

[农光互补]

采用折叠光伏板的农光互补发电系统设计与优化

文/董元钢¹ 孙浩哲¹ 程伟志¹ 张洪征¹ 张环宇¹ 张智新²

1. 山东睿冠电能热力有限公司; 2. 山东和同信息科技股份有限公司

研究一种采用折叠光伏板的农光互补发电系统（AVS）动态跟踪算法，可有效提高太阳能利用率，同时通过折叠板遮阳促进作物生长。实验结果表明，该系统在全天发电平稳度和发电量方面提高15%，并在创造农作物多样化微环境方面有较高的价值。折叠设计不仅可以保护作物免受不利气候条件影响，还可提升系统发电量。

本文提出一种折叠光伏板AVS系统，如图1所示。可提供 $10^{\circ} \sim 89^{\circ}$ 倾斜角，精确控制农作物日光照量，优化各生长阶段光合作用。冬季设置 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的小角度可以扰乱黎明冷空气流动来提供防霜冻保护。夏季可以阻挡20%~50%的作物日光照射，防止过度光和热损害。在发电方面，日光跟踪功能通过调节面板方向最大限度利用太阳能，比固定面板系统产生更多的电力。

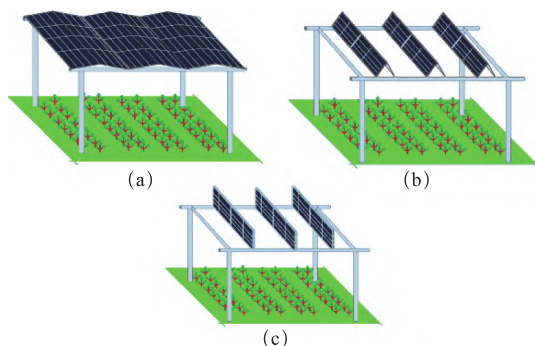


图1 折叠面板的AVS效果图

AVS农光互补发电系统

AVS农光互补发电系统分为机械部分和日光跟踪部分。机械部分为模块化折叠设计，日光跟踪根据太阳位置算法进行调节。系统采用基于时间的单

轴方法算法（算法1）^[1]。但实验发现清晨和傍晚时易受阴影效应影响，为解决这个问题，本文采用优化改进型阴影控制算法（算法2）。

1. 折叠模块设计

为有效收集能量，光伏板向量与太阳射入光线平行，为此将光伏板设计为围绕水平轴旋转的平面，形成倾斜角 β 。

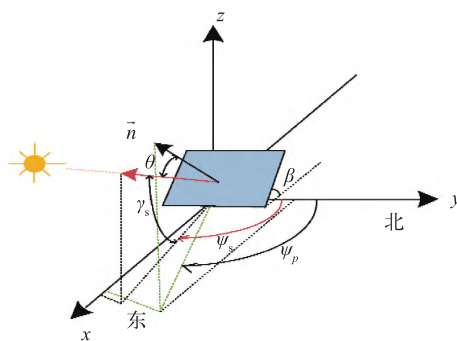


图2 单轴朝东折叠面板的向量几何

轴程序根据日期计算太阳每个时段的位可得太阳方位角 ψ_s 和高度 γ_s 。太阳位置可表示为面板指向太阳的向量

$$\begin{aligned} x &= \cos \gamma_s \sin \psi_s \\ y &= \cos \gamma_s \cos \psi_s \\ z &= \sin \gamma_s \end{aligned} \quad (1)$$

假设方位角 ψ_s 是从北方测量；则 $\psi_s = 0$ 表示太阳在正北， $\psi_s = 90^\circ$ 则为东方。倾斜角 β 和向量 $\vec{n}$ 采用笛卡尔坐标定义。

$$\begin{aligned} n_x &= \sin\beta \sin\psi_p \\ n_y &= \sin\beta \cos\psi_p \\ n_z &= \cos\beta \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $y=0$ ，面板方位角与（y轴）垂直， $\psi_p=90^\circ$ ，向量 $\vec{n}$ 可以表示为

$$\vec{n} = [\sin\beta, 0, \cos\beta] \quad (3)$$

如图3所示为双向光伏板系统二维平面，其中垂直和水平轴代表面板方向。向量 $\vec{n}_{\text{east}}$ 和 $\vec{n}_{\text{west}}$ 分别为东/西向面板向量，可根据东向倾斜角 β_1 和西向倾斜角 β_2 计算

