

太阳能光伏电站参数联合优化及应用*

沈 娜[†], 郭长兴, 韩凤琴

(华南理工大学广州学院, 广州 510800)

摘 要: 太阳能光伏发电及应用是当前的一大研究热点。太阳能电站设计以往多采用经验值, 现在开始要求最佳设计, 未来将追求更个性化的设计。本文针对光伏发电系统发电量最大化、设计个性化的要求, 开展了光伏电站多参数相互关联优化的研究, 进行了电站的应用设计及运行。基于太阳辐射量最大的原则探讨了不同纬度光伏方阵的最佳倾角和方位角的组合, 并开展了参数联合优化设计、相关预测及实验研究。获得高度相关的优化曲面、曲线及大数据群, 可为太阳能光伏电站的优化设计及运行提供技术支持。

关键词: 太阳能利用; 光伏电站; 联合优化; 实验研究

中图分类号: TK519

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.06.010

Parameter Joint Optimization and Application for Photovoltaic Power Plant

SHEN Na, GUO Chang-xin, HAN Feng-qin

(Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800)

Abstract: The research and application for solar photovoltaic power generation is a hot research spot in current. In the past, the design of solar power plants often used experience data; now solar power plants start asking for the optimized design; it will pursue more personalized design in the future. Aiming at maximum power output and personalized design of the grid photovoltaic power generation system, a multi-parameter correlated optimization study for the photovoltaic power station was carried out, and a personalized application design and operation of an actual power station was proceeded. The optimal combination of tilt angle and azimuth angle for photovoltaic cell components at different regions based on the principle of maximum solar radiation was investigated, and the design of parameter joint optimization, related prediction and experimental research were performed. The highly relevant optimization of curved surface, curve and the big data group obtained in this work may provide technical support for optimization design and operation for photovoltaic power generation.

Key words: solar energy utilization; photovoltaic power plant; joint optimization; experimental research

0 引 言

近年来, 随着科技的进步和人们对发展新能源认识的不断提高, 各国政府采取了多种扶持政策, 使得光伏发电系统应用的规模得到了迅速发展^[1]。提高光伏电站的性能是业界追求的热点, 而太阳辐照量是影响光伏电站发电量的一个主要因素, 光伏电站方阵的倾斜角及方位角对太阳辐照量起着至关重要的作用。研究学者们利用不同的理论方法得到了光伏阵列的最佳倾角^[2-5], 并论述了光伏阵列方位

角对系统性能的影响^[6-9]。BUSHNELL 等^[10]认为在北半球, 光伏阵列的安装倾角等于当地纬度, 方位角亦多建议正南向安装。现在太阳能光伏发电正处于井喷时代, 个性化设计要求、提高出力效率要求呼声很高, 上述设计理念已经很难满足应用市场的要求, 合理性亦受到了挑战。当前业界对电池方阵的安装倾角、方位角等多参数相互关联设计、出力的提高提出了更高的要求, 个性化设计成为必然。为了检验光伏电站设计效果, 需找到当地纬度下倾角与方位角的最佳配合, 以使光伏电站具有最大

* 收稿日期: 2017-09-27

修订日期: 2017-11-17

基金项目: 广东省普通高校特色创新类项目 (55-CQ1700007); 广东省特色重点学科建设项目 (55-CQ1700003)

[†] 通信作者: 沈 娜, E-mail: shenna@gcu.edu.cn

的辐照量或最大出力。本文采用精度较高的天空散射各向异性模型计算太阳能方阵倾斜面任意倾斜角和方位角下的辐射量, 基于太阳辐射量最大原则预测了太阳能光伏方阵的最佳倾角和方位角的组合。以广东鹤山一示范电站为研究对象进行了参数联合优化设计、运行及相关的实验研究, 该电站按优化设计参数进行安装, 投入运行后将电站的实测结果与预测结果进行了比较。

