

# 不同安装方式楼顶并网光伏发电系统 年发电量及环境效益分析

周海静, 曹玉霞, 王伟锴

(唐山学院 新材料与化学工程学院, 河北 唐山 063000)

**摘要:**以唐山某高校宿舍楼顶为项目地点,设计并网光伏发电系统。利用 PVsyst 软件对固定倾角、季节可调、斜单轴、双轴跟踪系统等不同安装方式的光伏发电系统进行仿真设计和分析,对比了 4 种安装方式的年发电量,并分析其 CO<sub>2</sub> 及其他污染物的减排效果。

**关键词:**并网光伏发电系统;安装方式;年发电量;环境效益

**中图分类号:**TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2023)06-0038-05

**DOI:**10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.06.008

## Analysis of Annual Power Generation and Environmental Benefits of Roof Grid-Connected Photovoltaic Systems with Different Installation Methods

ZHOU Hai-jing, CAO Yu-xia, WANG Wei-kai

(School of New Materials and Chemical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** With the roof of a university dormitory building in Tangshan as the project location, a grid-connected photovoltaic power generation system is designed. The PVsyst software is used to simulate and analyze the photovoltaic power generation systems with different installation methods such as fixed tilt, seasonally adjustable, single-axis tilt, and dual-axis tracking systems, where the annual electricity generation data of the four installation methods are compared, and their effects on reducing CO<sub>2</sub> and other pollutants are analyzed.

**Key Words:** grid-connected photovoltaic system; different installation methods; annual energy generation; environmental benefit

### 0 引言

光伏发电系统因其安全可靠、无噪声、低污染、无需消耗燃料和架设输电线路即可就地发电供电及建设周期短等优点,已经成为新能源技术的典型代表之一。随着碳中和理念的不断推进及光伏技术的发展,越来越多的高校开始

在校内建设光伏发电系统<sup>[1]</sup>。楼顶光伏发电系统只占用楼顶面积而不需要与建筑材料相结合,相较于建筑一体化改造成本较低,而且城市建筑可供开发利用的楼顶闲置空间较多,为安装光伏发电系统提供了便利<sup>[2]</sup>。光伏组件的安装方式有最佳倾角固定式、固定可调式和自动

**基金项目:**2023 年度唐山市社会科学发展研究课题(TSSKL2023-245)

**作者简介:**周海静(1981—),女,河北保定人,讲师,硕士,研究方向为太阳能电池;

曹玉霞(1980—),女,山东德州人,教授,博士,研究方向为发光材料、涂层材料。

跟踪系统 3 种,其中最佳倾角固定式最为普遍<sup>[3]</sup>。

随着计算机仿真模拟技术在光伏发电领域的不断应用,光伏发电系统发电量测算已能够借助软件完成。目前使用较多的软件有 RET-Screen, Meteonorm, PV & SOL, PVsyst 等<sup>[4]</sup>,其中 PVsyst 软件可以对独立、并网和光伏水泵系统进行设计、仿真和优化。本文通过 PVsyst 软件对唐山某高校宿舍楼顶并网光伏发电系统项目进行仿真研究、对不同安装方式并网光伏发电系统的年发电量及环境效益进行对比分析,以期在实际工程设计提供参考。

## 1 并网光伏发电系统

并网光伏发电系统可以将太阳能电池阵列输出的直流电转化为与电网电压同幅、同频、同相的交流电并实现与电网连接,从而向电网输送电能。这种发电系统的灵活性在于,在日照较强时,能为交流负载供电,同时能将多余的电能送入电网;而当日照不足即太阳能电池阵列不能为负载提供足够电能时,又可从电网索取电能为负载供电<sup>[5]</sup>。

