对于平单轴支架的排布主要是确定其东西向间距, 即按照支架无逆跟踪技术、全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡时的间距计算。其计算式^[4]为:

$$L_1 = \frac{1}{2} R \cos \theta + \frac{1}{2} R \sin \theta \cot \beta \sin \varphi \quad (2)$$

式中, L_1 为平单轴支架的东西向间距, m; R 为组件长边长度, m; θ 为平单轴支架的最大跟踪角度, ($^\circ$); β 为太阳高度角, ($^\circ$); φ 为太阳方位角, ($^\circ$)。

屋顶分布式光伏项目采用平单轴支架可实现光伏阵列实时跟踪太阳运动, 使太阳光最大程度直射光伏阵列, 从而增加光伏阵列接收到的太阳辐射量, 以提高光伏系统的每瓦发电量。

由于平单轴支架的价格与运维成本比固定支架高, 而且当采用平单轴支架按无逆跟踪技术^[5]且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡的间距进行排布时, 光伏发电系统的装机容量比采用固定支架时的少, 再加上屋顶分布式光伏项目的屋顶大多采用租赁模式, 均摊到每瓦的租金成本就会增加, 因此, 虽然采用平单轴支架的屋顶分布式光伏项目的每瓦发电量会增加, 但其度电成本可能会比采用固定支架的高。这是因为系统成本增加的幅度比发电量增加的幅度大, 而系统成本的增加量与装机容量的减少量有关, 装机容量又与项目所在地的经纬度有关, 系统的发电量则与项目所在地的太阳辐射量及组件排布容量有关。

为详细分析这一情况, 本文选取了纬度及光

照资源条件均不同的 11 个地区, 对在这些地区采用固定支架和平单轴支架的屋顶光伏发电系统的度电成本进行了对比分析。

2.2 度电成本的实例计算

选取的 11 个地区分别为吉林长春、天津、宁夏石嘴山、山东潍坊、河南郑州、青海玉树、上海、江西南昌、云南昆明、广东汕头、广东广州, 均选择面积为 5760 m^2 的混凝土屋面 (长 96 m、宽 60 m)。假设屋面的荷载满足设置固定支架和平单轴支架的要求。

每个地区的屋顶光伏发电系统都按固定支架和平单轴支架 2 种方式进行排布。固定支架南北向间距按全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡取值, 平单轴支架东西向间距按无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡来取值。分别得出不同地区采用 2 种排布方式时的装机容量, 然后通过 PVsyst 仿真软件对每个地区 2 种排布方式下的系统发电量进行测算^[6]。

根据式 (1) 分别计算 2 种排布方式时光伏发电系统的度电成本。目前, 市场上采用平单轴支架的光伏发电系统的每瓦投资成本比采用固定支架的高 0.3 元左右, 采用平单轴支架的光伏发电系统每年每瓦的运维成本比采用固定支架的高 50%。因此, 2 种排布方式下的式 (1) 中参数的取值如表 1 所示。

表 1 LCOE 模型中的参数取值

参数	固定支架 光伏发电系统	平单轴支架 光伏发电系统
$I_0/\text{元} \cdot W_p^{-1}$	4.8	5.1
$M/\text{元} \cdot W_p^{-1}$	0.050	0.075
$F/\text{万元}$	4	4
$i/\%$	8	8
n	25	25

为了简化计算, 式 (1) 中的 Q_n 取年均发电量的值, 则上述 11 个地区分别采用 2 种支架排布方式下的光伏发电系统的度电成本如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 这 11 个地区即使纬度与

表2 $LCOE$ 计算对比表

地区	年辐射总量 /MJ·m ⁻²	纬度 / (°)	装机容量 /kW _p		平单轴支架 东西向 间距 /m	年均发电量 /MWh		$LCOE$ /元·kWh ⁻¹	
			固定支架	平单轴支架		固定支架	平单轴支架	固定支架	平单轴支架
长春	5074	43.82	219.45	190.58	5.1	294	289	0.509	0.519
天津	5142	39.09	308.55	242.00	4.2	377	330	0.515	0.526
石嘴山	6049	38.98	284.35	242.00	4.2	442	417	0.412	0.416
潍坊	5021	36.70	332.75	266.20	3.9	389	350	0.530	0.534
郑州	4920	34.72	363.00	284.35	3.7	409	353	0.542	0.558
玉树	6094	33.00	363.00	284.35	3.5	542	490	0.409	0.402
上海	4616	31.03	417.45	308.55	3.3	422	347	0.590	0.607
南昌	4648	28.68	490.05	326.70	3.2	487	366	0.584	0.603
昆明	5417	25.02	484.00	350.90	3.0	583	485	0.483	0.482
汕头	5078	23.40	544.50	350.90	2.9	587	429	0.531	0.546
广州	4362	23.13	544.50	350.90	2.9	498	357	0.627	0.655

