

BIPV 系统斜面总辐照量计算及发电量估算*

崔琼^{1,2,3†}, 舒杰^{1,2,3}, 吴志锋^{1,2,3}, 黄磊^{1,2,3}, 丁建宁⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

摘要: 目前, 用于光伏发电预测的物理模型中, 斜面总辐照量参数的获取普遍采用通用斜面总辐照量公式, 当用于含多安装角度的建筑集成光伏 (BIPV) 系统时, 因其含有多参数、多级算式, 导致计算过程繁琐, 误差偏大。本文分析了不同地理位置最佳倾角、同一地理位置不同倾角、方位角对斜面辐照量的影响。在此基础上, 提出了一种考虑 BIPV 系统各安装角度的系统斜面总辐照量计算方法, 该方法较通用的斜面总辐照量公式简单、准确度高; 讨论了该方法用于物理模型进行 BIPV 系统发电量估算的思路, 通过工程试验数据对比, 验证了本估算方法的优越性。

关键词: BIPV 系统; 斜面总辐照量; 安装角度; 发电量估算

中图分类号: TK511

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.05.008

Calculation of Total Surface Radiation and Estimation of Power Generation for BIPV System

CUI Qiong^{1,2,3}, SHU Jie^{1,2,3}, WU Zhi-feng^{1,2,3}, HUANG Lei^{1,2,3}, DING Jian-ning⁴

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;
4. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Jiangsu Changzhou 213164, China)

Abstract: Currently, the general bevel total radiation calculation formula is traditionally used in PV system, but the deviation is large when applied in building integrated photovoltaic (BIPV) system which includes several parameters, and multilevel calculation because of the multiple installation angles. In this paper, we analyzed the different factors that influence the total surface radiation calculation in BIPV. Then we concluded and proposed a novel formula that consider the inclination angle change in calculating total radiation. Compared with traditional formula, the novel one is more simplified and presents higher accuracy. Moreover, the concept of physical model in conducting BIPV system was profoundly discussed. Finally, the superiority of this novel method was verified in a project implementation.

Key words: BIPV system; total surface radiation; installation angle; power generation estimation

0 引言

由于光伏组件生产成本高和转换效率低, 导致光伏发电系统的投资成本远高于常规的化石能源发电系统, 严重限制了光伏系统的普及应用。为了降低系统成本、提高系统效率, 研究人员从组件材料、系统优化等角度进行了广泛的探索。一种将光伏发电系统与建筑有机结合在一起的建筑集成光伏

(building integrated photovoltaic, BIPV) 系统受到了重点关注。BIPV 系统不需要额外占用土地资源, 并且可同时利用组件的电气属性和材料属性, 从而能够有效降低系统成本, 缩短投资回收期, 已成为城市大规模应用光伏发电系统的重要研究和发展方向^[1-3]。在 BIPV 系统设计初期, 发电量预测对于经济效益和社会效益的评估具有至关重要的意义, 是光伏系统前期投资决策的重要参考依据^[4-5]。

* 收稿日期: 2016-08-18

修订日期: 2016-09-08

基金项目: 广东省自然科学基金 (2014A030310191); 2014 年度广东省协同创新与平台环境建设项目 (2014B040404002); 佛山市院市合作项目 (2014HK100051); 广州市创新平台与共享项目 (重点实验室) (201509010018)

† 通信作者: 崔琼, E-mail: ciqg0716@163.com

目前, 光伏系统发电量预测的方法主要有以下三种^[6-8]: 通过长期现场实验, 基于历史气象数据、气象要素和历史发电数据的统计方法; 基于太阳总辐照数据、发电站坐标、周围环境和系统效率的物理方法; 基于 RETScreen、PVsyst 等光伏设计软件的模拟估算法。其中, 统计方法^[9-15]针对的是已投运的光伏系统, 并且预测时间尺度短, 超过 4 h 的预测误差大。物理方法^[16-18]又可以细分为电子元件模型法、简单物理模型法、复杂物理模型法, 其优点是不需要历史运行数据; 缺点是需要太阳能辐照预报的准确数据、发电站坐标及其系统效率等数据。光伏系统设计软件模拟估算法, 在应用到 BIPV 建筑的发电量预测时, 因其考虑单一安装角度因素, 显得不够全面^[19-20]; 同时, 现有文献^[21-23]针对光伏发电系统进行发电量预测时, 大多只考虑组件安装倾角对组件斜面辐照量的影响, 而方位角一般默认为 0°。