1 光伏电站倾斜面上的辐照量计算

1.1 光伏电站辐照量的计算模型

光伏方阵倾斜面辐照量是光伏电站发电量的重要影响因素, 正确计算辐照量尤为重要。倾斜面的辐照量可分为天空各向同性模型和天空各向异性模型。天空各向同性模型于1963年由LIU和JORDAN提出^[11], 该模型虽然计算比较方便, 但并不精确。环绕太阳的散射辐射和倾斜面上的地面亮度并不是各个方向都是相同的。后来HAY、DAVIES、KLUCHER、RCINDL等提出了改进的天空散射各向异性模型, 最后综合成为HDKR模型^[11], 在倾斜面上的太阳小时总辐照量可用下式计算:

$$I_T = (I_b + I_d A_1) R_b + I_d (1 - A_1) \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

式中: I_b 为水平面上的小时太阳直射辐照量, MJ/m^2 ; I_d 为水平面上的小时太阳散射辐照量, MJ/m^2 ; I 为水平面上的小时太阳总辐照量, MJ/m^2 ; $f = \sqrt{I_b/I}$; β 为光伏方阵倾斜角; ρ 为地面反射率; $A_1 = I_b/I_0$; I_0 为大气层外的小时太阳总辐照量^[12], MJ/m^2 。

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} \gamma_0 I_{sc} \left[\frac{\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + 2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360^\circ} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (2)$$

式中: I_{sc} 为太阳常数; ω_1 为起始时刻时角, $^\circ$; ω_2 为终了时刻时角, $^\circ$; φ 为当地纬度角; δ 为太阳赤纬角; γ_0 为日地距离变化引起大气层上界的太阳辐射通量的修正值, 由下式求出:

$$\gamma_0 = 1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \quad (3)$$

式中, n 为一年中的日期序号。

式(1)中, R_b 为倾斜面和水平面小时直射辐照量的比值, 可由下式计算得到:

$$R_b = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_Z} = \frac{\sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega}{\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega} \quad (4)$$

式中, θ_T 为倾斜面上太阳光线的入射角; θ_Z 为太阳光线与地平法线之间的夹角天顶角; γ 为光伏方阵方位角; ω 为太阳时角。

式(2)和式(4)中参数 β 、 γ 、 φ 、 ω 、 ω_s 及 δ 算法详见参考文献[11]。

每天的倾斜面辐照量 H_j 由算出的小时辐照量 I_T 叠加得到, 每月的倾斜面辐照量 H_i 由 H_j 叠加得到, 进而全年辐照量 H_t 由每月辐照量 H_i 叠加得到, 如下式所示:

$$H_t = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\sum_{j=1}^n H_j \right) = \sum_{i=1}^{12} \left[\sum_{j=1}^n \left(\sum_{t_1}^{t_2} I_T \right) \right] \quad (5)$$

式中: H_i 为每月倾斜面辐照量, MJ/m^2 ; H_j 为倾斜面日辐照量, MJ/m^2 ; n 为每月的天数; I_T 为倾斜面每小时的辐照量, MJ/m^2 ; t_1 、 t_2 分别为每天日出时间、日落时间。

影响并网光伏电站发电量的因素除与太阳辐照量有关外, 还与并网光伏发电系统容量及性能比(PR)有关。一般用下式估算光伏系统每年的发电量:

$$E_{\text{out}} = T_1 P_0 \eta_{\text{PR}} \quad (6)$$

式中: E_{out} 为并网光伏电站全年输出的电能, $\text{kW} \cdot \text{h/a}$; T_1 为光伏方阵全年峰值日照时数, h ; P_0 为光伏发电系统额定功率, kW ; η_{PR} 为系统性能比。

1.2 最佳倾斜角及方位角的判定

对于光伏电站, 太阳辐照量是影响光伏电站发电量的一个决定性因素。相同功率的光伏方阵, 安装在不同地区, 以不同倾角及方位角安装, 发电量不同。为了提高光伏电站的性能, 需追求在光伏方阵倾斜角及方位角多参数联合下的最优化目标, 即辐照量或发电量最大。

