

新型双轴跟踪光伏发电技术

张兴¹, 贺广零², 王启志¹, 胡畅¹, 杜波¹

(1. 东方电气集团国际合作有限公司, 成都 611731; 2. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: [目的]为了克服传统光伏发电能源利用率低、经济性差的问题,特别是水面光伏固定困难,需探索一种新型的双轴跟踪光伏发电技术。[方法]新型地面和水面双轴跟踪光伏发电技术,在类似于塔吊的钢桁架构成的、以固定圆心做极其缓慢转动的大圆盘上布置单轴光伏阵列。从光伏阵列布置入手,分析了新型双轴跟踪在土地资源占用和能源利用率的特点,进而对该新型系统较传统光伏发电系统的发电量增加和成本增量作技术经济性分析。[结果]新型双轴跟踪技术节约土地资料,为传统双轴跟踪式占地面积50%左右,提高单位面积能源利用率。增加发电量,双轴跟踪式相较于固定式增加35%~45%,水面光伏再增加6%~15%。电能输出更加平稳,双轴跟踪式光伏发电很快进入平稳期,电能输出更加平稳。提高了经济性,新型双轴跟踪,所有光伏板同步转动,只需要一个方位角和一个高度角检测装置,方位角跟踪也只需要一套驱动装置;高度角跟踪可以分区域集中供电驱动,相对节省成本。技术经济指标更优,特别是相较于传统水面光伏有明显改善。运营维护方便,采用龙门吊门型架结构,在等间距的钢桁架上前后、左右、上下移动方便进行检修和清洗。[结论]提出的新型双轴跟踪系统在经济性、电源输出平稳性和运维简易性上有巨大优势,通过分析对比可以看出该系统具有很强的推广前景。

关键词: 光伏发电; 新型双轴跟踪; 技术经济指标

中图分类号: TK519; TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0019-10

New Model of Dual-axis Tracking Photovoltaic Power Generation Technology

ZHANG Xing¹, HE Guangling², WANG Qizhi¹, HU Chang¹, DU Bo¹

(1. Dongfang Electric International Cooperation, Chengdu 611731, China;

2. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: [Introduction] To develop the technical and economical efficiency of traditional photovoltaic (PV) power generation, new type dual-axis tracking PV power generation technology is proposed, that focuses on the solution to the fixed PV on water surface. [Method] A new type of ground and water-based dual-axis tracking PV power generation technology was provided, where single-axis PV arrays were arranged on a large disc supported by trusswork structure, and rotated very slowly with a fixed center. Based on the layout of PV array, the land and energy utilization of this new system were analyzed. Moreover, compared with the traditional PV, the technical and economic analysis, which indicated the increasing of power generation and cost of the new system, was achieved. [Result] The new dual-axis tracking system conserve land, which would only cover about 50% of the area for the traditional dual-axis tracking technology. The proposal system increases power generation. The dual-axis tracking type system increases by 35%~45% compared with the fixed PV system. The water surface PV will increase by another 6%~15%. Stable period of power generation could be achieved fastly. Only one azimuth and altitude angle detection device are needed for new dual-axis tracking system. One driven device could satisfy the azimuth angle tracking and altitude angle tracking system could be driven by centralized power supply in different regions. The technical and economic indicators are better, especially compared with the traditional water surface PV system. Easy operation and maintenance could be available. Gantry crane frame structure is adopted, and it is convenient to repair and clean the steel truss with equal spacing moving forward, backward, left and right, up and down. [Conclusion] The new dual-axis tracking system is more economical, power generation more stable and more convenient maintenance, which could have popularization prospect.

Key words: PV power plant; new model of dual-axis tracking solution; technical and economic indicators

能源是国民经济建设和社会发展以及人民生活的重要物质基础。随着我国经济的快速发展,能源供应结构与经济社会发展矛盾十分突出。为了加快能源结构调整,减少煤炭等化石能源消耗对环境产生的污染,为减少对一次能源的依赖,保护人类的生存环境,我国政府已向世界庄严承诺,走可持续发展道路,明确经济的发展不应以牺牲后代生存环境、经济资源为代价,并研究、制定和开始执行经济、社会和资源相互协调的21世纪可持续发展战略。国家因此出台了一系列制度和措施,鼓励可再生能源产业发展,支持可再生能源发电并网。光伏发电产业因此蓬勃发展。

但2017年底,国家新能源补贴缺口超过1100亿元,新能源补贴实行退坡机制,以平价上网为最终目标,光伏发电行业面临诸多挑战,目前主要问题有:土地资源占用大;能源利用率低;经济性越来越差。

新型双轴跟踪解决了上述问题,且新型双轴跟踪就是把传统平单轴安放钢结构转盘上作缓慢转动,技术上非常成熟。目前钢结构的结构形式和钢结构用量已经过初步验算,但仍需对包括钢结构和基础环在内的成本增量和发电量增量,在具体项目上根据现场条件进行进一步验证。

1 新型地面和水面双轴跟踪技术

1.1 双轴跟踪和水面光伏增加发电量

1.1.1 双轴跟踪增加发电量

光伏发电与太阳入射角有很大关系,传统的固定式安装太阳能电池板,即电池板固定在某个角度,不随太阳的位置变化而变化。严重影响光电转化效率,据推算:如果光伏系统与太阳光线角度存在 25° 偏差,就会因垂直入射的辐射能减少而使光伏阵列输出功率下降10%左右^[1]。当光伏电池板工作在入射角为 0° 时的发电量是最大的^[2]。

$$\frac{dP}{di} = \frac{0.31 \times 0.029 \times 26}{800} \left(T_a + \frac{26}{800} G_c \cos i \right)^{-1.029} \cdot G_c \sin i - 0.98 G_c \sin i \quad (1)$$

2007-11-19 西藏拉萨两种系统输出功率对比,固定式系统与双轴跟踪系统的发电量分别为17.6 kWh和26.9 kWh。与固定式系统相比,双轴跟踪系统的发电量分别提高了52.8%^[3],如图1所示。