并网光伏发电系统主要由太阳能光伏阵列、直流汇流箱、防雷箱、并网逆变器等组成,一般不经过蓄电池储能。并网光伏发电系统根据其组成及功能的不同,一般有 4 种形式:有逆流并网光伏发电系统,无逆流并网光伏发电系统,切换型并网光伏发电系统,有储能装置的并网光伏发电系统<sup>[6]</sup>。本文主要研究有逆流并网光伏发电系统,该系统的主要组成部件示意图如图 1 所示。

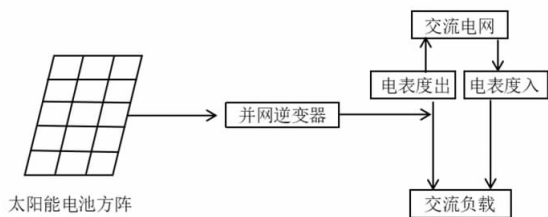


图 1 并网光伏发电系统主要组成部件示意图

## 2 项目所在地地理气候状况

项目所在地唐山市属暖温带半湿润季风型

大陆性气候。春季风多雨少、蒸发量大、空气干燥,多旱;夏季高温高湿、雨水集中,多雷雨、冰雹、大风等灾害性天气;秋季风速小、昼夜温差大,多晴好天气;冬季降水稀少、盛刮西到西北风,多干燥、寒冷天气;全年日照 2 600~2 900 h,年平均气温 12.5℃,极端气温最高 32.9℃,最低-14.8℃;无霜期 180~190 d,常年降水 500~700 mm,降霜日数年平均 10 d 左右。唐山市拥有非常丰富的太阳辐射资源,年平均太阳辐射量能够达到 122.52 kcal/cm<sup>2</sup>。

## 3 3D 建模

本项目地点为唐山市某高校学生宿舍楼顶。该楼高 30 m,南北长 50 m,东西长 20 m,楼顶可用面积 90 m<sup>2</sup>。楼南面 20 m 处为高 40 m,边长为 40 m 的学生餐厅,楼东南面 11 m 处是一座高约 50 m 的信号塔,这两座建筑物在一定时间段会对该楼顶的光伏发电系统造成部分阴影遮挡。根据负载用电量需求计算,此次设计的光伏发电系统规模为 9.9 kW<sub>p</sub>。根据项目地点实景进行 3D 建模,如图 2 所示。

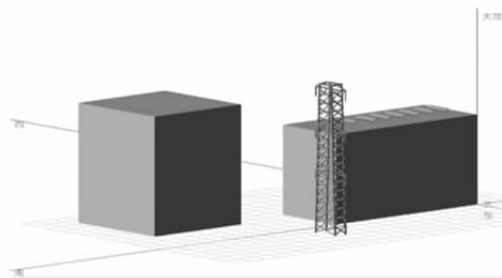


图 2 项目地点实景 3D 模型

## 4 系统设计

### 4.1 光伏组件和逆变器的选择

本项目光伏组件和逆变器的基本信息如表 1 和表 2 所示。

### 4.2 光伏阵列的布局

本项目装机容量为 9.9 kW<sub>p</sub>,选择光伏组件的功率为 150 W<sub>p</sub>,根据公式

$$\text{光伏组件数} = \frac{\text{系统总功率}}{\text{单个组件功率}} \quad (1)$$

得到系统所需光伏组件数量为 66 块。

表 1 光伏组件的基本信息

| 组件型号                             | 单机标称功率/W <sub>p</sub> | $P_{mpp}/kW_p$ | $U_{mpp}/V$ | $I_{mpp}/A$ | 组件面积/m <sup>2</sup> |
|----------------------------------|-----------------------|----------------|-------------|-------------|---------------------|
| Poly 150 W <sub>p</sub> 36 cells | 150                   | 8.92           | 531         | 17          | 65.4                |

表 2 逆变器的基本信息

| 逆变器型号                       | 单机标称功率/kW <sub>ac</sub> | 逆变器数量         | 工作电压/V  | 最大功率/kW <sub>ac</sub> | 容配比  |
|-----------------------------|-------------------------|---------------|---------|-----------------------|------|
| 9 kW <sub>ac</sub> inverter | 9.00                    | 2MPPT 50% 1 台 | 150~750 | 10.00                 | 1.10 |