通过整理倾斜面总辐照量 H_t 的计算式子, 得出 H_t 与安装倾角 β 、方位角 γ 及纬度角 φ 密切相关, 可用如下方程式表示其关系:

$$H_t = f(\beta, \gamma, \varphi) \quad (7)$$

光伏方阵多参数优化问题可总结如下:

$$\begin{aligned} & \max H_t \\ & \text{s.t. } 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \\ & \quad -90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ \\ & \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)中的优化目标可由 1.1 节的计算得到, 式(8)约束函数是参数控制的变化范围。在北半球, 纬度 φ 的范围在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间变化, 光伏阵列的倾斜角 β 只可能在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化, 而方位角 γ 表示太阳光线的水平投影偏离正南方向的角度, 向西(顺时针方向)为正, 向东(逆时针方向)为负, 其角度在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化。本文编制了多参数优化与性能预测程序, 采用遍历搜索的方法, 以某纬度角 φ 开始, 对光伏方阵的倾斜角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围, 方位角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内按 1.1 节中计算倾斜面上辐照量的方法计算每一个倾斜角、方位角下对应的辐照量, 找到最大辐照量, 该辐照量下所对应的倾斜角及方位角即为最佳倾斜角和方位角, 以上计算过程可用图 1 表示。

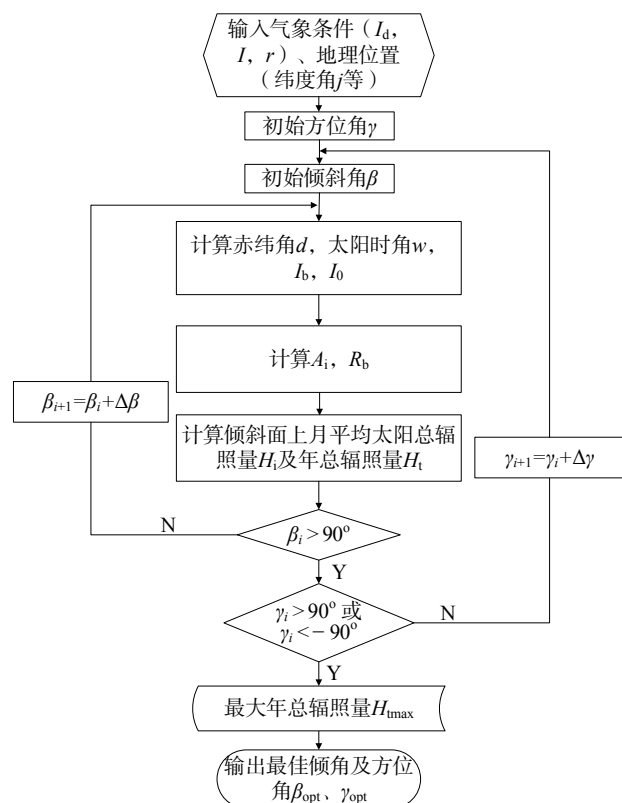


图 1 最佳倾斜角及方位角判定流程图

Fig. 1 Flow chart for determining the optimum tilt and azimuth angle

求解过程中, 倾斜角及方位角分别以 $\Delta\beta$ 及 $\Delta\gamma$ 变化, $\Delta\beta$ 及 $\Delta\gamma$ 取决于实际需求, 工程中 $\Delta\beta$ 及 $\Delta\gamma$ 等于 1° 可满足需求。本文论述的求解方法既求得了最佳倾斜角 β_{opt} , 还求得了关联的最佳方位角 γ_{opt} 及多工况下的关联效果。

2 光伏电站多参数数值预测结果分析

2.1 光伏电站概况

本文的研究对象为广东鹤山市明鹤电力建设有限公司顶楼的光伏示范电站项目, 地处广东省南部, 东经 112.90° 、北纬 22.76° 。平均年太阳辐射量 $1400 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 左右, 屋面总面积约 1700 m^2 , 项目总计铺设太阳能电池组件 280 块, 总装机容量 72.8 kWp , 光伏发电系统的电池组件选用 260 Wp 多晶硅太阳能电池组件。光伏组件安装示意图如图 2 所示。