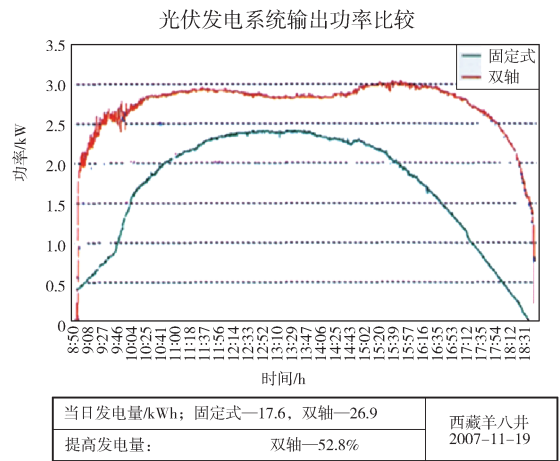


图1 2007-11-19 西藏拉萨两种跟踪系统输出功率对比

Fig. 1 Two tracking systems in lhasa, Tibet, on Nov. 19, 2007 output power rate comparison

内蒙古赤峰家庭安装的6 kW东西向轴跟踪支架实时发电量和10 kW固定支架某单日发电量,可以看出:东西向轴跟踪较固定式安装提高发电量的比例为: $(50.6 - 58.5 \times 0.6) / (58.5 \times 0.6) = 44.16\%$ (无遮挡,如图2所示)。双轴跟踪式提高发电量会更多。

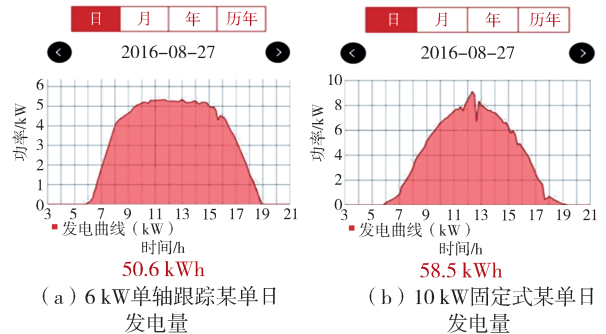


图2 跟踪式和固定式实测数据对比图

Fig. 2 Measured data comparison chart between tracking & fixed model

通常情况下双轴跟踪光伏较固定式光伏发电量增加35%~45%^[4],最高达到55%^[5];李卫军,冯春祥等实测数据为双轴跟踪光伏发电系统能够比固定式光伏发电系统提高发电量40%左右^[3];上海电气电站集团谢文韬先生5路20 kW左右的双轴跟踪式的测量数据平均提高31.16%^[2];卢育发等的研究结论为:双轴跟踪装置能使太阳光垂直照射在光伏组件上,光伏组件接收太阳辐射的效率能提高约39.7%^[6]。

1.1.2 双轴跟踪总体输出电能更加平稳

光伏电站设计标准要求:冬至当天早9:00至下午3:00光伏组件阵列不应被遮挡。在这个时间段内,从图1、图2实测数据来看,跟踪式光伏电站输出电能更加平稳,明显好于固定式光伏电站。

1.1.3 水面光伏增加发电量

光伏组件的发电量与其自身温度有关。温度的变化会显著改变太阳能电池的输出性能,当温度升高,载流子的扩散系数随温度的升高而稍有增大,光生电流也随温度的升高有所增加。但输出电流随温度的升高呈指数增大,因而输出电压随温度的升高急剧下降,从而引起光电转换效率下降。

典型功率温度系数为 $-0.35\%/^{\circ}\text{C}$ 左右,即太阳能电池温度每升高 1° ,功率减少 0.35% ^[7]。

水体对光伏组件有冷却效应,可以抑制组件表面温度上升,从而提高了发电量。

根据国内外的水上、陆地光伏电站对比实验结果,水上光伏发电量可以增加 $7\% \sim 12\%$ ^[8]。日本兵库县 40 kW 平面大型水面光伏电站运行记录数据提高发电量是 14% ^[9]。

鉴于双轴跟踪增加发电量,水面光伏的降温作用进一步提高发电量,特提出新型双轴跟踪光伏发电方案。

1.2 新型地面双轴跟踪技术

新型地面双轴跟踪技术,采用钢桁架的网状钢结构,在网状钢桁架的中间设置钢圆环,钢环内侧用滚轮使其能沿水平方向绕钢筋混凝土结构滚动,从而固定网状钢结构圆心,每间隔一定距离浇筑钢筋混凝土环形基础,在网状钢结构下面均匀设置滚轮,并在靠近外环的环形基础环上均匀设置驱动装置(电动机带动滚轮或者蜗轮蜗杆),使网状钢结构整体作极其缓慢地水平转动(每小时转动 15°),实现对太阳方位角的跟踪;在网状钢结构上安装平单轴光伏发电阵列(在垂直于光伏板的大圆盘直径处留一条主要通道,也可以安放变压器、逆变器和开关柜等设备,水面与此相同布置),进行太阳高度角跟踪,从而实现双轴跟踪(最好使用变频器驱动,可以实现方位角和高度角的匀速跟踪^[10-11],如图3所示)。