在并网系统容量设计时,组件串的串联电压一定要小于光伏组件能耐受的最大系统电压;同时,必须兼顾系统所在地的最低环境温度。组件串在最低温度时的开路电压,一定要小于所匹配逆变器可以接受的最大直流输入电压,并且要留有 10%~20% 的余量。

根据 PV<sub>syst</sub> 软件优化设计结果,本项目所设计光伏系统中光伏组件的串联数为 33,并联数为 2。

光伏阵列间距的长度公式为

$$D=L\cos\beta+L\sin\beta\cdot s, \quad (2)$$

$$s=\frac{0.707\tan\varphi+0.4338}{0.707-0.4338\tan\varphi} \quad (3)$$

式中, $\varphi$  为当地纬度,此处取 40°; $s$  为阴影系数; $\beta$  为倾角,此处取 35°; $L$  为方阵高度。计算得到方阵间距最小为 3 m(取整数)。

### 4.3 方位角及倾角的设计

#### 4.3.1 方位角

光伏系统的方位角是太阳能电池方阵实际朝向(即方阵垂直面)与正南方向之间的夹角,在同一倾斜角度下,不同的方位角光伏电池方阵平面接受的光照时间不同、接受的辐射总量不同,通常将光伏组件方阵朝向接受光照时间最长的方位角视为最佳方位角。在北半球,光伏组件朝正南方向时,组件接受的光照时间最长。因此,除了跟踪系统以外,一般最佳方位角选择正南方向,即光伏组件的方位角为 0°。

#### 4.3.2 固定倾角

通过 PV<sub>syst</sub> 软件,以全年辐射总量最大为标准进行优化设计,在倾角为 36° 时,光伏系统的相较最优损失为 0.0%,所以最佳倾角选取为 36°。

#### 4.3.3 朝向随季节可调

在朝向随季节可调的安装方式中,应基于夏季和冬季太阳不同的高度角作出相应调整。为了获取最大的光照辐射量,朝向随季节可调安装方式的倾斜角度应根据夏季和冬季不同的辐射总量进行优化,并根据 PV<sub>syst</sub> 软件设计确定光伏组件的倾角,即夏季为 20°,冬季为 50°。

#### 4.3.4 斜单轴跟踪系统

在这个方案中,安装轴最佳倾斜角依然选择 36°,安装轴的方位角为 0°;最小旋转角度和最大旋转角度的范围为 -60°~60°,中心间距为 0 m。

#### 4.3.5 双轴跟踪系统

双轴跟踪系统安装方式在工作方式上与斜单轴跟踪系统安装方式相似,由于是双轴工作,因此理论上比斜单轴的活动范围更大,发电量相对也会有所提升。但是安装操作方式相对更加复杂,成本也会更高。根据项目地点的地理条件,将双轴系统的倾角活动范围确定为 0°~80°,方位角的活动范围为 -120°~120°。