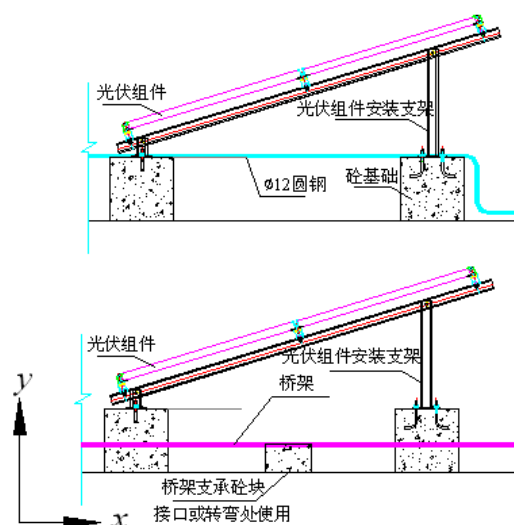


图 2 光伏组件安装示意图

Fig. 2 Installing schematic diagram for photovoltaic modules

2.2 数值预测结果分析

根据 1.1 节光伏电站辐照量的计算模型进行倾斜面辐照量预测。计算所需的基础数据——水平面太阳辐照量来源于鹤山某气象环境监测系统的气象数据, 表 1 列出了 2016 年 1 月 1 日有阳光时的数据。

按照以上数据格式记录了每天每时刻鹤山地区水平面的太阳辐照量, 数据作为利用小时天空散射各向异性模型进行预测计算的基础数据, 根据 2.1 中光伏电站相关参数计算了不同倾斜角和方位角下倾斜面的辐照量情况, 得到辐照量、倾角及方位角之间的关系曲线图 3a 和图 3b、关系曲面图 3c。由图 3 可以看出, 该光伏电站纬度 φ 为 22.76° , 倾斜

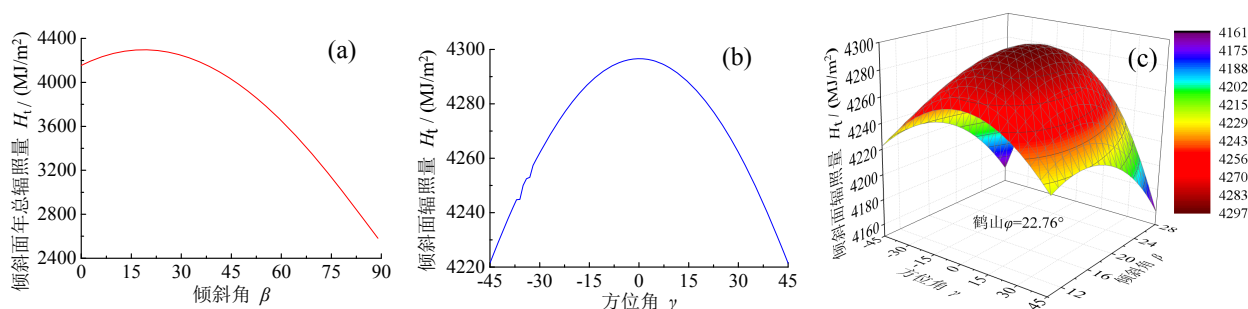
角和方位角的最佳配合为 $\beta = 19^\circ$; $\gamma = 0^\circ$, 倾斜面总辐照量 $H_{\text{tmax}} = 4297 \text{ MJ/m}^2$ 。

表1 2016年1月1日鹤山某气象监测站水平太阳辐照量
Table 1 Level solar irradiation from Heshan meteorological station on January 1, 2016

时刻	水平面总辐射强度 I / (W/m^2)	水平面散射辐射强度 I_d / (W/m^2)
6:00	7.65	2.00
7:00	103.45	27.08
8:00	436.10	75.60
9:00	643.99	111.63
10:00	797.93	138.32
11:00	419.88	109.93
12:00	405.91	106.28
13:00	717.19	124.32
14:00	255.30	66.84
15:00	306.15	53.07
16:00	45.33	11.87