$$\vec{n}_{\text{east}} = [\sin\beta_1, 0, \cos\beta_1] \quad (4)$$

$$\vec{n}_{\text{west}} = [\sin\beta_2, 0, \cos\beta_2] \quad (5)$$

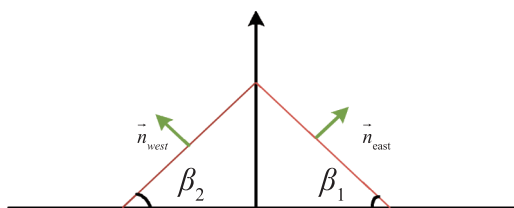


图3 单轴双面光伏板的向量

2. 基于时间的单轴跟踪算法

本文先采用基于时间的单轴太阳跟踪方法监测太阳轨迹，来保持光伏板法向量平行于太阳光入射角，最大限度地提升阳光利用率。算法输入是给定时间 t ，输出是面板倾斜角 $\beta_1(t)$ 和 $\beta_2(t)$ ，并根据太阳位置不断调整面板角度，日出时面板为最大倾斜角 89° ；随着正午临近， $\beta_1(t)$ 逐渐减小到最小值 10° 。之后 $\beta_2(t)$ 逐渐恢复，日落时恢复到最大角度 89° 。

3. 阴影效果

在清晨和傍晚，两相邻面板会因出现阴影导致发电减少。图4a显示前面板阴影投射在后面板的情况。如图4b所示，前面板中心的阴影长度为

$$S_L = P_L \times \frac{\sin\beta}{\tan\gamma_s} \quad (6)$$



图4 阴影图

为减小 S_L ，一种方案是扩大面板间距，但这需要更大的安装空间，增加更多的安装成本。

第二种方案是采用专用电机联动器精确调整角度，确保每个面板都有最大太阳能射入，但也增加了系统复杂性和成本。为提高发电量并降低成本，只在关键时刻调整光伏板角度，最大限度减少阴影面积，并使用功率分析仪测量输出功率^[2]。

实验验证

为验证AVS系统发电效率，对光伏系统进行改造，增加机械和电气部件。包括轨道、支架和电机等。电机带动光伏板在滑动底座上移动来调节面板角度。如图5所示，a对和b对由折叠面板组成，共同构成了上述模块，固定面板c对和d对用于比对。a对和b对的东向面板连接“折叠逆变器东”（IME），西向面板连接“折叠逆变器西”（IMW）。c对和d对的东/西向面板分别连接“固定逆变器东”（IFE）和“固定逆变器西”（IFW）。设备数据通过远程终端（RTU）进行汇总和记录。

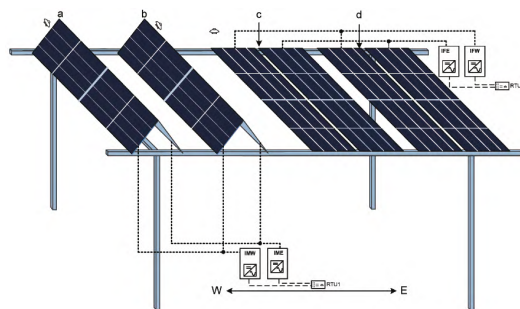


图5 面板配置图

a/b—折叠面板 c/d—固定面板

1. 数据收集

实验于2024年5月11—20日进行，光伏板宽1 038 mm，长2 228 mm，厚35 mm，转换效率21.2%，采用3.5 kW单相逆变器，工作电压100~500 V，每10 min采集一次功率数据。

2. 效果评估

对于固定面板，本文采用增益比和峰值方差比进行性能评估。发电增益比为

$$PG = \frac{CPM_o - CPF_i}{CPF_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中， CPM_o 和 CPF_i 为折叠模块和固定模块产生的累计电能，计算公式为

$$\begin{aligned} \text{CPM}_0 &= \sum P_{\text{IME}}(t) + \sum P_{\text{IMW}}(t) \\ \text{CPF}_i &= \sum P_{\text{IFE}}(t) + \sum P_{\text{IFW}}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中， P_{IME} 和 P_{IMW} 是连接东/西向折叠面板的逆变器功率； P_{IFE} 和 P_{IFW} 是连接东/西向固定面板的逆变器功率。

通过比较折叠板与固定板发电量，估算发电量增益。采用峰值方差比评估折叠与固定面板发电稳定性，折叠面板和固定面板峰值为

$$\text{PPINF}(t) = \max(P_{\text{IFE}}(t), P_{\text{IFW}}(t)) \quad (9)$$

$$\text{PPINM}(t) = \max(P_{\text{IME}}(t), P_{\text{IMW}}(t)) \quad (10)$$

将PPINF和PPINM峰值标准差计算 $\text{STD}_{\text{PPINF}}$ 和 $\text{STD}_{\text{PPINM}}$ 。峰值方差比为

$$\text{STD}_{\text{pp}} = \frac{\text{STD}_{\text{PPINM}}}{\text{STD}_{\text{PPINF}}} \quad (11)$$

