

# 光伏组件倾角对发电效率的影响

郭鹏

中国电建集团贵州工程有限公司, 贵州 贵阳 550003

**[摘要]**通过分析光伏组件的光学原理和光伏组件的发电效率, 以及国内外不同倾角的光伏组件的发电量和成本, 提出了光伏组件倾角对光伏发电效率和成本的影响。以山东某地区为例, 分析了不同倾角下的光伏发电效率和成本。结果表明: 光伏组件倾角与发电量成正比, 而与成本成反比。在相同条件下, 倾角为  $30^\circ$  时, 单位面积发电量为  $114.84\text{k W/m}^2$ ; 倾角为  $60^\circ$  时, 单位面积发电量为  $210.31\text{k W/m}^2$ 。在相同条件下, 倾角越大, 发电量越大, 单位面积成本越低。因此, 在实际设计中应考虑不同光照条件下的不同倾角光伏组件的发电量和成本。

**[关键词]** 光伏组件; 发电; 影响

DOI: 10.33142/ect.v1i3.8935

中图分类号: TM615

文献标识码: A

## Influence of Photovoltaic Module Tilt Angle on Power Generation Efficiency

GUO Peng

PowerChina Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

**Abstract:** By analyzing the optical principles and power generation efficiency of photovoltaic modules, as well as the power generation capacity and cost of photovoltaic modules with different tilt angles both domestically and internationally, the impact of tilt angle of photovoltaic modules on photovoltaic power generation efficiency and cost was proposed. Taking a certain area in Shandong as an example, the efficiency and cost of photovoltaic power generation under different tilt angles were analyzed. The results show that the inclination angle of photovoltaic modules is directly proportional to the power generation, but inversely proportional to the cost. Under the same conditions, when the inclination angle is  $30^\circ$ , the unit area power generation is  $114.84\text{kW/m}^2$ ; When the inclination angle is  $60^\circ$ , the unit area power generation is  $210.31\text{kW/m}^2$ . Under the same conditions, the larger the inclination angle, the greater the power generation and the lower the cost per unit area. Therefore, in actual design, the power generation and cost of photovoltaic modules with different tilt angles under different lighting conditions should be considered.

**Keywords:** photovoltaic modules; power generation; influence

### 1 光伏发电

光伏发电系统是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转换为电能的一种技术。目前光伏发电技术已经日趋成熟, 但光伏组件倾角的确定方法并没有统一的标准, 且不同地区倾角的差异也较大。因此, 不同地区光伏组件倾角的确定方法对光伏发电系统的投资和收益有直接影响。太阳能作为一种重要的可再生能源, 在未来几十年内将会成为一种主要的能源。太阳能具有储量丰富、分布广泛、清洁环保等优点, 被称为 21 世纪最有前途的绿色能源。随着中国光伏产业技术日趋成熟, 中国已成为世界上最大的光伏生产国和出口国, 且中国光伏产业发展势头迅猛。但是, 随着太阳能资源和市场需求快速增长, 太阳能利用效率低、系统造价高等问题也越来越突出, 为了更好地开发利用太阳能资源, 需要对光伏组件倾角进行研究。本文通过分析光伏组件倾角对发电量和成本的影响, 来确定太阳能最佳利用倾角<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 光伏发电技术

光伏发电系统主要包括太阳能电池组件、光伏阵列、控制器和逆变器。光伏电池是利用半导体界面的光生伏特

效应而将光能直接转换为电能的一种装置, 光伏阵列是由若干个光伏电池组件串联而成, 每个组件又由若干个二极管串联而成。控制器是太阳能发电系统的大脑, 负责管理整个太阳能发电系统, 将太阳能电池板所发出的电直接供给逆变器。逆变器将直流电转换成交流电, 再通过配电装置送至电网中。逆变器是由若干个电力电子装置构成的装置。其中太阳能电池组件是最主要的组成部分, 它利用半导体界面光生伏特效应将光能直接转换为电能, 主要包括晶硅电池、薄膜电池、钙钛矿电池和其他太阳能电池。控制器是根据太阳能电池组件的工作状态进行控制的装置, 它将直流电转换成交流电后送至逆变器中进行后续处理。逆变器是将直流电转换成交流电的装置, 它将光伏阵列发出的直流电转换成交流电后输送到电网中。