注: 当日其他时刻数据接近 0。

图 3a 表示 $\gamma = 0^\circ$ 时, 倾斜面总辐照量 H_t 与倾斜角 β 的关系, 在 $\beta = 19^\circ$ 时, H_t 达到最大值; 图 3b 表示 $\beta = 19^\circ$ 倾斜面总辐照量 H_t 与方位角 γ 的关系, 在 $\gamma = 0^\circ$ 时, H_t 达到最大值; 图 3c 表示不同倾角和方位角下的倾斜面总辐照量, 三维曲面图的最高点表示当前区域下最大辐照量 H_{tmax} 、 β 与 γ 的最佳配合, 穹面上的其他方格对应点表示了众多工况点的配合状况, 颜色变化形象地表示出了参数配合关联度要素, 红色表示参数配合关联度高、黄色次之、紫色最低, 以提示考虑多参数关联影响决策时提供帮助。由图 3c 的诸参数三维曲面关系图可方便地找到优化结果、多工况性能变化情况及关联影响程度, 高度相关的优化曲面、曲线等大数据群, 可为不同地域光伏发电系统优化设计、出力效率控制、并网等提供参考依据^[13]。



(a) 辐照量随倾斜角变化图, (b) 辐照量随方位角变化图, (c) 辐照量与倾斜角、方位角之间的三维关系

图3 不同倾角和方位角下的倾斜面总辐照量情况

Fig. 3 Total irradiation at different tilt and azimuth angles

3 实验结果与分析

3.1 实测发电量与预测值的比较

广东鹤山市明鹤电力建设有限公司顶楼的光伏示范电站项目 2016 年 5 月开始建设, 于当年年底建成, 图 4 为电站照片。目前该电站已正常运行 9 个月, 通过对电站的监测, 能够方便读取和记录每天每时刻的光伏发电系统的输出电压、电流及发电量。该电站 2017 年 1 月~9 月的发电量情况如图 5 所示。



图4 实际光伏示范电站

Fig. 4 Actual photovoltaic demonstration power station

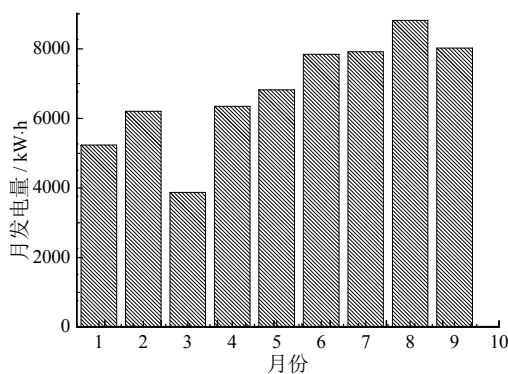


图5 光伏示范电站 2017 年 1 月~9 月发电量情况

Fig. 5 Power generation from January to September in 2017 of actual photovoltaic demonstration power station

本文将数值预测结果与实际电站结果进行了比对。读取了气象站水平面的辐照量基础数据, 采用 1.1 节每小时太阳辐照量-天空各向异性模型计算了倾斜面上太阳辐照总量。比较了太阳能光伏电站实

际发电量与数值预测发电量的情况,选取 2017 年 7 月 9 月结果,列于图 6 中。由对比图可看出,实测值与预测值有较好的贴合性。该对比结果显示了数值预测方法的妥当性。

以往人们常以纬度角代替最佳倾斜角,本文对倾斜角为最佳角 ($\beta = 19^\circ$) 及倾斜角为纬度时 ($\beta =$

$\varphi = 22.76^\circ$) 的数值预测结果进行了比对。选取了该光伏电站 2017 年 9 月预测发电量的差值情况 ($E_{\text{opt}} - E_\varphi$), 见图 7。由图可以看出,最佳倾斜角下的日预测发电量比在倾斜角等于当地纬度下的日预测发电量高出 $0.3 \sim 2.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 长时间积累下来也将是一个不小的数值。