面板输出功率的方差越大，表示全天的功率更离散。

3. 结果

本文在2024年5月11日采用算法1进行测试。图6a为面板发电功率曲线图；图6b为东西向折叠面板发电曲线图；图6c为固定面板的发电系统；图6d为折叠面板和固定面板总发电功率。通过观察数据发现，发电量并没有像预期的在清早产生，这是因为算法1没有考虑遮阳效果，导致前面板阴影投射到相邻面板，影响了清早的发电。

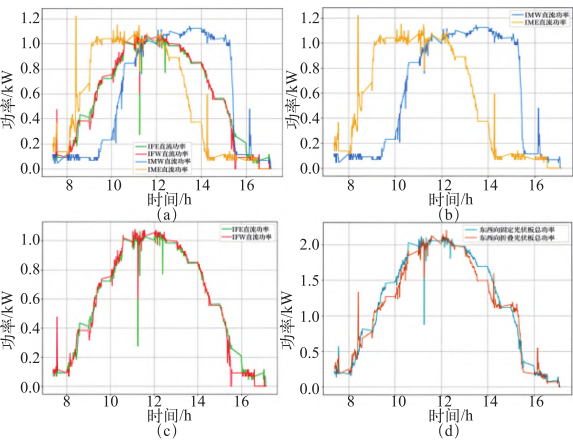


图6 算法1发电功率图

图7为全发电量峰值分布。与折叠面板功率数据相比，固定面板功率数据集中在中午附近，峰值方差为1.11>1，表明折叠面板全天的发电更加连续稳定。

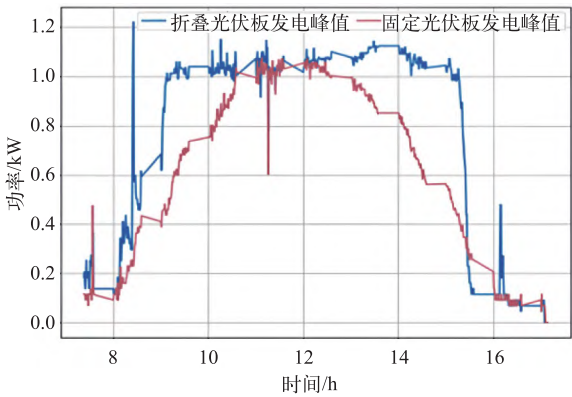


图7 算法1峰值比

5月16日，采用算法2进行再次测试，天气条件与11日相似，在关键时刻调整面板的倾斜角度来减少面板的阴影面积，发电功率曲线如图8a所示。与图6相比，折叠东向面板产生的功率有所提高，这一增益归功于算法2。如图8d所示，通过比较折叠面板与固定面板的总功率，可以看出折叠面板比固定面板产生更多电力。表1显示了4.66%的增益。图8b为折叠面板的发电功率曲线，图8c为固定面板的发电功率曲线。图9为连续发电峰值，方差比为1.13。

5月20日采用算法2在相同的天气条件下再次进行测试，与固定面板相比，折叠面板获得了8.14%的功率增益，峰值方差为1.12，如图10和图11所示。

表1 固定/折叠面板累计发电、峰值方差比、百分比增益

	PIFE /kW	PIFW /kW	PIME /kW	PIMW /kW	STDPP	增益 (%)
算法1	345.98	347.39	328.29	349.73	1.11	-2.21
算法2	336.8	342.37	352.43	358.41	1.13	4.66
算法2	331.92	337.62	343.17	380.90	1.11	8.14