### 4.4 阴影遮挡分析

通过 PV<sub>syst</sub> 软件得到了不同安装方式光伏发电系统的等值阴影图,如图 3—图 7 所示。

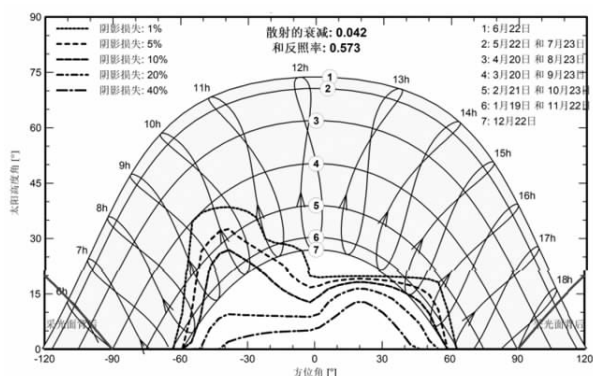


图 3 固定倾角安装方式等值阴影图

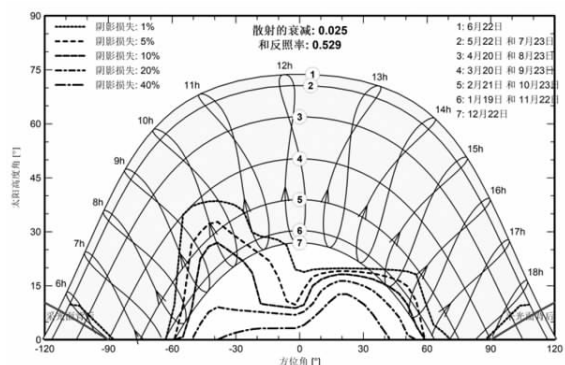


图 4 朝向随季节可调安装方式夏季等值阴影图

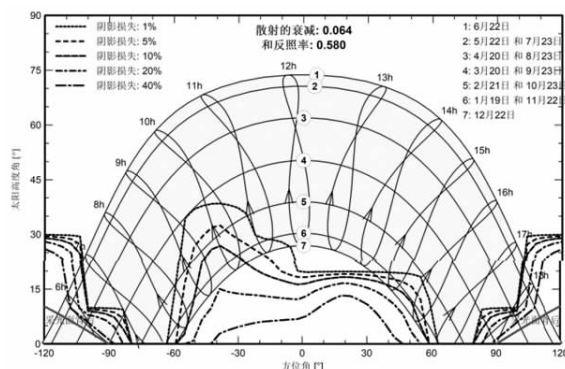


图 5 朝向随季节可调安装方式冬季等值阴影图

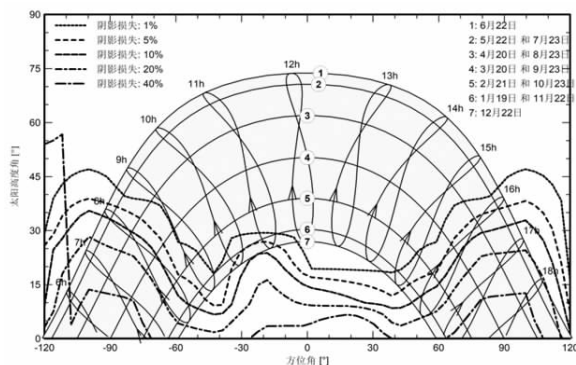


图 6 斜单轴跟踪系统安装方式等值阴影图

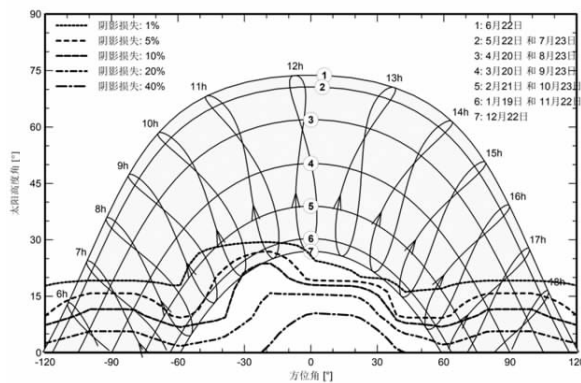


图 7 双轴跟踪系统安装方式等值阴影图

## 5 仿真结果及分析

### 5.1 年发电量对比分析

4 种安装方式所对应的单位发电量分别如图 8—图 11 所示。

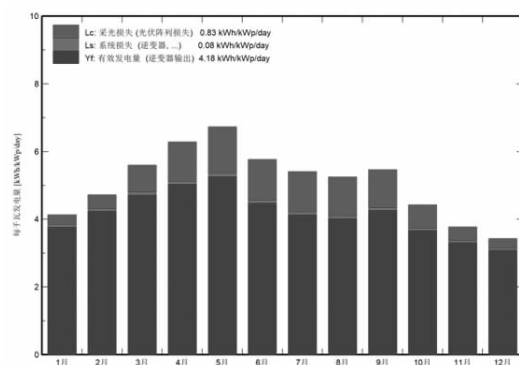


图 8 固定倾角安装方式单位发电量

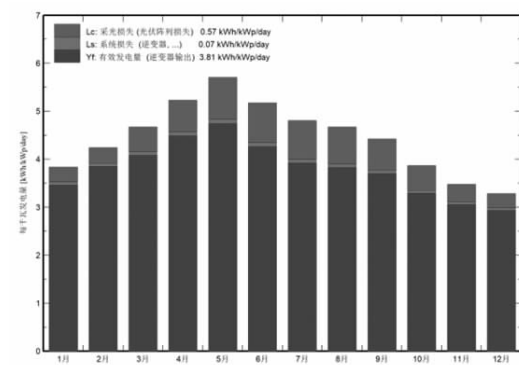


图 9 朝向随季节可调安装方式单位发电量

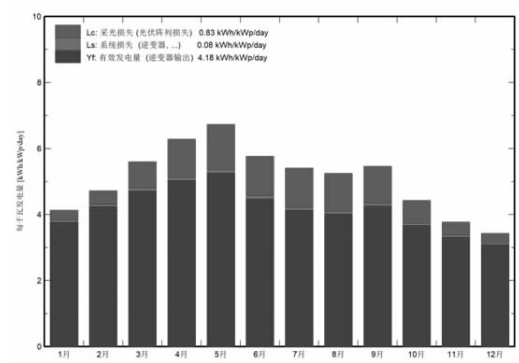


图 10 斜单轴跟踪系统安装方式单位发电量