本文基于 Meteonorm 数据, 分析了最佳倾角、不同安装地理位置, 以及不同倾角、同一安装地理位置时, 方位角对斜面辐照量的影响程度。首次提出了一种考虑 BIPV 系统各安装角度的系统斜面总辐照量计算方法, 并论述了该方法用于物理模型进行发电量预测的计算思路。通过与工程试验数据对比, 验证了本计算方法较光伏系统设计软件的优越性。本文对提升建筑光伏系统的设计水平和投资估算准确度具有重要参考意义。

1 不同安装区域和安装角度的光伏组件斜面辐照量分析

光伏系统的发电量预测与系统斜面总辐照量关系密切。系统斜面总辐照量的影响因素包括安装地理位置以及组件的安装角度。

1.1 不同安装区域、最佳倾角时, 辐照量与方位角的相关性

不同安装地理位置, 以各自最佳倾角安装时, 斜面辐照量变化受方位角变化的影响程度不同。本文选择了 9 个城市, 具体城市信息见表 1。

针对表 1 中的 9 个城市, 对方位角从 -90° ~ 90° 变化时 (正东为 90°, 正西为 -90°) 的 170 组年辐照量数据进行分析, 以最佳倾角安装, 当方位角发生变化时, 不同地区的辐照量变化情况见图 1。

表 1 所选城市的地理位置及其光伏组件安装倾角

Table 1 Information of the selected cities

城市	纬度 / °	经度 / °	最佳倾角 / °
敦煌	40.13	94.71	41
银川	38.47	106.27	39
西宁	36.56	101.75	38
天津	39.10	117.20	36
兰州	36.04	103.51	33
昆明	25.05	102.73	31
西安	34.17	108.57	29
广州	23.16	113.23	20
贵阳	26.56	106.71	19

注: 最佳倾角为组件正南安装时斜面最大辐照量所对应的倾角。

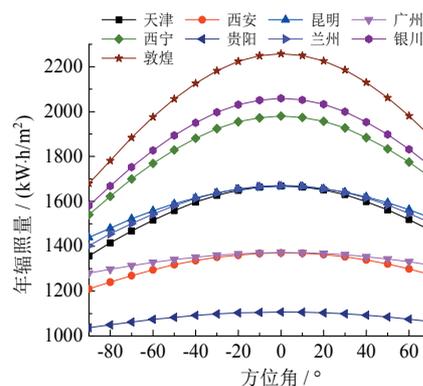


图 1 不同城市光伏组件方位角对斜面辐照量的影响

Fig. 1 Influence of the azimuth angle of PV modules on the surface radiation in different cities

由图 1 可以得出如下结论:

(1) 方位角朝东、朝西变化, 辐照量的变化趋势相同。

(2) 不同安装地理位置, 以方位角为 0° 为基准, 随着方位角的逐渐变大, 辐照量的减小速率增大。

(3) 辐照量随方位角变化而变化的速率, 与最佳倾角的大小相关性强, 与地理位置的经度、纬度相关性弱。最佳倾角越大, 辐照量变化速率越大; 最佳倾角越小, 辐照量变化速率越小。