1.3 新型水面双轴跟踪技术

新型水面双轴跟踪技术,采用漂浮式光伏跟踪装置,包括设置在水上的浮筒,在浮筒上放置类似

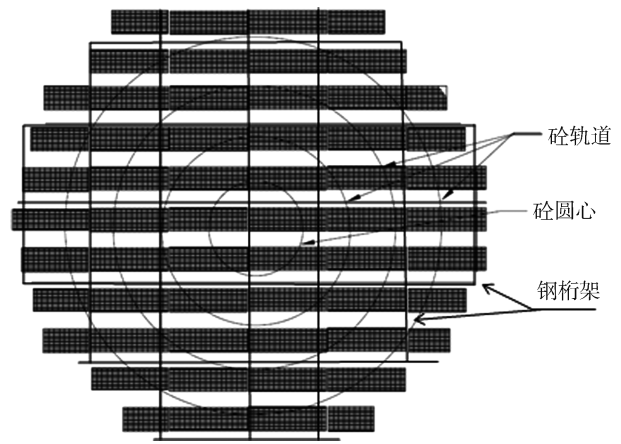


图3 新型地面双轴跟踪技术图

Fig. 3 New ground dual-axis tracking solution diagram

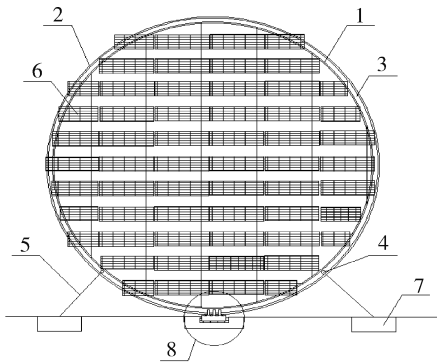
于塔吊钢桁架的网状钢结构,钢结构的外缘设置内环、外环以及内环与外环之间通过环形的板体固定连接,内环与外环同心。外环、内环、内外环间的板体、钢桁架组成的网状钢结构以及浮筒构成整个漂浮体。外环与驱动机构相连,驱动机构用于驱动外环转动。驱动机构设置在堤岸侧壁的凹槽内可以随水位上下移动的钢结构上,或者设置在岸边一端既可以牵引又可以顶置的,并且还能安装平单轴光伏板的钢结构上。安装驱动机构的钢结构两端均设置滚轮,与岸边连接的一端设置可以沿垂直方向滚动的滚轮,与大圆外沿连接的一端设置可以沿水平方向左右滚动的滚轮。

在驱动装置左右两侧分别在外环上套设 N 个连接件,连接件上内外侧均设置滚轮,滚轮分别在外环朝向内环的一侧表面滚动和在外环朝向外环的一侧表面滚动,连接件与岸边通过钢索连接,或者如前所述的既可以牵引又可以顶置的钢结构连接。钢索或者钢结构与岸边连接的一端均可以沿垂直方向随水位上下滚动。

在整个漂浮体上安装平单轴光伏板,进行太阳高度角跟踪,同时整个漂浮体又在驱动装置的驱动下作太阳方位角跟踪,从而实现双轴跟踪(最好使用变频器驱动,可以实现方位角和高度角的匀速跟踪^[10-11],如图4所示)。

制作了一个简单的模型(为钢索牵引方式,未安装驱动,但可以手动转动,如图5所示)。

另外作了一个三维动画(如图6所示),均显示方案可行。



注: 1-内环; 2-外环; 3-板体; 4-连接件; 5-钢索;
6-光伏板; 7-连接装置; 8-驱动装置。

图4 新型水面双轴跟踪技术

Fig. 4 New water surface dual-axis tracking solution diagram

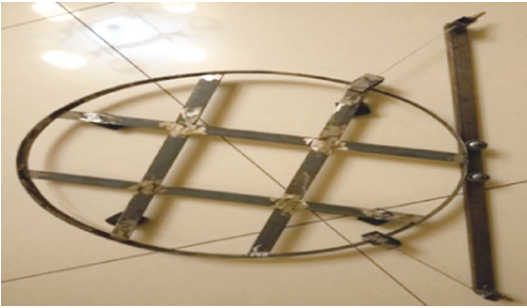


图5 新型水面双轴跟踪模型

Fig. 5 New water surface dual axis tracking model

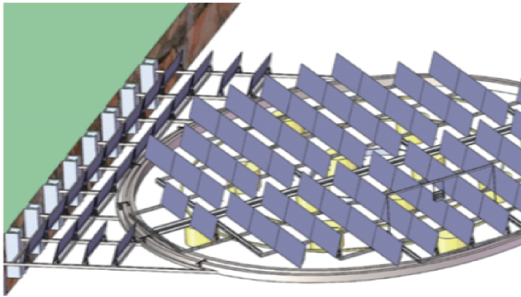


图6 新型水面双轴跟踪动画截图

Fig. 6 New water surface dual axis tracking animation screenshot

新型地面和水面双轴跟踪式, 由于方位角只需要一个太阳光跟踪检测装置和一个跟踪驱动装置; 高度角跟踪理论上也只需要一个太阳光跟踪检测装置, 考虑到驱动功率很大且有风浪扰动, 可以分若干区域, 采用功率器件给区域并联供电带动电动推杆。从而减少驱动装置和动力电缆, 大大减少控制器件和控制电缆, 从而节约成本。

特别是, 对于新型水面双轴跟踪, 土建施工可以采用岸边回填最后清除方式, 基本现在在陆地上施工, 缩短建设工期, 降低工程成本, 同时克服了中小型水体不能采用打桩船或者重物抛投来固定圆

心等施工难题。

2 光伏阵列布置

2.1 太阳光线角度计算

2.1.1 太阳赤纬角、时角的计算

光伏电站的布置受地理位置即项目所在地的经纬度影响, 也受赤纬角和时角的影响。

1) 太阳赤纬角计算

太阳光线与地球赤道面的交角就是太阳的赤纬角, 是反映地球绕太阳公转规律的角度变量, 以 δ 表示。在一年当中, 太阳赤纬每天都在变化, 但不超过 $\pm 23.45^\circ$ 的范围。夏天最大变化到夏至日的 $+23.45^\circ$; 冬天最小变化到冬至日的 -23.45° , 太阳赤纬随季节变化, 按照库珀 (Cooper) 方程:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

式中: n 为1月1日开始的天数, 1月1日, $n=1$, 以此类推。根据此公式, 可以计算得到一年各天的太阳赤纬角^[12]。

2) 太阳的时角计算

太阳时角用 ω 表示, 他定义为正午时 $\omega=0$, 每隔一小时增减 15° , 上午为负, 下午为正, 例如上午9点为 $-15^\circ \times 3 = -45^\circ$, 下午3点为 $15^\circ \times 3 = 45^\circ$ 。

2.1.2 太阳高度角、方位角计算

太阳高度角、方位角计算公式如下:

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \quad (2)$$

$$\sin\beta = \cos\delta\sin\omega/\cos\alpha \quad (3)$$

式中: α , β 分别为高度角和方位角 ($^\circ$); φ 为当地纬度 ($^\circ$); δ 为太阳赤纬, 冬至日的太阳赤纬为 -23.45° ; ω 为时角, 上午9:00的时角为 -45° ^[12]。

根据地理纬度、太阳赤纬及观测时间, 可以求出某地区、某天某一时刻的太阳高度角和方位角。

2.2 光伏阵列计算

某地区、某天某一时刻的太阳高度角和方位角, 为太阳光的固有特性, 不随光伏阵列的安装方式改变。

光伏电站总平面布置与光伏电站所处地理位置的纬度、布置方式及是否采用跟踪装置密不可分。

1) 对于固定式电池板阵列前后间距^[4]如图7所示。电池板的长度为 Y , 电池板的安装倾角为 Z , 电池板顶端的垂直投影点到后排电池板的底端间距为 D 。

$$D = \frac{\cos \beta \times H}{\tan[\arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)]} \quad (4)$$

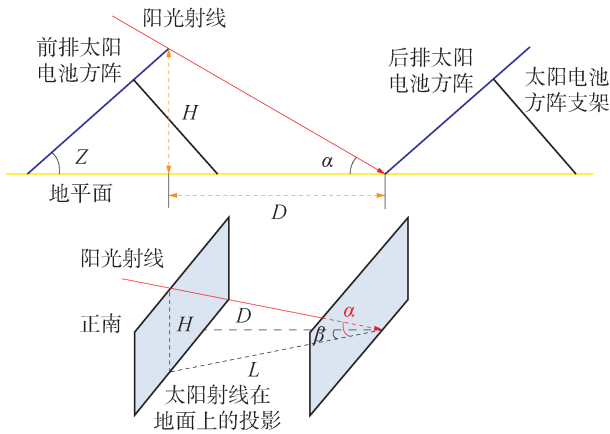


图 7 固定式电池板阵列布置间距
Fig. 7 Fixed panel array spacing

电池板阵列前后排间距, 国标要求冬至当天 9:00~15:00 太阳能电池方阵不应被遮挡。光伏阵列阵列间距应不小于 X。

$$X = Y \cos Z + D \quad (5)$$

2) 对于新型双轴跟踪式电池板阵列前后间距示意如图 8 所示。

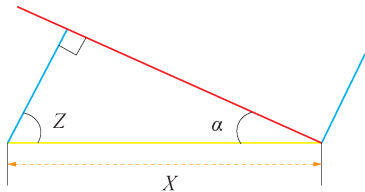


图 8 双轴跟踪式电池板阵列布置间距

Fig. 8 Two-axis tracking type battery array arrangement spacing

由于新型双轴跟踪, 太阳光最佳入射角度为与电池板垂直, 因此电池板的间距为:

$$X = Y / \cos Z \quad (6)$$

2.3 光伏阵列布置

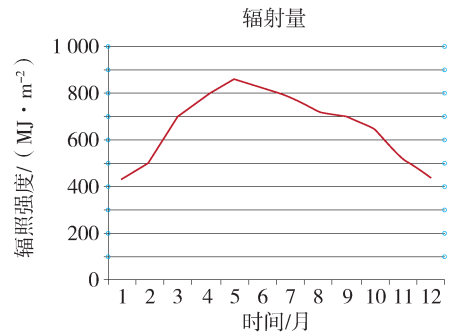
2.3.1 辐射量影响光伏阵列间距的选择

西藏自治区阿里地区措勒县^[7]如图 9 所示。

从统计分析, 太阳能月总辐射量在冬至日的前后 2 个月内是最低的, 新型双轴跟踪考虑冬至日前后一段时间内上午 9 点不垂直跟踪, 适当减小间距, 但要牺牲一定的发电量。

2.3.2 光伏阵列极限倾角的确定

以转换率 19.6% 光伏组件, 选定不同极限倾角



注: — 辐射量。

图 9 水平面太阳能月总辐射量折线图

Fig. 9 Line chart of horizontal solar monthly radiation

时占地面积如表 1 所示。

表 1 设定不同极限倾角时垂直入射前后排间距和占地面积
Tab. 1 Front and rear row spacing and floor space when vertical injection from different limit inclination angles

倾角/(°)	60	61	62	63	64	65
间距/m	6.00	6.19	6.39	6.61	6.84	7.10
占地/hm ²	10.4	10.7	11.0	11.4	11.8	12.2
倾角/(°)	66	67	68	69	70	—
间距/m	7.38	7.68	8.01	8.37	8.77	—
占地/hm ²	12.70	13.20	13.70	14.30	15.10	—

从表 1 中可以看出, 极限倾角的选定对占地面积有重大影响。

2.3.3 地理纬度、照射时点对光伏阵列布置影响

1) 地理纬度对光伏阵列布置的影响

以转换率 16% 的光伏组件为例, 不同形式、不同纬度下, 10 MW 光伏方阵占地面积^[13]如表 2 所示。

表 2 不同安装方式下 10 MW 光伏阵列占地面积理论测算值
Tab. 2 Theoretical floor space calculation for 10 MW PV array by different installation hm²

纬度/(°)	固定式	平单轴	斜单轴	双轴
18	9.0	11.2	13.8	15.0
20	9.4	11.5	14.6	15.9
25	10.6	12.4	17.1	18.7
30	12.3	13.5	20.9	22.8
35	14.7	15.3	26.8	29.2
40	18.5	19.3	36.8	40.1
45	25.2	26.2	56.5	61.6
50	39.8	41.4	106.2	115.7

2) 冬至日, 地理纬度、时点对光伏阵列布置的影响地理纬度和垂直入射时点的选择对光伏阵列布置影响很大, 如表 3 所示。

表3 地理纬度、时点对光伏阵列布置的影响

Tab. 3 The influence to photovoltaic array layout by geographical latitude and time