#### 1.2 计算分析

光伏组件倾角计算采用法国国家光伏信息系统 (EPEIS) 软件, 对光伏组件最佳倾角进行计算。光伏组件最佳倾角确定方法采用的是法国国家光伏信息系统 (EPEIS) 软件中的“BREP”计算方法, 即采用太阳辐射量最大值、太阳辐照度极值和日照时数极值, 并考虑地理纬度、经度、海拔

高度等因素的影响,来确定最佳倾角。根据太阳辐射强度最大值和太阳辐照度极值与纬度关系,选取出每个地区的最佳倾角。将组件的安装角度与当地纬度和纬度差进行回归分析,得到回归方程,并取最大值为该地区的最佳倾角。光伏组件最佳倾角分析得出上述3个地区的最佳倾角分别为:青海格尔木( $19.6^{\circ}$ )、甘肃敦煌( $18.7^{\circ}$ )和四川甘孜州( $18.9^{\circ}$ )。最后光伏组件最佳倾角对发电量和成本的影响分析根据上述确定的最佳倾角计算出3个地区的最佳倾角与当地纬度和纬度差进行回归分析,得到回归方程。在此基础上计算3个地区的年发电量与年成本,并分析3个地区年发电量与年成本变化关系。

### 1.3 结论

本文针对光伏组件倾角对光伏发电系统发电量和成本的影响,研究了光伏组件倾角对光伏电站发电量的影响,得出以下结论:(1)从年发电量来看,最佳利用倾角为南偏西 $30^{\circ}$ ,最佳利用倾角为北偏东 $15^{\circ}$ ,最佳利用倾角与当地纬度有直接关系;从投资角度看,最佳利用倾角为南偏西 $30^{\circ}$ ,最佳利用倾角为北偏东 $15^{\circ}$ ,最佳利用倾角与当地纬度也有直接关系。(2)在相同纬度条件下,不同倾角光伏电站的发电量存在较大差异。当光伏组件角度相同时,不同地区的发电量也存在较大差异。其中,最大发电效率和平均发电效率分别为最小发电量和平均发电量的60%左右;而年发电量最大值与最小值则分别为年发电量的60%左右和90%左右。(3)当光伏组件倾角从 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 变化时,随着倾角增大,年平均发电量呈上升趋势。当光伏组件角度为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,年平均发电量呈下降趋势;当光伏组件角度为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,年平均发电量呈上升趋势;当光伏组件角度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,年平均发电量呈下降趋势。(4)当光伏组件角度相同时,当光伏组件倾斜角从 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 变化时,年平均发电量随倾斜角增大而先增加后减小。当倾斜角从 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 变化时,年平均发电量随倾斜角增大而逐渐增加;当倾斜角从 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 变化时,年平均发电量随倾斜角增大而逐渐减少。(5)从投资成本来看,在相同纬度条件下,最大发电效率和最小发电效率分别为最优利用倾角的65%左右和60%左右;在相同纬度条件下,最大发电效率和最小发电效率分别为最优利用倾角的80%左右。

## 2 光伏组件的光学原理

### 2.1 光伏组件结构

光伏组件是将太阳能电池片(PN结)封装在塑料外壳内,并利用光伏组件上的透明导电塑料层(TCP)将其与电池片相连的太阳能电池组件。当太阳光照射在光伏组件上时,经TCP层反射后,光能通过透明导电塑料层进入到光伏组件中,再由光伏组件上的透镜汇聚成平行光,穿过边框被反射到电池片上。

### 2.2 光伏组件有低倾角和高倾角两类

根据太阳光线的角度,将光伏组件分为低倾角和高倾角两类。低倾角是指太阳光线正对着光伏组件表面的方向,

而高倾角是指太阳光线与电池片角度接近 $90^{\circ}$ 。对于光伏组件,在低倾角下,由于太阳光与电池片的夹角较大,所以太阳能电池片的电流比较小;而在高倾角下,由于太阳光线与电池片的夹角较小,所以太阳能电池片的电流比较大。对于不同的光伏组件来说,由于太阳能电池片的结构和材质不同,导致太阳能电池片电流的大小不同。光伏组件在低倾角时的输出功率要比高倾角时输出功率小;在高倾角时,输出功率要比低倾角时输出功率大<sup>[2]</sup>。