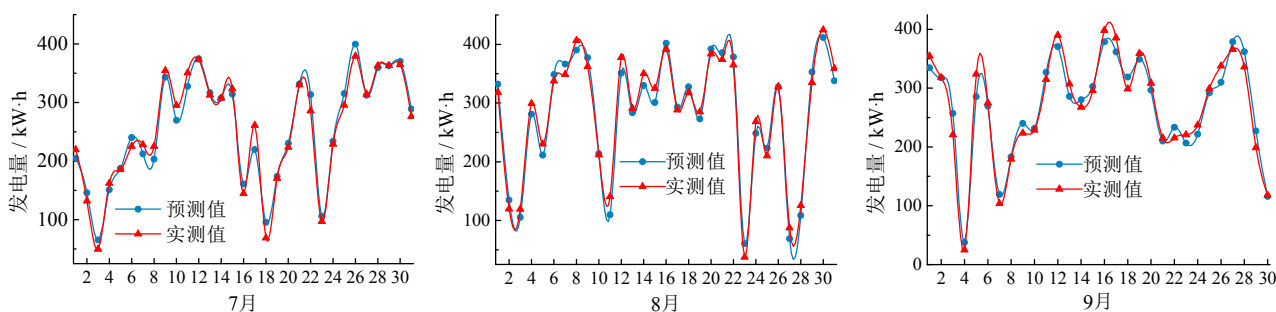


图 6 2017 年 7 月-9 月预测发电量与实测值的比较

Fig. 6 Comparison between forecast capacity and experiment data in July, August and September, 2017

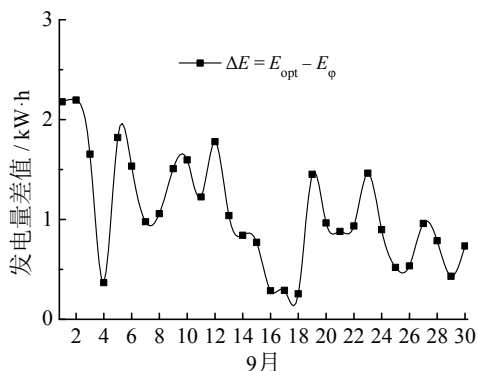


图 7 在最佳倾角及倾角等于纬度下的发电量差值

Fig. 7 Power generation difference between the tilt angle at the optimum angle and the value of the latitude

3.2 最佳倾斜角下, 方位角对发电量的影响

为了验证本文光伏电站多参数联合优化及性能预测结果的妥当性,还搭建了光伏发电系统实验台,探讨了最佳倾斜角下,方位角 γ 对发电量的影响,图 8 为装置外景照片。图中每块太阳能光伏板的额定功率为 265 W,太阳能光伏板的安装角调整到上文所预测的最佳倾斜角 19° 位置,方位角 γ 分别为 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 及 30° ,测量不同方位角下的发电量情况,结果如图 9 和图 10 所示。图 9 结果显示正南向或偏东南向方位角的发电量较大。图 10 显示日辐照量(天气晴雨有关)与温度对发电量会产生影响,辐照量的影响大于温度的影响。在北半球,为光伏电站工程设计及施工的方便,方位角可设置

为正南向,但对于大型光伏电站或沿海地域的光伏电站,建议经过更详细的性能和经济方面的研讨后再进行优化设计,以获得更佳的经济效益。



图 8 光伏发电可变参数实验装置

Fig. 8 Experimental device with variable parameter of photovoltaic power generation

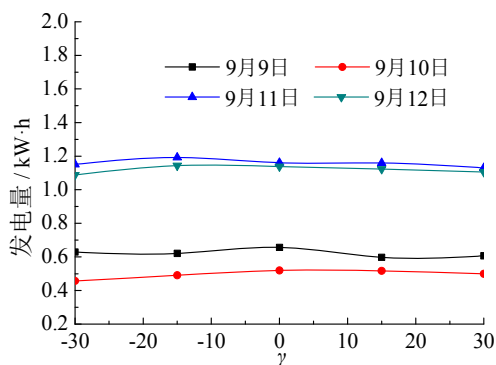


图 9 2017 年不同方位角 γ 下的发电量情况 ($\beta_{\text{opt}} = 19^\circ$)

Fig. 9 Power generation at different azimuth angle γ in 2017 ($\beta_{\text{opt}} = 19^\circ$)