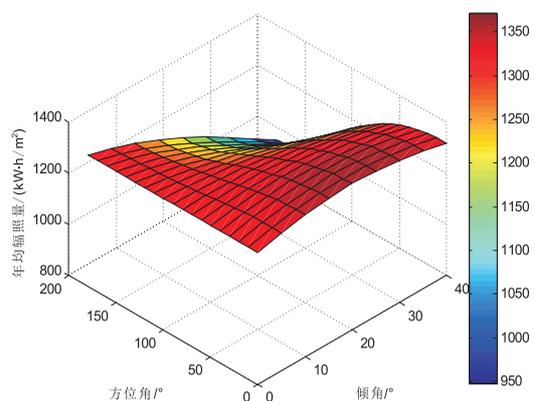
(4) 方位角对系统斜面辐照量的影响程度最大达 25%, 最小 6%, 因此, 在斜面辐照量估算中, 特别是在最佳倾角较大的区域, 方位角的影响不可忽视。

1.2 同一安装区域、不同倾角时, 辐照量与方位角的相关性

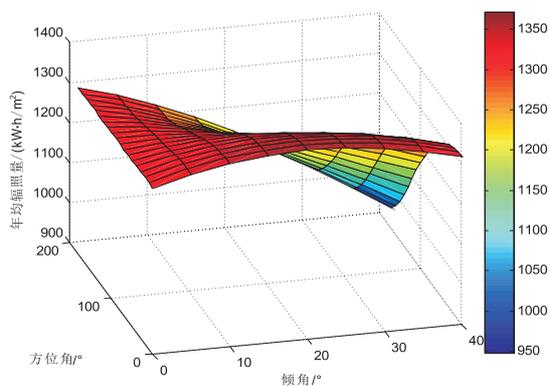
因光伏组件和建筑物结合方式的不同, 导致同一 BIPV 系统中, 相同光伏组件、不同安装角度的

光伏阵列,接收的太阳能辐照量也不同。以广州市为例,分析不同安装倾角时,方位角对辐照量的影响情况。

据前节分析,方位角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $0^\circ \sim -180^\circ$ 时变化趋势相同。本文基于 Meteonorm 气象数据,利用 MATLAB 软件,对与倾角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 和方位角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 相对应的 200 组年辐照量数据进行了挖掘分析。选取合适的视觉角度,更加清晰的展示年均辐照量随安装角度变化趋势。



(a) 视觉角度: $(-45^\circ, 30^\circ)$



(b) 视觉角度: $(-15^\circ, 30^\circ)$

图 2 年均辐照量随安装角度变化趋势(方位角 $0^\circ \sim 180^\circ$)

Fig. 2 The variation trend of annual radiation dose with installation angle (azimuth angle $0^\circ \sim 180^\circ$)

由图 2 可以看出:(1)随着倾角的增大,组件斜面辐照量受方位角的影响程度越大,即方位角越大,组件斜面辐照量衰减的速率越大。(2)随着方位角的增大,其最佳倾角也不同。方位角 $0^\circ \sim 70^\circ$ 之间,最佳倾角范围在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间,变化不明显;从方位角 80° 开始到 180° ,随着倾角的增大,组件斜面辐照量呈递减趋势,即最佳倾角为 0° 。

2 光伏系统发电量计算

现有的光伏系统设计软件,应用到光伏板为平行列阵形分布的大型集中并网式发电预测时,具有较准确的参考价值。随着 BIPV 的出现,不管是与建筑外立面相贴合的光伏构件,还是作为建筑材料的一体化光伏组件,因其与建筑的结合方式复杂,分析各组件的斜面辐照量也变得越发复杂,仅用光伏系统设计软件进行 BIPV 系统发电量预测已经不能满足误差要求。因此本文针对 BIPV 系统,提出了一种用于发电量估算的系统斜面总辐照量计算方法。

2.1 BIPV 系统斜面总辐照量计算

目前,物理方法关键是利用气象数据服务器进行太阳总辐射预报,投资购买气象站数据或者安装场内气象采集设备,在光伏系统的前期决策设计阶段不现实。因此,其中的斜面总辐照量参数获取一般采用通用的斜面总辐照量计算公式^[5]:

$$H_T = H_{BR} + H_{DR} + H_{RT} \quad (1)$$

式中: H_T 为倾斜面总辐照量; H_{BR} 为倾斜面直接辐照量; H_{DR} 为倾斜面天空散射量; H_{RT} 为倾斜面地面反射量。上述变量又涉及由二级算式求取,同时反射系数取值为估算值。因其含有多参数、多级算式,当用于含多安装角度的 BIPV 系统时,计算量大,过程繁琐,误差偏大。因此,通用的斜面总辐照量计算公式不适用于计算 BIPV 系统的斜面总辐照量。