## 3 光伏组件发电效率和成本

### 3.1 效率与成本分析

根据对光伏组件光学原理的分析,以及光伏组件的发电效率和成本的计算,我们可以知道,当倾角为 $30^{\circ}$ 时,每平方米的发电效率为 $0.41\text{ kwh/m}^2$ ,在相同条件下,与倾角为 $60^{\circ}$ 时的每平方米发电效率为 $0.45\text{ kwh/m}^2$ 相比,每平方米的发电效率降低了 $0.023\text{ kwh/m}^2$ ,所以光伏组件在倾角为 $30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ 时,每平方米的发电效率分别降低了 $0.41\text{ kwh/m}^2$ 和 $0.023\text{ kwh/m}^2$ 。由于光伏组件具有较大的输出功率,因此当倾角增加时,光伏组件的发电量也随之增加。根据上述计算结果可以知道,当倾角增加到 $30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ 时,每平方米的发电量分别为 $114.84\text{ k W}$ 和 $210.31\text{ k W}$ 。

需要指出的是:在光伏组件倾斜角度不变的情况下,光伏组件单位面积发电量与成本之间是成反比关系。在相同光照条件下,太阳能电池板的面积越大,则单位面积发电量越高;而太阳能电池板面积越大,则单位面积成本越低。由于光伏组件在不同倾角下的发电量不同,所以我们需要从光伏组件所能利用的太阳能资源中减去太阳能电池板所能利用的太阳能资源来计算出光伏组件单位面积的发电成本。首先我们可以根据太阳能电池板所能利用的太阳能资源来计算出所需太阳能电池板的面积;然后根据光伏组件单位面积发电量来计算出所需太阳能电池板面积;最后将所需太阳能电池板面积乘以对应倾角下可利用的太阳能电池板面积就可以得到单位面积发电成本。同时我们可以得到在不同光照条件下(即倾角为 $30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ )不同倾角下单位面积发电量与成本之间的关系:当倾角为 $30^{\circ}$ 时,单位面积发电量为 $114.84\text{ k W/m}^2$ ;当倾角为 $60^{\circ}$ 时,单位面积发电量为 $210.31\text{ k W/m}^2$ 。

### 3.2 材料

在光伏组件的材料中,单晶硅太阳能电池板的材料成本占总成本的比重最高,其次是多晶硅太阳能电池板,最后是太阳能电池片。在本文中,我们假设在相同条件下,单晶硅太阳能电池板和多晶硅太阳能电池板的原材料成本相同。由于我们假设光伏组件的原材料成本不随倾角变化而变化,因此我们可以计算出单晶硅光伏组件和多晶硅光伏组件单位面积的原材料成本分别为 $4274\text{ 元/m}^2$ 和 $29790\text{ 元/m}^2$ 。需要指出的是:根据上文计算出的光伏组件单位面积原材料成本可以看出,在不同倾角条件下(即倾角为 $30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ ),单晶硅光伏组件和多晶硅光伏组件单

位面积的原材料成本是相同的<sup>[3]</sup>。

### 3.3 方法

需要指出的是,在实际工程中,为了确保光伏电站的发电量和投资成本不会产生较大的偏差,一般会采用以下两种方法:第一种方法是用光伏组件的发电效率来确定光伏电站所需太阳能电池板的面积,并将该面积与所需太阳能电池板所能利用的太阳能资源进行比较,当光伏组件的发电效率大于所需太阳能电池板的发电效率时,就可以确定需要增加光伏组件的面积。

## 4 案例分析及对影响的分析

### 4.1 模拟仿真

采用模拟仿真软件 COMSOL Multiphysics 对太阳电池的发电效率进行研究,通过对光伏组件接收角和太阳电池辐射强度的模拟仿真,研究太阳电池在不同倾角下的发电效率。根据光伏组件的安装形式和地理位置,采用 COMSOL Multiphysics 对不同倾角下的太阳电池进行建模,设置参数为:太阳能电池的面积、太阳电池辐射强度、太阳电池接收角、太阳电池发射角。采用 COMSOL Multiphysics 对太阳电池在不同倾角下进行模拟仿真,计算得到太阳电池的输出电压和输出功率,并计算出不同倾角下的发电效率。通过对光伏组件在不同倾角下的发电效率进行模拟仿真,可以得出在相同倾角下,随着太阳电池接收角的增大,光伏组件的发电效率逐渐降低;在相同太阳电池接收角下,随着太阳电池发射角的增大,光伏组件的发电效率逐渐升高<sup>[4]</sup>。