项目	纬度 30.00°	纬度 31.00°	纬度 32.00°	纬度 33.00°	纬度 34.00°	纬度 35.00°	纬度 36.00°	纬度 37.00°	纬度 38.00°	纬度 39.00°	纬度 40.00°
高度角/(°)(9点)	21.28	20.56	19.84	19.11	17.65	17.65	16.92	16.18	15.44	14.70	13.96
方位角/(°)(9点)	-44.12	-43.86	-43.60	-43.36	-42.90	-42.90	-42.69	-42.49	-42.30	-42.12	-41.95
垂直入射间距/m(9点)	8.27	8.54	8.84	9.16	9.89	9.89	10.31	10.77	11.27	11.82	12.44
高度角/(°)(10点)	29.28	28.43	27.58	26.72	25.86	25.00	24.14	23.27	22.40	21.54	20.67
方位角/(°)(10点)	-31.73	-31.44	-31.17	-30.90	-30.65	-30.41	-30.18	-29.96	-29.75	-29.55	-29.36
垂直入射间距/m(10点)	6.13	6.30	6.48	6.67	6.88	7.10	7.34	7.59	7.87	8.17	8.50
高度角/(°)(11点)	34.65	33.69	32.73	31.77	30.81	29.85	28.89	27.92	26.96	26.00	25.03
方位角/(°)(11点)	-16.78	-16.58	-16.40	-16.22	-16.05	-15.89	-15.74	-15.59	-15.45	-15.32	-15.19
垂直入射间距/m(11点)	5.28	5.41	5.55	5.70	5.86	6.03	6.21	6.41	6.62	6.84	7.09
高度角/(°)(12点)	36.56	35.56	34.56	33.56	32.56	31.56	30.56	29.56	28.56	27.56	26.56
方位角/(°)(12点)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
垂直入射间距/m(12点)	5.04	5.16	5.29	5.43	5.58	5.73	5.90	6.08	6.28	6.48	6.71

2.3.4 冬至日9点20分垂直跟踪光伏阵列布置

冬至日9点20分的垂直跟踪的间距进行排布,大约上午,下午各有20分钟,经过折算,发电量折减按1%计算^[14]。按此排列其对应的参数如表4所示。

表4 冬至日9点20分垂直跟踪光伏阵列布置参数

Tab. 4 Vertical tracking of PV array layout parameters at 9: 20 on winter solstice

9: 20 垂直入射光伏阵列布置参数				
纬度/ (°)	间距/ m	大圆半径/ m	占地面积/ m ²	钢结构重量/ t
10	4.815	161.2	81 636	408.18
11	4.886	162.4	82 856	414.28
12	4.961	163.8	84 290	421.45
13	5.040	165.1	85 634	428.17
14	5.122	166.3	86 883	434.41
15	5.209	167.7	88 352	441.76
16	5.301	169.4	90 152	450.76
17	5.398	170.8	91 649	458.24
18	5.500	172.3	93 265	466.33
19	5.608	174.1	95 224	476.12
20	5.721	175.9	97 203	486.02
21	5.842	177.6	99 091	495.46
22	5.969	179.6	101 336	506.68
23	6.104	181.7	103 719	518.60
24	6.247	183.7	106 015	530.08
25	6.400	186.0	108 687	543.43
26	6.561	188.3	111 391	556.96
27	6.733	190.7	114 249	571.24
28	6.916	193.6	117 750	588.75

表4(续) 冬至日9点20分垂直跟踪光伏阵列布置参数
Tab. 4(Cont.) Vertical tracking of PV array layout parameters at 9: 20 on winter solstice

9: 20 垂直入射光伏阵列布置参数				
纬度/ (°)	间距/ m	大圆半径/ m	占地面积/ m ²	钢结构重量/ t
29	7.112	196.0	120 687	603.44
30	7.322	198.9	124 285	621.43
31	7.547	202.1	128 316	641.58
32	7.789	205.1	132 154	660.77
33	8.049	208.8	136 965	684.83
34	8.239	212.1	141 329	706.64
35	8.633	216.1	146 710	733.55
36	8.963	220.0	152 053	760.27
37	9.321	224.4	158 196	790.98
38	9.713	229.1	164 892	824.46
39	10.142	234.1	172 168	860.84
40	10.614	239.4	180 052	900.26

注: (1)光伏板按照3m布置; (2)钢结构的量按照5kg/m²考虑; (3)下午情况与上午一致; (4)实际应用中,通常使平单轴极限倾角限定在60°~65°间,占地面积和用钢量会适当减少。

光伏阵列的具体布置直接影响土地使用面积、发电量、建设成本和运行维护等方方面面。从以上分析可以看出,地理纬度对光伏阵列的布置影响最大。在光伏阵列的布置上可以根据太阳能辐射的周期性特点,考虑部分时段不垂直跟踪,适当减小极限倾角,缩小前后排间的间距,从而节约土地资源、同时也节省成本,但必须牺牲一定的发电量。具体项目要根据具体情况作价值分析,找到最佳阵

列布置方案。

3 新型双轴跟踪技术成本增量和经济性分析

3.1 新型双轴跟踪系统成本增加情况

由于新型双轴跟踪,所有光伏板同步转动,理论上只需要一个方位角和一个高度角检测装置,方位角跟踪也只需要一套驱动装置;高度角跟踪可以分区域集中供电驱动,相对节省成本。

根据目前市场中标情况,光伏电站总投资普遍在4.0元/W左右,为便于分析和比较,所有技术经济分析均按10MW来折算,即10MW地面光伏4000万元。在上网电价0.88元/kWh,发电小时数为1200h,如果初始投资小于2.59元/W;在发电小时数为1400h,如果初始投资小于3.02元/W^[12],则传统地面双轴跟踪式较地面固定式经济性好。中信博认为:“双轴虽然发电效率提升40%,但其支架成本达到3~4元/W,土地资源占有量是固定支架的两三倍^[15]”。因此,传统地面双轴跟踪式在多数情况下,经济性不是很理想。在此,仅以地面固定式为基础作比较。成本增加情况分析(如表5所示)。