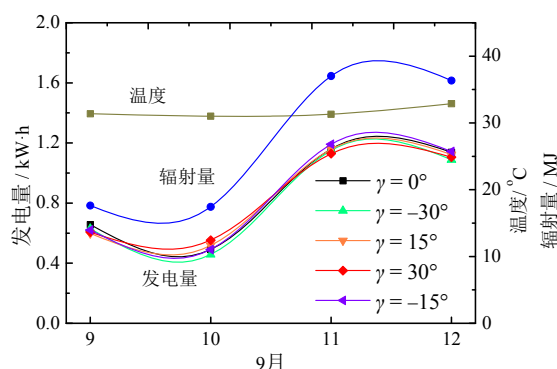


图 10 2017 年不同方位角 γ 下发电量与辐照量、温度的对应情况 ($\beta_{\text{opt}} = 19^\circ$)

Fig. 10 Relationship between power generation and irradiation, temperature at different azimuth angle γ in 2017 ($\beta_{\text{opt}} = 19^\circ$)

4 结 论

(1) 广东鹤山某光伏电站参数联合优化设计及电站实际运行结果表明, 最佳倾斜角下的日发电量会比在倾斜角等于当地纬度下的日发电量高出 0.3 ~ 2.2 kW·h。

(2) 根据预测模型得到了高度相关的优化曲面、曲线等大数据群, 可为不同地域光伏发电系统优化设计、出力效率控制、运行等提供重要参考依据。

(3) 对方位角影响的探讨结果表明, 正南向或偏东南方位角时发电量更大。日辐照量(天气晴雨有关)和温度会影响发电量, 辐照量的影响更大。在北半球, 为光伏电站工程设计及施工的方便, 方位角可以设置为正南向, 但是对于大型光伏电站或沿海地域的光伏电站, 建议经过更详细的性能和经济方面的研讨后再进行优化设计, 以得到更佳的经济效益。

参考文献:

- [1] 沈浩. 光伏发电现状与发展综述[J]. 机电信息, 2016(30): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0797.2016.30.040.
- [2] 杨金焕. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析[J]. 太阳能学报, 1992, 13(1): 86-92.

- [3] 孙韵琳, 杜晓荣, 王小杨, 等. 固定式并网光伏阵列的辐照量计算与倾角优化[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1597-1601. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2009.12.003.
- [4] 杨刚, 陈鸣, 陈卓武. 固定式光伏阵列最佳倾角的 CAD 计算方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(增刊 2): 165-169. DOI: 10.3321/j.issn:0529-6579.2008.z2.036.
- [5] 胡海燕, 王民权, 胡克满. 一种固定式光伏电池板最佳安装倾角优化算法[J]. 电源技术, 2013, 37(6): 1004-1006. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2013.06.031.
- [6] 练成雄, 陈荣荣, 林豪, 等. 广州地区光伏阵列朝向对系统发电性能的影响分析[J]. 广东科技, 2014(14): 86-87, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5423.2014.14.051.
- [7] 陈维, 沈辉, 刘勇. 光伏阵列倾角对性能影响实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1519-1522. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2009.11.014.
- [8] SIRAKI A G, PILLAY P. Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications[J]. Solar energy, 2012, 86(6): 1920-1928. DOI: 10.1016/j.solener.2012.02.030.
- [9] CHENG C L, JIMENEZ C S S, LEE M C. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans[J]. Renewable energy, 2009, 34(6): 1644-1650. DOI: 10.1016/j.renene.2008.10.025.
- [10] BUSHNELL R H. A solution for sunrise and sunset hour angles on a tilted surface without a singularity at zero azimuth[J]. Solar energy, 1982, 28(4): 357. DOI: 10.1016/0038-092X(82)90311-5.
- [11] 杨金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [12] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.
- [13] 郭长兴, 沈娜, 韩凤琴, 等. 太阳能光伏电池多参数输出特性的研究[J]. 新能源进展, 2017, 5(2): 136-140. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.02.009.

作者简介:

沈 娜 (1984-), 女, 博士, 讲师, 主要从事新能源发电方面的研究。

郭长兴 (1988-), 男, 硕士, 助教, 主要从事新能源发电与控制方面的研究。

韩凤琴 (1951-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新能源科学与工程方面的研究。