注：采用平单轴支架的光伏发电系统的年均发电量考虑为有逆跟踪技术时的发电量

光照资源条件均不同，但平单轴支架的东西向间距按照无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡取值时，光伏发电系统的度电成本普遍比采用固定支架时的高，只有玉树和昆明两地例外。这说明，按照此种间距排布，平单轴支架并不适合屋顶分布式光伏项目。

3 平单轴支架东西向间距按经济值排布的经济性分析

3.1 平单轴支架东西向间距经济值选取分析

由于屋顶分布式光伏项目中的屋顶大多为租赁模式且租金较高，因此屋顶分布式光伏项目若采用平单轴支架，其装机容量会减少，相应地每瓦租金成本会大幅增加，导致采用此种支架的光伏发电系统的度电成本会比采用固定支架时的高。

考虑到现在平单轴支架均具有逆跟踪技术，若将平单轴支架的东西向间距适当减小，虽然此时，每瓦发电量会比东西向间距按无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡时的发电量小，但系统的装机容量会增加。针对是否存在东西向间距的选取使度电成本最小的问题，本文选取了天津、潍坊、上海、广州 4 个地区，采用平单轴支

架，其东西向间距排布取值从无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡时的间距取值开始，逐次减少 0.1 m，分别计算出不同间距取值时屋顶光伏发电系统的装机容量和年均发电量；然后利用式 (1) 计算出各自的度电成本，并绘制出各地区平单轴支架东西向间距逐渐减少时度电成本的变化曲线，如图 1 ~ 图 4 所示。