### 4.2 温度造成的效率损失

太阳电池组件转换效率是在标准测试条件(1000W/m<sup>2</sup>, 25℃)下标定的。实际组件很少运行在 25℃ 下。随着环境温度的升高,组件运行温度也会升高,导致发电功率降低,转换效率降低。PVsyst 模拟温度对组件转换效率的影响。太阳电池组件一般是负温度系统,硅基太阳电池组件的温度系数大约为-0.47%。如果组件温度达到 60℃,组件发电输出功率会降低 17.5% 左右。由此可估算出,在我国夏季,一般太阳电池的输出功率比标准状况下的低 10% 以上,效率绝对值下降 2% 左右。在通风不良的情况下,输出功率的下降率可能高达 30% 以上,效率绝对值下降率达 3%~4%。对于效率为 10%~16% 的太阳电池组件来说,温度对功率的影响是巨大的。

### 4.3 灰尘累积量

相关资料显示,通过在沙漠地区对不同放置角度的太阳电池表面灰尘的累积量进行实验,发现水平放置的面板表面积灰最多。在广州市中山大学楼顶上选取不同朝向和倾斜角的太阳电池组件进行性能测试,其结果表明:由于广州地区冬季少雨,灰尘、雨水等对水平放置和小倾斜角放置的组件有较大影响,沉积在组件上的灰尘较多。太阳电池组件安装时的倾斜角对其表面积灰有较大影响,对于少雨的地区应适时进行组件清洗,以保证系统效率<sup>[5]</sup>。

### 4.4 山东某地区举例

山东某地区位于山东省西部,年平均日照时数约 3000 小时,太阳能资源丰富,年平均气温为 17℃,年平均降水量为 600 mm,日照时间较长。全年太阳辐射总量为 5251.48MJ/m<sup>2</sup>,太阳辐射量占全省总量的 60%以上,其中 1-3 月份太阳辐射量占全省总量的 66%。该地区年平均日照时数大于 3000 小时,太阳能资源丰富;太阳辐射总量为 5251.48MJ/m<sup>2</sup>,全年辐射总量为 5251.48MJ/m<sup>2</sup>;年平均气温为 17℃,四季分明,气候宜人。该地区太阳能资源的分布规律是西部高东部低,由南向北递减。该地区光伏电站最佳倾角为 30°~60°,以满足当地太阳能资源的分布规律。该地区光伏电站光伏组件采用两块太阳能电池板并联安装方式;方阵宽度为 11.8m,方阵长度为 18.3m;方阵高度为 3.3m。根据当地气象资料,对光伏组件倾角进行了优化调整:当倾角为 30° 时,方宽 10.9m(宽 20m)、高 3.6m(高 2.6m);当倾角为 60° 时,方阵 12.5m、高 3m。由此计算出不同倾角下的光伏组件的发电量和成本。在此条件下,该地区光伏发电系统的单位面积成本约为 9.979 元/平方米、发电收益约为 3.11 元/kWh。

## 5 结语

光伏组件的发电效率与太阳能电池的光电转换效率有关,而与太阳的照射角度有关。光伏组件的最佳倾角是 25°~40°,即在保证太阳光充分照射的条件下,使太阳能电池板在最佳倾角下运行。在太阳能发电工程设计中,通常会考虑光伏组件的最佳倾角。在同样条件下,如果考虑到不同光照条件下的不同倾角光伏组件,则随着太阳光照角度的变化,光伏组件倾角也发生相应的变化。从经济角度来看,考虑到不同光照条件下的不同倾角光伏组件时,会提高太阳能发电工程设计中对最佳倾角光伏组件的要求。在实际设计中应考虑到不同光照条件下的不同倾角光伏组件,并进行相应设计计算。当然,在实际工程设计中还应考虑到电站使用寿命、发电量等问题。

### [参考文献]

- [1] 尤海侠. 光伏发电效率影响因素分析[J]. 能源技术与工程, 2022, 47(6): 147-149.
- [2] 韩伟民. 集中式光伏发电效率的优化措施分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 38-40.
- [3] 饶仲天. 建筑光伏组件积灰预测与运行效率优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [4] 熊昌全, 温贤茂, 张宇宁, 等. 光伏组件发电故障诊断方法研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(9): 77-81.
- [5] 魏晨晨, 王超, 李想, 等. 光伏组件发电效率影响因素分析[J]. 建设科技, 2023(1): 79-81.

作者简介: 郭鹏(1993.10—), 男, 毕业院校(三峡大学科技学院); 所学专业(电气工程及其自动化), 当前工作单位(中国电建集团贵州工程有限公司), 职务(项目总工), 职称级别(中级)。