从图 8—图 11 中可以看到,这 4 种安装方式的单位发电量在一年当中的 3—9 月份相对较高,其中 5 月份的发电量最高,这和光伏组件接收到的总辐射量正相关。对比不同安装方式光伏发电系统的有效发电量可知:双轴跟踪系

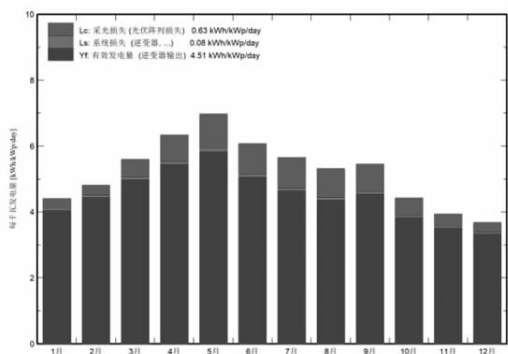


图 11 双轴跟踪系统安装方式单位发电量的有效发电量最高,为 4.51 kWh/kWp/d;斜单轴跟踪系统的有效发电量为 4.18 kWh/kWp/d,固定倾角和朝向随季节可调安装方式的有效发电量则分别为 3.62 kWh/kWp/d 和 3.81 kWh/kWp/d。

4 种安装方式的年发电量如表 3 所示。

表 3 4 种安装方式的年发电量

| 参数           | 固定<br>倾角 | 朝向随<br>季节可调 | 斜单轴<br>跟踪系统 | 双轴<br>跟踪系统 |
|--------------|----------|-------------|-------------|------------|
| 年发电量<br>/MWh | 13.28    | 12.75       | 15.12       | 16.22      |

双轴跟踪系统安装方式的年发电量最高,为 16.22 MWh,而朝向随季节可调安装方式的年发电量最低,仅为 12.75 MWh,二者相差 3.47 MWh;固定倾角安装方式的年发电量为 13.28 MWh,斜单轴跟踪系统安装方式的年发电量为 15.12 MWh。