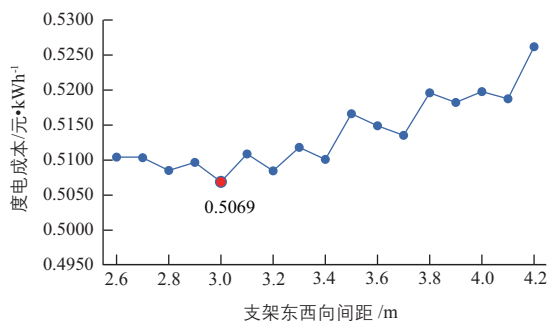


图1 天津地区的度电成本与支架东西向间距的关系

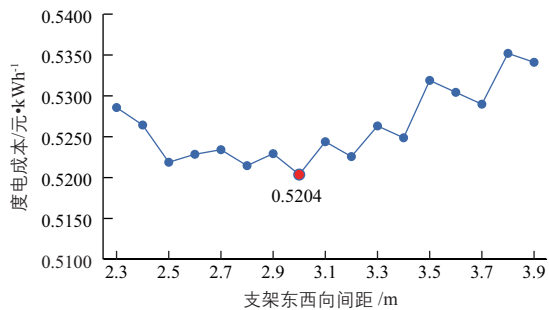


图2 潍坊地区的度电成本与支架东西向间距的关系

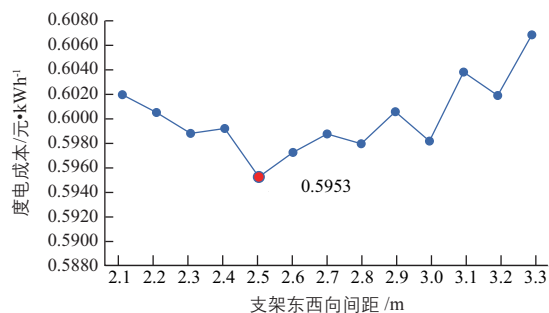


图 3 上海地区的度电成本与支架东西向间距的关系

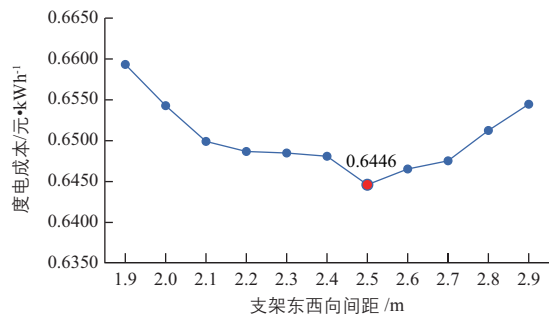


图 4 广州地区的度电成本与支架东西向间距的关系

由图 1~图 4 可以看出, 屋顶分布式光伏项目采用平单轴支架时, 光伏方阵东西向间距存在一个使度电成本最小的值, 此值即为平单轴支架应用于屋顶分布式光伏项目时的最佳间距, 用 L_c 表示, 其对应的最小度电成本用 $LCOE_{\min}$ 表示。

3.2 $LCOE_{\min}$ 的计算分析

表 3 对 11 个地区的屋顶分布式光伏项目采用平单轴支架按 L_c 排布时的 $LCOE_{\min}$ 与采用固定支架按同样间距排布时的 $LCOE$ 进行了比较。

由表 3 可以看出, 在这 11 个地区中, 采用平单轴支架时, 大部分高纬度 (34° 以上)、中纬度 ($25^\circ \sim 34^\circ$) 地区的 L_c 为 3 m, 大部分低纬度 (25° 以下) 地区的 L_c 值为 2.5 m。在高纬度地区, $LCOE_{\min} < LCOE$; 而在中、低纬度地区, $LCOE_{\min}$ 普遍大于 $LCOE$ 。由此说明, 大部分高纬度地区的屋顶分布式光伏项目适合采用平单轴支架, 而大部分中、低纬度地区不适合。

在实际应用中, 平单轴支架的东西向间距会比 L_c 小, 光伏发电系统的装机容量增大, 则光伏发电系统的每瓦初始投资成本会相应减小, 而且光伏汇集站中二次站、接入柜等设备也会均摊成本, 成本会有所降低, 因此光伏发电系统的 $LCOE_{\min}$ 实际值会更小。

表 3 $LCOE_{\min}$ 计算对比表

地区	纬度 / (°)	L_c /m	$LCOE$ (固定支架) / 元 · kWh ⁻¹	$LCOE_{\min}$ (平单轴支架) / 元 · kWh ⁻¹	$LCOE_{\min}$ 比 $LCOE$ 减少的百分比 / %
长春	43.82	3.0	0.5091	0.4922	3.32
天津	39.09	3.0	0.5147	0.5069	1.52
石嘴山	38.98	3.2	0.4119	0.4056	1.53
潍坊	36.70	3.0	0.5297	0.5204	1.76
郑州	34.72	3.0	0.5415	0.5484	-1.27
玉树	33.00	3.2	0.4085	0.3979	2.59
上海	31.03	2.5	0.5897	0.5953	-0.95
南昌	28.68	2.5	0.5844	0.5958	-1.95
昆明	25.02	3.0	0.4832	0.4823	0.19
汕头	23.40	2.5	0.5313	0.5430	-2.20
广州	23.13	2.5	0.6265	0.6446	-2.89

4 结论

本文对平单轴支架应用于屋顶分布式光伏项目的经济可行性进行了分析, 选取了不同纬度的

11 个地区的屋顶分布式光伏项目, 根据度电成本模型对采用固定支架和平单轴支架 2 种排布方式时系统的 $LCOE$ 进行了对比分析, 得出了 (转第 79 页)

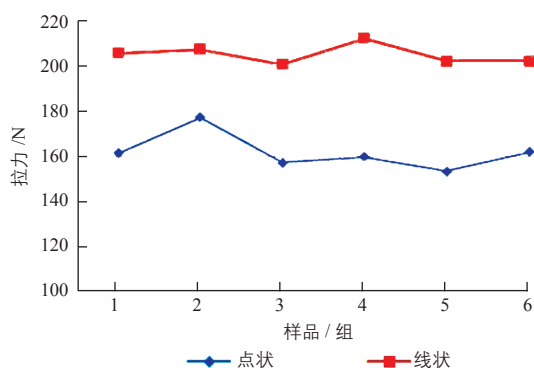
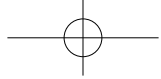