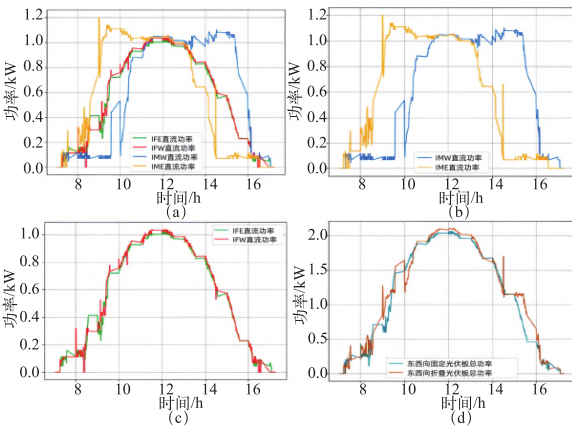


图8 算法2光伏板发电功率

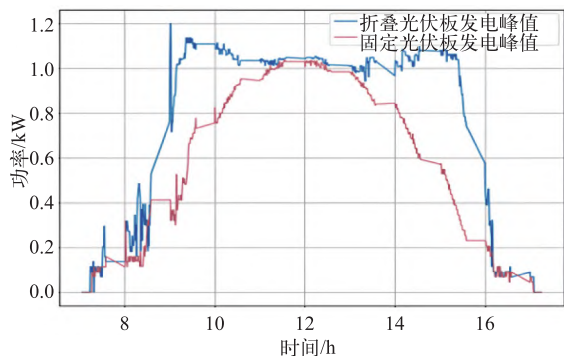


图9 算法2峰值比

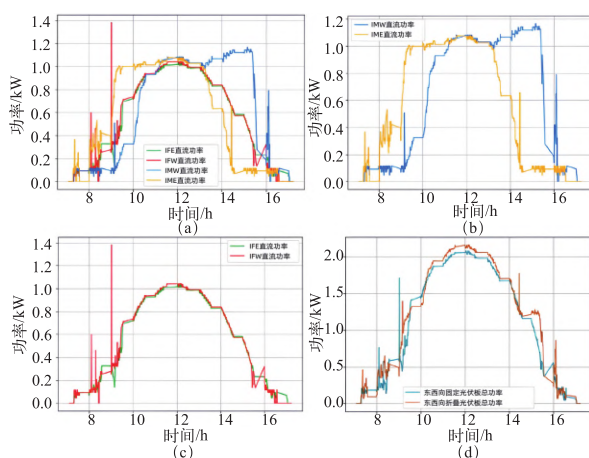


图10 算法2光伏板发电功率图

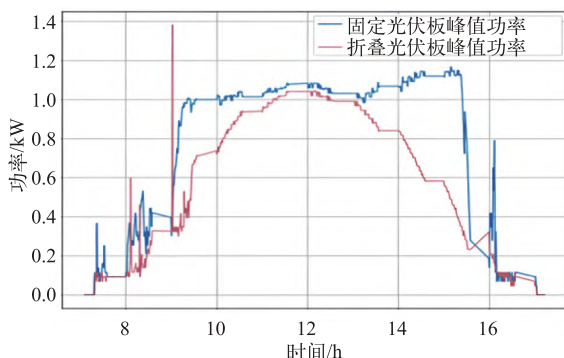


图11 算法2峰值比

图12为折叠面板和固定面板发电量对比，可以发现多数时间折叠面板比固定面板发电功率更高。

图13为折叠系统发电增益，从5月16日开始，折叠系统发电量大幅增加，说明太阳能利用率显著提升，这是因为动态调整面板方向，确保了全天阳光的合适对正。11月20日东/西向面板发电增益达到

峰值，这是精确计算和实时调整的结果，证明算法2在减小阴影效应和提升阳光利用率方面的效果。

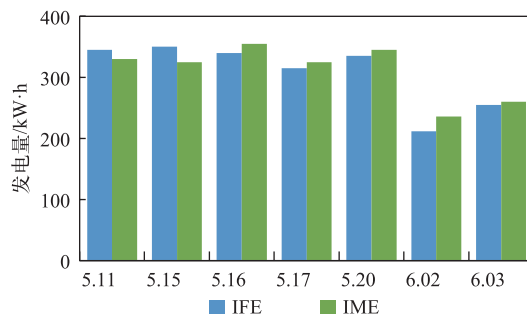


图12 折叠面板与固定面板的累计发电量对比

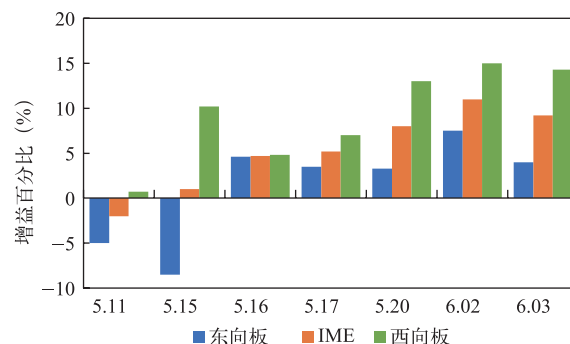


图13 折叠面板与固定面板相比的发电增益

结束语

本文验证了配备动态跟踪算法的折叠光伏板系统的高效性，在解决可再生能源发电和可持续农业需求的同时，不仅提高了太阳能利用率，还通过可调节遮阳提高了作物产量。研究结果表明，跟踪算法控制的折叠面板在能源效率方面优于固定面板，在发电方面提高15%，为各种作物创造有利的小气候条件。折叠面板系统不仅可以保护作物免受不可预测的天气影响，还可保证高效的能源生产，为未来折叠光伏板发电系统的研究奠定了一定的基础。EA

(收稿日期：2024-07-16)

参考文献

- [1] 解宝, 李萍宇, 苏绎仁, 苏建徽, 刘甜甜. 局部阴影下光伏阵列的最大功率点跟踪算法研究[J]. 太阳能学报. 2023, 44(12): 47-52.
- [2] 吴征宇. 大型光伏电站有限面积下的最佳角度分析[J]. 电气技术与经济. 2023(8): 265-267.