## 5.2 环境效益评估

### 5.2.1 光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力(Potential Mitigation, PM)

温室气体的主要成分是 CO<sub>2</sub>,所以通常将其他温室气体折算成 CO<sub>2</sub> 当量,用减少了多少 CO<sub>2</sub> 当量来衡量减排温室气体的效果。

光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力是衡量光伏发电系统减少 CO<sub>2</sub> 排放量的一个重要指标。其定义是:给定的单位功率光伏发电系统输出的电能能够减少 CO<sub>2</sub> 排放的数量,也就是所安装单位功率(通常用 1 kW)光伏发电系统,在其寿命周期内所输出的电能相当于减少的 CO<sub>2</sub> 排放量。光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力除了与当地 CO<sub>2</sub> 排放因子有

关以外,还取决于光伏发电系统在当地的发电量。为了简化计算,通常不考虑电池本身效率的衰减,其计算公式为:

$$PM = E_{out} \cdot N \cdot EF。 \quad (4)$$

式中, $E_{out}$  为并网光伏发电系统年单位发电量, $N$  为寿命周期年数, $EF$  为 CO<sub>2</sub> 排放因子。

由于太阳能电池片制造过程中也要消耗能量,产生温室气体,因此,应该扣除能量偿还时间内的 CO<sub>2</sub> 排放量,公式修正为:

$$PM = (E_{out} \cdot N - 2\,525) \cdot EF。 \quad (5)$$

平均 CO<sub>2</sub> 排放因子取 0.6 kg/kWh,光伏发电系统的使用寿命按 30 年计算。根据公式得到 4 种不同安装方式的发电系统光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力,如表 4 所示。

表 4 不同安装方式光伏系统的光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力

| 参数                                            | 固定<br>倾角 | 朝向随<br>季节可调 | 斜单轴<br>跟踪系统 | 双轴<br>跟踪系统 |
|-----------------------------------------------|----------|-------------|-------------|------------|
| 年单位发电量<br>/(kWh · kWp <sup>-1</sup> )         | 1 341    | 1 287       | 1 527       | 1 639      |
| PM<br>/(tCO <sub>2</sub> · kW <sup>-1</sup> ) | 22.6     | 21.7        | 26.0        | 28.0       |

由表 4 数据得知,在整个寿命周期内,光伏减排 CO<sub>2</sub> 潜力以双轴跟踪系统效果最好,每安装 1 kW 光伏发电系统,就可以减少 CO<sub>2</sub> 排放 28.0 t。

### 5.2.2 其他污染物的减排效果

我国发电燃料主要以燃煤为主,火力发电过程中会产生大量污染环境的气体 and 粉尘。依据孙可<sup>[7]</sup>的研究,以国内电厂的平均能耗为参照,光伏发电系统每发 1 kWh 电,可减少污染排放 8.556 g SO<sub>2</sub>, 3.803 g NO<sub>x</sub>, 0.124 g CO 和 0.190 g TSP;每发 1 kWh 电,可减少使用标准煤 298 g。据此可以得到该光伏系统在寿命周期内污染物减排量数据,如表 5 所示。

## 6 结语

楼顶分布式光伏系统的开发利用能够有效节约土地,并且能够较大幅度地减少温室气体和污染物的排放,对保护环境有促进作用,有助于碳达峰和碳中和的实现。(下转第 70 页)