图5 采用不同胶条形状的导电胶连接的太阳电池之间的拉力测试结果

对于同一种导电胶来说,线状导电胶胶条所产生的粘接效果优于点状导电胶胶条。因此,在生产中可调节设备参数,使导电胶胶条呈线状,以提高太阳电池之间的粘接效果。

3 结论与展望

本文研究了导电胶体系和胶条形状对太阳电池之间粘接强度的影响。结果表明,不同导电胶体系对电池之间的粘接强度影响较大,采用丙烯

酸体系导电胶连接的电池间的粘接强度优于采用有机硅体系导电胶。此外,导电胶胶条形状可通过调节设备参数来调整,对同一种导电胶而言,不同胶条形状所产生的粘接强度也各不相同,线状导电胶胶条的粘接强度优于点状导电胶胶条。以上结论对于光伏组件生产过程中导电胶的选型和设备参数调节具有一定的指导意义,可推动导电胶在光伏组件领域的发展。

参考文献

- [1] 刘斌蓉. 太阳能光伏发电 [J]. 阳光能源, 2004, 28(2): 43.
- [2] 陆维德. 太阳能利用技术发展趋势评述 [J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(1): 95 - 99.
- [3] 焦富强. 导电胶接在光伏组件加工中的应用研究 [J]. 太阳能, 2017, (1): 38 - 40.
- [4] 苏辉煌, 钟新辉, 詹国柱, 等. 导电胶的研究进展 [J]. 粘接, 2008, 29(6): 28 - 33.
- [5] 章炜, 姚建吉, 詹科, 等. 导电胶研究进展 [J]. 科技导报, 2018, 36(10): 56 - 65.
- [6] 刘峰, 张俊, 李承辉, 等. 光伏组件封装材料进展 [J]. 无机化学学报, 2012, 28(3): 429 - 436.
- [7] 刘桂雄, 何建林, 余荣斌. 光伏组件可靠性评估的研究现状与思考 [J]. 现代制造工程, 2014, (12): 123 - 126. 太阳能

(接第76页)

以下结论:

1) 当平单轴支架的东西向间距采取无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡时的间距, 11 个地区中, 除了玉树和昆明两地以外, 其他大部分地区采用平单轴支架光伏发电系统的 $LCOE$ 比采用固定支架的都高。因此, 从经济性角度来说, 在这种间距排布方案下, 平单轴支架不适合应用于屋顶分布式光伏项目。

2) 当平单轴支架的东西向间距取值从无逆跟踪技术且全年 09:00 ~ 15:00 无阴影遮挡时的值逐渐减少时, 存在一个最佳间距值, 该值对应最低度电成本 $LCOE_{min}$ 。在大部分高纬度 (34° 以上) 地区, 此 $LCOE_{min}$ 值比采用固定支架的 $LCOE$ 低; 而在大部分中纬度 ($25^\circ \sim 34^\circ$)、低纬度 (25° 以下) 地区, 此 $LCOE_{min}$ 值比采用固定支架的 $LCOE$ 高。这说明, 从经济性角度看, 在大部分高纬度地区,

屋顶分布式光伏项目应用平单轴支架可降低度电成本, 提高经济收益; 而在大部分中、低纬度地区, 平单轴支架不适合应用于屋顶分布式光伏项目。

3) 大部分高、中纬度地区的平单轴支架的东西向最佳间距值 L_c 为 3 m, 而大部分低纬度地区的 L_c 为 2.5 m。

参考文献

- [1] 王海波. 光伏发电系统增加单轴跟踪装置的经济性分析 [J]. 能源工程, 2012, (4): 62 - 65.
- [2] 王雪青, 许远明, 张士廉, 等. 建设工程经济 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] 谢磊, 武浩, 万宏, 等. 平单轴跟踪光伏发电系统容量配比研究 [J]. 太阳能, 2017, (12): 30 - 36.
- [4] 何银涛, 张梅, 黄华. 光伏发电跟踪支架阴影数学模型研究 [J]. 太阳能, 2015, (3): 32 - 35.
- [5] 王士涛, 刘益松, 李彩霞. 逆跟踪技术在平单轴跟踪器上的应用 [A]. 第 15 届中国光伏大会 (CPVC15) 论文集 [C]. 北京, 2015: 154.
- [6] 陈祥. 光伏电站发电量的理论计算及差异分析 [J]. 太阳能, 2011, (1): 39 - 41. 太阳能