本文考虑多影响因素(安装位置、倾角和方位角),基于 Meteonorm 数据库,得到不同安装条件下的光伏组件斜面辐照量,进而提出一种 BIPV 系统斜面总辐照量的计算方法,过程简便。

以光伏组件和建筑物结合形式中的光伏屋顶为例,计算参数见表 2。

表 2 系统斜面总辐照量计算参数

Table 2 Calculation parameters of the total surface radiation for PV roof

屋顶类型	方位角 A	铺设面积 s	组件斜面辐照量 H	
			沿屋面坡度平铺	最佳倾角铺设
双坡屋顶	\bar{A}_i	\bar{s}_{i1}	\bar{H}_{i1}	\bar{H}_{zi1}
	$-(180 - \bar{A}_i)$	\bar{s}_{i2}	\bar{H}_{i2}	\bar{H}_{zi2}
单坡屋顶	\bar{A}_j	\bar{s}_j	\bar{H}_j	\bar{H}_{zj}
平屋顶	0	\bar{s}_k	\bar{H}_k	\bar{H}_{zk}

注: 光伏墙体以及其他形式的辐照量计算方式同单坡屋顶。

\bar{A}_i 、 $-(180-\bar{A}_i)$ 分别是双坡屋顶两个坡面的方位角, $0^\circ < \bar{A}_i < 180^\circ$; \bar{A}_j 是单坡屋顶的方位角, $-180^\circ < \bar{A}_j < 180^\circ$, 按顺时针方向旋转与正南方向的夹角大于零, 反之小于零; \bar{S}_{i1} 、 \bar{S}_{i2} 、 \bar{S}_j 、 S_k^* 分别是双坡屋顶两个坡面、单坡屋顶、平屋顶的组件铺设面积; \bar{H}_{i1} 、 \bar{H}_{i2} 、 \bar{H}_{zi1} 、 \bar{H}_{zi2} 、 \bar{H}_j 、 \bar{H}_{zj} 、 H_k^* 、

H_{zk}^* 是不同铺设方式、不同屋顶的斜面辐照量。

设一 BIPV 系统含有 m 个双坡屋顶, n 个单坡屋顶, t 个平屋顶, 根据表 2 中的系统斜面总辐照量计算参数, 即 $i \in [1, m]$ 、 $j \in [1, n]$ 、 $k \in [1, t]$, 建立不同安装条件下组件斜面辐照量的分段连续函数 $H(s)$:

$$H(s) = \begin{cases} \bar{H}_{11}, s \in [0, \bar{S}_{11}] \\ \bar{H}_{12}, s \in [\bar{S}_{11}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12}] \\ \vdots \\ \bar{H}_{m1}, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2} + \bar{S}_{m1}] \\ \bar{H}_{m2}, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2} + \bar{S}_{m1}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2} + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2}] \\ \vdots \\ \bar{H}_1, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2} + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{(m-1)1} + \bar{S}_{(m-1)2} + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1] \\ \vdots \\ \bar{H}_n, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_{n-1}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_{n-1} + \bar{S}_n] \\ H_1^*, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_{n-1} + \bar{S}_n, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_{n-1} + \bar{S}_n + \bar{S}_1] \\ \vdots \\ H_t^*, s \in [\bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_n + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_{t-1}, \bar{S}_{11} + \bar{S}_{12} + \dots + \bar{S}_{m1} + \bar{S}_{m2} + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_n + \bar{S}_1 + \dots + \bar{S}_t] \end{cases} \quad (2)$$