表5 新型双轴跟踪系统增加成本

Tab. 5 Increased cost for new dual axis tracking system 万元

水面系统		地面系统	
项目	金额	项目	金额
浮筒	1300	转动机构	50
钢结构及避雷针	1100	钢结构	590
岸上土建	100	土建增加	350
双轴跟踪电缆增加	100	双轴跟踪电缆增加	100
平单轴及电缆支架增加	300	平单轴及电缆 支架增加	300
控制系统增加	20	控制系统增加	20
防潮防腐等级增加	100	—	—
牵引及顶置驱动机构	300	—	—
阴极保护及漏电保护	70	—	—
围护减少	-50	—	—
桩、基础及接地	-400	—	—
接地减少	-50	—	—
合计	2890	—	1410

注:(1)按纬度35°考虑,此时间距8.633m,水面和地面分别约为1100t和733t。但是通常设定极限倾角为60~65°,间距将减小,用钢量会减少;(2)水面钢结构单价1.0万元/t,地面0.8万元/t;(3)纬度越低,占地面积越小,大圆盘钢结构的重量越小,成本也相应减少,经济性趋好。

3.2 技术经济分析对比

3.2.1 经营成本分析

按目前国家税收政策,增值税16%,前三年减半征收;所得税25%,前三年免征,第四到第六年减半征收;按平均年限法折旧,期限为25年;残值按照10%,70%贷款(贷款比例对度电成本影响很大^[16],应尽可能降低贷款比例),15年,年利率5%考虑;全国土地租赁费用差异很大,而且对经济指标影响很大,现暂按0.75万元/hm²考虑,水面光伏仅考虑控制室和升压站土地租赁费,水面租赁费在渔业中考虑。经营成本(如果规模扩大,可以较大幅度降低单位经营费用,经济性会更好),如表6所示。

表6 经营成本

Tab. 6 Operation cost

万元

项目	固定式	新型双轴 (地面)	新型双轴 (水面)	备注
土地租赁	9.25	9.25	0.25	0.75万元/hm ²
维修费	60.00	81.15	103.35	1.5%
职工薪酬、福利、社保	20.00	30.00	30.00	20万/(人·年)
财产保险	8.00	10.82	13.78	2.0‰
材料费	5.00	5.00	5.00	5元/kW
其它费用	5.00	5.00	5.00	5元/kW
合计	107.25	141.22	157.38	—

3.2.2 经济性分析对比

在光伏阵列布置上,根据不同地理纬度要在发电量、土地占用及投资方面作适当的取舍。

如前所述,水面光伏较地面光伏发电量增加7%~12%^[7],双轴跟踪发电量增加35%~45%^[3]。双轴跟踪增加发电量取中间值40%,按谨慎性原则取38%、37%和36%考虑。水面较地面再分别增加8%、10%和12%。折现率按8%考虑,从静态投资回收期、动态投资回收期、净现值和内部收益率等方面比较(如表7所示),新型地面双轴跟踪式较传统地面固定式有较大优势;新型水面双轴跟踪式考虑渔光互补,经济性较传统水面光伏发电经济性更好。

4 新型双轴跟踪技术的优势

国家实行新能源电价补贴的退坡机制,新能源平价上网为最终目标,光伏发电项目经济性越来越差,特别是水面光伏,目前传统的水面光伏,大多

表7 地面固定、新型地面和新型水面跟踪光伏电站经济性分析对比表

Tab. 7 Economic comparison table for ground fixed type、new ground type and water surface tracking PV power station

指标	新型水面双轴跟踪								新型地面双轴跟踪				地面固定
成本/万元	4 000 + 2 890 = 6 890								4 000 + 1 410 = 5 410				4 000
地区类别	2018年5月31日后上网电价，一类地区0.50元/度，地面固定安装式光伏发电，内蒙某项目25年平均年有效小时数为1 630 h。												
地面双轴提高效率/%	—	38	—	—	37	—	—	36	—	38	37	36	—
水面双轴提高效率/%	8	10	12	8	10	12	8	10	12	—	—	—	—
发电量提高效率/%	49.04	51.80	54.56	47.96	50.70	53.44	46.88	49.60	52.32	38	37	36	—
静态投资回收期/年	8.16	7.99	7.83	8.22	8.05	7.89	8.29	8.12	7.96	6.87	6.92	6.98	7.05
动态投资回收期/年	12.72	12.29	11.88	12.89	12.46	12.03	13.08	12.63	12.21	9.70	9.81	9.93	10.08
净现值/万元	2204.94	2374.96	2544.99	2138.41	2307.20	2475.99	2071.88	2239.44	2407.00	2954.00	2875.38	2830.80	2035.46
内部收益率(IRR)/%	12.31	12.64	12.96	12.18	12.51	12.83	12.05	12.38	12.70	15.25	15.08	14.95	14.76
地区类别	2018年5月31日后上网电价，二类地区0.6元/度，地面固定安装式光伏发电，吉林某项目25年平均年有效小时数为1 316 h。												
地面双轴提高效率/%	—	38	—	—	37	—	—	36	—	38	37	36	—
水面双轴提高效率/%	8	10	12	8	10	12	8	10	12	—	—	—	—
发电量提高效率/%	49.04	51.80	54.56	47.96	50.70	53.44	46.88	49.60	52.32	38	37	36	—
静态投资回收期/年	9.14	8.96	8.79	9.21	9.03	8.86	9.28	9.10	8.93	7.80	7.86	7.93	8.01
动态投资回收期/年	15.10	14.58	14.09	13.39	14.79	14.29	15.55	14.99	14.49	11.60	11.74	11.89	12.09
净现值/万元	1665.87	1824.12	1982.37	1603.95	1761.05	1918.15	1542.03	1697.98	1853.93	2365.10	2307.76	2250.43	1608.72
内部收益率(IRR)/%	11.09	11.38	11.67	10.98	11.26	11.55	10.86	11.15	11.43	13.52	13.39	13.26	13.09
地区类别	2018年5月31日后上网电价，三类地区0.7元/度，地面固定安装式光伏发电，江苏某项目25年平均年有效小时数为1 180 h。												
地面双轴提高效率/%	—	38	—	—	37	—	—	36	—	38	37	36	—
水面双轴提高效率/%	8	10	12	8	10	12	8	10	12	—	—	—	—
发电量提高效率/%	49.04	51.80	54.56	47.96	50.70	53.44	46.88	49.60	52.32	38	37	36	—
静态投资回收期/年	8.70	8.53	8.37	8.77	8.60	8.44	8.84	8.67	8.50	7.42	7.48	7.54	7.62
动态投资回收期/年	13.86	13.41	12.97	14.05	13.59	13.15	14.25	13.77	13.33	10.75	10.88	11.01	11.19
净现值/万元	2059.80	2225.35	2390.89	1995.03	2159.37	2323.71	1930.25	2093.39	2256.53	2729.85	2669.87	2609.89	1873.03
内部收益率(IRR)/%	11.81	12.11	12.40	11.69	11.99	12.28	11.57	11.87	12.16	14.35	14.22	14.08	13.91