- 2018(3):23-32.
- [29] 纪同辉. 企业社会责任信息影响股价波动的传导机制研究[J]. 财会通讯, 2020(4): 87-89.
- [30] ATIF M, ALI S. Environmental, social and governance disclosure and default risk[J]. Business Strategy and the Environment, 2021, 30(8): 3937-3959.
- [31] FENG Z F, WU Z H. ESG disclosure, REIT debt financing and firm value[J]. The Journal of Real Estate Finance and Economics, 2023, 67(3): 388-422.
- [32] 黄少安, 邢宇, 杨晨姊. 机构投资者的异质性及其对股票市场的影响[J]. 经济纵横, 2022(8): 107-118.
- [33] 程昕, 杨朝军, 万孝园. 机构投资者、信息透明度与股价波动[J]. 投资研究, 2018, 37(6): 55-77.
- [34] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004(5): 614-620.
- [35] 方先明, 冯翔宇. 股指期货交易政策调整能否影响现货市场波动率[J]. 中国经济问题, 2021(4): 188-200.
- [36] 王瑶, 张允萌, 侯德帅. 企业 ESG 表现会影响审计意见吗? [J]. 审计与经济研究, 2022, 37(5): 54-64.
- [37] 戴鹏毅, 杨胜刚, 袁礼. 股票流动性如何影响全要素生产率? 兼论资本市场的资源配置功能和市场化、法治化发展[J]. 统计研究, 2022, 39(9): 62-73.
- [38] 徐光华, 卓瑶瑶, 张艺萌, 等. ESG 信息披露会提高企业价值吗? [J]. 财会通讯, 2022(4): 33-37.
- [39] 黄勃, 李海彤, 江萍, 等. 战略联盟、要素流动与企业全要素生产率提升[J]. 管理世界, 2022, 38(10): 195-212.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第 42 页)

表 5 不同安装方式光伏发电

| 污染物             | 系统的污染物减排数据 |             |             |            | t |
|-----------------|------------|-------------|-------------|------------|---|
|                 | 固定<br>倾角   | 朝向随<br>季节可调 | 斜单轴<br>跟踪系统 | 双轴<br>跟踪系统 |   |
| SO <sub>2</sub> | 3.41       | 3.27        | 3.88        | 4.16       |   |
| NO <sub>x</sub> | 1.52       | 1.45        | 1.73        | 1.85       |   |
| TSP             | 0.08       | 0.07        | 0.09        | 0.09       |   |
| 标准煤             | 118.72     | 113.99      | 135.17      | 145.01     |   |

本文以装机容量为 9.9 kW 的并网光伏发电系统为例, 分别对 4 种不同安装方式的光伏发电系统进行了仿真设计和分析, 对比了年发电量及 CO<sub>2</sub> 和其他污染物的减排量。对于装机规模更大的光伏电站, 发电量以及 CO<sub>2</sub> 和其他污染物的减排效果差距会更明显。对于固定倾角安装方式的光伏发电系统, 虽然发电量等数据比跟踪系统的要低, 但由于其安装方便, 运行和维护成本较低, 因此目前应用比较普遍。跟踪式光伏发电系统年发电量最高, 但是维护成本高, 随着相关技术的不断突破和可靠性的不断提高, 跟踪式光伏发电系统未来将有更加广阔的前景。

## 参考文献:

- [1] 杜文强, 刘雄飞, 张超. 基于 PVsyst 的某高校 20 kW 光伏电站仿真与分析[J]. 应用能源技术, 2021, 277(1): 52-55.
- [2] 赵星竹. 屋顶并网光伏发电系统优化设计与验证[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2019.
- [3] 韩国栋, 胡兰平, 杨富程, 等. 不同安装方式光伏发电系统辐射量计算分析[J]. 云南电力技术, 2017, 45(3): 8-10.
- [4] 吕丹, 买发军, 姚一波. 基于 PVsyst 的斜单轴光伏跟踪系统倾角及发电量计算[J]. 太阳能, 2017, 280(8): 14-17.
- [5] 李全林. 新能源与可再生能源[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 200-252.
- [6] 杨记鑫, 胡伟霞, 赵杰. 基于 PVsyst 的家用并网光伏系统优化研究[J]. 电工技术, 2021, 550(16): 35-37.
- [7] 孙可. 几种类型发电公司环境成本核算的分析研究[J]. 能源工程, 2004(3): 23-26.

(责任编辑:白丽娟)