根据牛顿-莱布尼茨公式, 对分段连续函数 $H(s)$ 进行定积分:

$$E = \int H(s) ds = \sum_{i=1}^m (\bar{S}_{i1} \bar{H}_{i1} + \bar{S}_{i2} \bar{H}_{i2}) + \sum_{j=1}^n \bar{S}_j \bar{H}_j + \sum_{k=1}^t S_k^* H_{zk}^* \quad (3)$$

其中:

$$S = \sum_{i=1}^m (\bar{S}_{i1} + \bar{S}_{i2}) + \sum_{j=1}^n \bar{S}_j + \sum_{k=1}^t S_k^* \quad (4)$$

则有:

$$H_A = \frac{E}{S} \quad (5)$$

式中: E 为某一时间段内的系统逐时直流发电量理想值; S 为系统组件总铺设面积; H_A 为系统斜面总辐照量, 即为日峰值小时数或月峰值小时数或年峰值小时数。

以广州市南沙区一工业园 12 MWp 屋顶光伏发电项目为例, 有四个厂房屋顶, 屋顶坡度为 20° , 沿屋顶坡度铺设光伏组件, 即组件的安装倾角为 20° 。

据卫星地图, 各有四分之一屋面的方位角分别为 45° 、 -135° 、 135° 、 -45° 。根据本文提出的 BIPV 系统斜面总辐照量的计算方法进行计算, 结果见表 3。

表 3 光伏组件不同朝向时的月辐照量
Table 3 The monthly average radiation of PV modules at different installation orientations

月份	不同方位角的组件斜面 月均辐照量/(kW·h/m ²)				系统斜面月 均辐照量/ (kW·h/m ²)
	45°	-135°	135°	-45°	
1	105.09	82.46	73.16	105.08	91.45
2	78.40	58.52	58.80	78.12	68.46
3	78.12	65.10	65.41	78.10	71.69
4	86.42	81.60	81.90	86.40	84.07
5	114.70	113.15	113.15	111.60	113.15
6	117.00	127.80	127.80	117.00	122.40
7	142.91	131.75	131.75	142.90	137.33
8	139.50	133.61	134.23	139.40	136.71
9	132.02	117.30	117.30	132.00	124.65
10	134.85	93.31	93.31	134.84	114.08
11	111.00	75.00	75.00	111.00	93.00
12	112.20	75.02	75.02	112.18	93.62

2.2 光伏发电系统效率分析

光伏系统综合效率主要与光伏系统的设备效率及损耗有关,具体不同影响因素的修正系数,因系统所在环境的差别,取值有所不同^[19]。本项目各损

失因素取值可参照表 4。

综上所述,光伏系统综合效率为:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \quad (6)$$

表 4 影响光伏系统综合效率的因素修正值

Table 4 Factor correction value affecting the efficiency of PV system

光伏系统综合效率 η 的影响因素	修正值	相关
组件串、并联匹配损失	0.95~0.98	电池性能的不均一性
光伏阵列能量转换与传输 损失效率 η_1	0.95~0.98	阴影遮挡
组件表面污染	0.96~0.98	灰尘或者积水
组件转换效率	0.97~0.99	温度影响、组件功率衰减
逆变器效率 η_2	0.97~0.985	额定条件下逆变器的输出交、直流功率之比
集电线路损耗 η_3	0.97~0.98	线损
升压变压器损耗 η_4	0.97~0.985	逆变器到高压电网传输效率
光伏发电系统可用率 η_5	0.95~0.98	与故障停用和检修小时数有关

2.3 光伏系统发电量计算

基于本文提出的 BIPV 系统斜面总辐照量计算方法,利用物理法进行发电量预测。其典型的物理模型包括^[24-27]:

$$P_d(t) = S \cdot H_A \cdot \eta \quad (7)$$

$$E_p = \int P_d(t) dt, \text{ 或者 } E_p = H_A \cdot C \cdot \eta / E_s \quad (8)$$

式中: P_d 为直流输出功率; E_p 为光伏系统发电量, C 为组件安装容量; E_s 为标准条件下的辐照度,常数, $1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$; η 为综合效率系数。