采用固定打桩式或者漂浮式，尽管水面的降温作用使发电量有所增加，但桩基长度的增加或浮筒等漂浮体使成本增加更为明显，总体经济性很差，绝大多数项目是没有投资价值的。

新型双轴跟踪式尽管增加了钢结构和电动推杆等驱动装置，新型水面双轴跟踪还要增加浮筒等漂浮体，即增加了成本，但由于发电量增加更为明显。新型地面双轴跟踪其经济性较传统地面固定式更好；新型水面双轴跟踪其经济性与传统地面固定式比较接近，具有一定投资价值。如果再采用上层光伏发电、下层水产养殖，实现渔光互补，则具有更高的投资价值。

4.1 新型地面双轴跟踪较传统地面的优势

与传统地面光伏比较，新型地面双轴跟踪光伏主要优点有：

1) 相对传统双轴跟踪节约用地：新型双轴跟踪，整个大圆盘从早到晚跟踪太阳方位角，没有左右方向投影。检修和清洗仅仅占用中间通道。中间固定圆心的区域可以建造半地室的配电室、集控室、储水箱或储气罐等。

与传统地面固定式占地面积相当，比传统地面斜单轴和双轴跟踪占地面积减少很多(如表8所示)。

表8 10 MW 光伏土地资源占用对比表

Tab. 8 Comparison table of 10 MW PV land resources

项目	固定	新型双轴 极限倾角 65°	水平单轴 10: 00	斜单轴 10: 00	传统双轴 10: 00
占地/hm ²	12.00	12.49	12.49	21.88	23.84
比例/%	—	104	104	182	199

注:其它跟踪式按照 10:00 垂直入射考虑,新型双轴跟踪式按照极限倾角 65°考虑。

传统的地面光伏电站:固定式、平单轴式、斜单轴式和双轴跟踪式,如果使用转换效率 19.6% 的光伏组件(某厂家 405 W, 2.067 × 0.998 m² 叠瓦组件为参考布置)。以地理纬度 35° 为例(我国湖泊分布广大的地区,纬度大多在 35° 以下),10 MW 土地使用面积分别为:固定式 12.0 hm²,水平单轴 12.49 hm²,斜单轴 21.88 hm²,双轴跟踪式 23.84 hm²。新型双轴跟踪极限倾角 69.67°,即间距 8.633 m 时(上午 9 点 20 分开始垂直入射)占地面积为 14.67 hm²,实际安装中一般限定极限倾角为 60°,占地面积要减小很多,如表 8 所示)。

2)提高能量利用率:由于占地面积略增,发电量增加 40% 左右,提高了单位面积能源利用效率。

3)输出电能更加平稳。

4)提高了经济性,发电量增加较成本增加更为明显,从而提高了经济性。

4.2 新型水面双轴跟踪的优势

新型水面双轴跟踪除具有传统水面光伏的优点^[8]:占用极少土地、渔光互补、消纳方便、旅游效益、避免组件遮光、减少蒸发和藻类繁殖等。还具有以下优势:

1)跟新型地面双轴跟踪一样,节约占用水面、提高能量密度、输出电能更加平稳。

2)适应性更强,避免了传统水面双轴跟踪受水体深度和水位变化的限制;克服了传统水面光伏对于中、小型水体无法采用打桩船或者船舶抛投重物或者抛锚等形式来固定圆心。

3)缩短建设工期,由于建筑工程采用岸边回填后清除法施工,基本上属于陆上施工,减小施工难度和缩短建设工期。

4)技术经济性更好,如第四章的技术经济分析,在未考虑渔光互补的情况下,尽管建设成本有所增加,但由于发电量增加更加明显,经济性较传统水面光伏更好。

5)运营维护更加方便,在等间距的网状钢结构上采用龙门吊门型架结构的检修和清洗装置前后左右移动,特别是清洗装置可以采用类似于农业灌溉的装置,同时安装喷水和压缩空气喷头,以及清洗刷,清洗效率很高。较传统水面光伏依靠小船进行检修和清洗要方便很多。

综上,新型地面和水面双轴跟踪式有广阔应用前景。

5 结论

新型双轴跟踪相对固定式:增加发电量、提高单位面积能源利用率、输出平稳、提高经济性;新型双轴跟踪相对传统跟踪式:节约地面(水面)、提高单位面积能源利用率、改善经济性。

新型水面双轴跟踪除具备传统水面光伏的优点:

1)占用极少土地、渔光互补、消纳方便、旅游效益、避免组件遮光、减少蒸发和藻类繁殖等。

2)对水体面积大小、深浅和水位变化适应性强。

3)由于建筑工程多采用岸边回填然后清除的施工方法,基本上属于陆上施工,减小施工难度和缩短建设工期。

4)较大多数传统水面光伏依靠小船进行检修和清洗,运营维护更加方便。

5)新型双轴跟踪光伏发电技术具有很大的应用前景。

致谢

本文参考使用了光伏发电设计方面的可研数据,特此感谢电力设计单位!同时感谢东方电气股份有限公司有关领导给予的支持和帮助!