由此估算广州市南沙区一工业园 12 MWp 屋顶光伏电站的首年各月发电量见表 5。

表 5 首年各月发电量估算值

Table 5 Estimated value of power generation in each month of the first year

月份	月发电量 / kW·h
1	855 972
2	640 786
3	670 995
4	786 942
5	1 059 084
6	1 145 664
7	1 285 409
8	1 279 606
9	1 166 724
10	1 067 789
11	870 480
12	876 283

3 工程验证对比分析

利用典型物理模型(基于通用的斜面总辐照量计算公式)、RETScreen 和 PVsyst 光伏系统设计软件,对系统进行发电量模拟计算的结果略有差异,但各月变化整体趋势一致,全年平均误差率相差不大^[28]。为了验证本文计算思路的可行性,以及斜面总辐照量计算方法的准确性,图 3 将广州南沙该工业园屋顶光伏电站 2015 年全年各月发电量数据与本文计算结果、光伏设计软件模拟计算结果进行对比。据上文分析,当倾角一定时,相差 180° 的方位角所对应的辐照量几乎一致。因此,只选择安装方位角分别为 45° 和 -135° 时的光伏设计软件模拟结果进行对比分析。对于实例电站中的其他方位角 -45° 和 135° 的模拟结果,不在图中进行对比显示。理论计算与光伏设计软件皆设置倾角为 20° 。

本文理论计算值和文献软件设计模拟值与电站实测值的全年平均误差率分别为 5% 和 10%。由图中也可看出,理论计算值与实测值更接近,几乎每个月都高于软件设计输出的发电量数据。这也从侧面验证了本文所提出的系统斜面总辐照量计算方法优于通用的斜面总辐照量计算公式。对于理论计算值,在 4 月、11 月、12 月份的误差率偏高,原因主要是:本文进行发电量估算时所采用的系统倾斜面辐照量计算方法,使用的 Meteonorm 数据是以 50 年区域观测数据为基础统计而得到,是从多年的气象数据中挑

选出历年发生频率高、并对未来具有很好预测性的、真实发生过的、具有代表性的太阳辐射数据。而多年的典型代表值与某一年实测值之间存在偏差,如2015年11月、12月广州出现了历史罕见的冬季暴雨过程,全市平均月雨日为14.8天,是常年同期的3.6倍,为历史同期最多,因此会出现少数月份理论计算值误差偏高的现象。

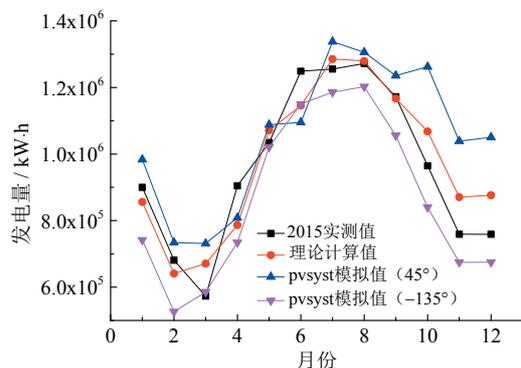


图3 发电量对比

Fig. 3 The comparison of power generation data from different methods

4 结论

在最佳倾角较小的区域,当安装的倾角较小时,方位角对系统斜面辐照量的影响程度也小,在误差允许的范围内,为了方便计算,可以不予考虑;反之,在最佳倾角较大的区域,当安装的倾角较大时,方位角的影响不可忽略。本文提出一种BIPV系统斜面的总辐照量计算方法,用于BIPV系统发电量估算,计算简便,结果比较准确。通过实例验证表明:发电量计算结果与实测值相比,全年平均误差率远低于光伏设计软件模拟值;逐月值几乎也都优于软件设计模拟输出结果,证明了计算方法的优越性。此方法可用于所有光伏系统全寿命周期内的任何阶段,特别适用于前期规划设计阶段的BIPV系统。

参考文献:

[1] 刘邦银,蔡涛,段善旭. 建筑集成光伏的发展概述[J]. 高科技与产业化, 2009(3): 104-106. DOI: 10.3969/j.issn.1006-222X.2009.03.030.

[2] 赵西安. 我国光伏建筑的进展[J]. 中国建筑金属结构, 2010(1): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3362.2010.01.014.

[3] 王兆宇,艾芊. 太阳能光伏建筑一体化技术的应用分析[J]. 华东电力, 2011, 39(3): 477-481.

[4] 徐静,陈正洪,唐俊,等. 建筑光伏并网发电系统的发电量预测初探[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 81-85.

[5] 王鸿运,王伟,梁勃. 光伏并网系统设计中发电量计算研究[J]. 太阳能, 2015(2): 35-38, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2015.02.009.

[6] 邓雅,胡书举,孟岩峰,等. 光伏发电系统功率预测研究方法综述[J]. 电气制造, 2013(6): 50-53.

[7] 秦俊举. 光伏发电功率预测方法的研究[D]. 成都: 西华大学, 2014.

[8] 崔洋,孙银川,常倬林. 短期太阳能光伏发电预测方法研究进展[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1474-1481.

[9] 黄敏敏,颜文俊. 基于遗传算法优化神经网络的光伏发电预测[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1509-1512. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.023.

[10] 康洪波,刘瑞梅,侯秀梅. 基于神经网络光伏发电预测模型的研究[J]. 电源技术, 2013, 37(3): 447-449. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2013.03.035.

[11] 李洪珠,贾威,聂苓,等. 基于鲁棒LS-SVM在光伏发电预测中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(5): 1166-1167, 1170. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4598.2013.05.019.

[12] 杨德全. 基于神经网络的光伏发电系统发电功率预测[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2014.

[13] 傅美平,马红伟,毛建容. 基于相似日和最小二乘支持向量机的光伏发电短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2012.16.011.

[14] 董雷,周文萍,张沛,等. 基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 38-45.

[15] 赵唯嘉,张宁,康重庆,等. 光伏发电出力的条件预测误差概率分布估计方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 8-15. DOI: 10.7500/AEPS20141017007.

[16] 卢冬冬,郑蕾燕,袁言周,等. 基于天气预报的光伏发电预测研究[J]. 硅谷, 2014(15): 43-44, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7597.2014.15.040.

[17] 海涛,闻科伟,周玲,等. 基于气象相似度与马尔科夫链的光伏发电预测方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(6): 1452-1460. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2015.1452.

[18] 袁晓玲,施俊华,徐杰彦. 计及天气类型指数的光伏发电短期出力预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 57-64.

[19] 易旷怡. 太阳能光伏建筑一体化协同设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[20] 龙承潮. 建筑用光伏发电量精确预测方法与光伏组串优化设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.

[21] 刘伟铭. 光伏发电系统最大发电量的研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.

[22] 江娥. 武汉市光伏组件安装的最佳倾角分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015.

[23] 易旷怡. 太阳能光伏建筑一体化协同设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏发电站设计规

- 范: GB50797—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [25] 李芬, 陈正洪, 成驰, 等. 太阳能光伏发电量预报方法的发展[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 136-142. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.010.
- [26] MAYER D, WALD L, POISSANT Y, et al. Performance prediction of grid-connected photovoltaic systems using remote sensing[EB/OL]. (2008-03) [2013-01-09]. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/68/25/PDF/7BAE9F5Bd01.pdf>.
- [27] KNOWE G E V, ZACK J W, MEADE D, et al. Using regime based MOS to adjust solar power production forecasts[C]. Phoenix, AZ: ASES Solar, 2010.
- [28] 王嘉媛, 尚可政, 王式功, 等. 甘肃河西太阳能光伏组件最佳倾角及辐射量研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(15): 1757-1764. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2015.15.005.

作者简介:

崔 琼 (1982-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事微电网发电预测、调度控制等研究。

舒 杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事可再生能源及微电网技术研究。

吴志锋 (1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事微电网调度控制技术研究。

黄 磊 (1986-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事可再生能源发电预测、微电网仿真技术和能量管理研究。