参考文献:

- [1] 赵争鸣,刘建政,孙晓英,等.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005:20-26.
ZHAO Z M, LIU J Z, SUN X Y, et al. Solar photovoltaic power generation and its application [M]. Beijing: Science Press, 2005: 20-26.
- [2] 谢文韬.太阳能光伏发电双轴跟踪的轨迹设计与控制[J].能源与节能,2015(6):78-82+137.
XIE W T. Trajectory design and control of dual-axis tracking of solar photovoltaic power generation [J]. Energy and energy conservation, 2015(6): 78-82+137.
- [3] 李卫军,冯春祥,周世勃,等.基于二维自由度的双轴跟踪太阳光伏发电系统设计[J].太阳能,2013(10):54-59.
LI W J, FENG C X, ZHOU S B, et al. Design of dual-axis

- tracking PV system based on two-dimensional of freedom [J]. Solar Energy Technology Products and Engineering, 2013(10): 54-59.
- [4] 刘马军. 江苏常州100 MWP“渔光一体”直溪光伏发电项目可行性研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2015: 1-75.
LIU M J. Feasibility study on the 100 MWP “fishing and light integration” Zhixi photovoltaic power generation project in Changzhou, Jiangsu [D]. Beijing: University of Beijing Chemical Technology, 2015: 1-75.
- [5] 许启明, 冯俊伟, 宫明. 太阳能利用跟踪技术的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 6294-6297.
XU Q M, FENG J W, GONG M. Progress in solar energy utilization tracking technology [J]. Anhui Agricultural Science and Technology, 2011, 39(10): 6294-6297.
- [6] 卢育发, 李旗号, 李倩. 双轴跟踪装置对太阳能发电系统增效的理论研究 [J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2009, 8(5): 43-45 +59.
LU Y F, LI Q H, LI Q. Theoretical study on synergy of dual-axis tracking device for solar power generation system [J]. Journal of Anhui Electronic Information Vocational and Technical College, 2009, 8(5): 43-45 +59.
- [7] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术(第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-316.
WANG C G, WANG S C. Practical technology of solar photovoltaic power generation (2nd ed.) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1-316.
- [8] 王方毓. 水上太阳能光伏电站的技术特点及应用 [J]. 工程技术研究, 2017(10): 76-77.
WANG F Y. Technical characteristics and application of water solar photovoltaic power station [J]. Engineering technology and application, 2017(10): 76-77.
- [9] 贺文山. 浅析漂浮式水上光伏之优劣势 [EB/OL]. (2016-06-02) [2018-08-28]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160202/706422.shtml>.
HE W S. Analysis of the advantages and disadvantages of floating water photovoltaic [EB/OL]. (2016-06-02) [2018-08-28]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160202/706422.shtml>.
- [10] 张智清. 双轴光伏跟踪装置: 201810773517.2 [P]. 2018-07-14.
ZHANG Z Q. Dual-axis photovoltaic tracking device; 201810773517.2 [P]. 2018-07-14.
- [11] 张智清. 双轴光伏跟踪装置: 201821114837.9 [P]. 2018-07-14.
ZHANG Z Q. Dual-axis photovoltaic tracking device; 201821114837.9 [P]. 2018-07-14.
- [12] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术(可再生能源丛书) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-218.
SHEN H, ZENG Z Q. Solar photovoltaic technology (renewable energy series) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-218.
- [13] 王淑娟. 跟踪式支架最适合用在什么地方 [EB/OL]. (2016-06-23) [2018-08-28]. http://www.360doc.com/content/16/0623/07/32789769_570058985.shtml.
- WANG S J. Where is the best place for the tracking bracket [EB/OL]. (2016-06-23) [2018-08-28]. http://www.360doc.com/content/16/0623/07/32789769_570058985.shtml.
- [14] Faye. 系统发电量和年利用小时数估算 [EB/OL]. (2018-04-10) [2018-04-10] [2018-08-28]. <https://www.energytrend.cn/knowledge/20180410-27874.html>.
Faye. Estimation of system power generation and annual utilization hours [EB/OL]. (2018-04-10) [2018-08-28]. <https://www.energytrend.cn/knowledge/20180410-27874.html>.
- [15] 拥民. 光伏跟踪系统从传统向智能提升发电效率 [N]. 中国能源报, 2016-06-02.
YONG M. Photovoltaic tracking system improves power generation efficiency from traditional to intelligent [N]. China Energy News, 2016-06-02.
- [16] 李健, 林声宏, 党三磊. 光伏电力经济效益实用分析方法研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 129-132.
LI J, LIN S H, DANG S L. Research of practical analysis method on solar photovoltaic power economic benefit [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 129-132.

作者简介:



ZHANG X

张兴(通信作者)

1970-, 男, 四川南部人, 一级建造师、全国注册造价师、高级工程师, 哈尔滨电工学院电气技术学士, 主要从事电气技术、技术经济和可再生能源应用 (e-mail) 553160317@sina.com。

贺广零

1982-, 男, 湖南衡阳人, 总经理助理/高级工程师, 同济大学结构工程博士, 主要从事新能源项目设计及其管理工作 (e-mail) hegl@ncpe.com.cn。

王启志

1987-, 男, 布依族, 贵州惠水人, 工程师, 西安交通大学热能工程专业硕士, 主要从事新能源研究与开发, 项目管理 (e-mail) decwangqz@163.com。

胡畅

1982-, 男, 湖南湘乡人, 东方电气集团国际合作有限公司火电业务五部商务部副经理, 注册造价工程师, 重庆大学土木工程、工程管理双学士学位, 主要从事电力建设项目商务管理及技术经济方面的工作 (e-mail) huchang@dongfang.com.cn。

杜波

1973-, 男, 四川南部人, 总经理助理/高级工程师, 重庆大学电机专业学士, 主要从事电站工程项目开发和管理等工作 (e-mail) dubo@dongfang.com.cn。