

# 固定式太阳能光伏板输出功率的若干问题\*

苏忠贤, 周建军, 潘玉良

(杭州电子科技大学 机电工程研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 针对太阳能光伏板输出功率受条件制约的问题, 通过 Matlab 建立了倾斜放置的太阳能光伏板表面所接收的太阳辐射能的数学模型, 并实测了太阳辐射能及光伏板的输出功率等数据, 探讨了太阳能光伏板的最佳倾角和温度对光伏板输出功率的影响。研究结果表明, 太阳能光伏板在最佳季节倾角下, 与水平放置的太阳能光伏板相比, 其输出功率提高 12% 左右; 同时, 光伏板表面温度每升高 10℃, 功率减少 3% 左右。

**关键词:** 太阳能; 最佳倾角; 温度特性; 输出功率

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2008)12-0031-04

## Some output power issues of fixed PV panel

SU Zhong-xian, ZHOU Jian-jun, PAN Yu-liang

(Institute of Mechatronic Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** Aiming at the problem of the output power restricted with some condition, optimum angle of fixed solar panel and the influence of temperature to the output power were researched based on modeling solar isolation on the tilt solar panel by Matlab and measurement of the output power. It is found that the output power of the PV panel with a seasonal optimum tilt angle is increased by 12% in comparison with that of a horizontal panel, and the output power is decreased by about 3% when the temperature of the panel surface increases 10℃.

**Key words** solar energy; optimum tilt angle; temperature characteristics; output power

## 0 引 言

在能源日益紧缺的今天, 太阳能的利用越来越受到人们的重视, 特别是太阳能电池, 其应用已经广泛拓展到电力、通信、交通等各个领域<sup>[1-2]</sup>。同向阳跟踪的太阳能光伏系统相比, 固定式太阳能光伏系统有着安装方便、控制简单的优点, 因此在各个应用领域一直占据着主流。通常情况下, 固定式太阳能光伏板都与水平面成一定角度放置, 以求获得最大的太阳辐射量。同时, 太阳能电板将太阳能转化为电能时, 电板表面的温度将随辐射能的增强而升高, 从而在一定程度上影响了太阳能电板的输出功率。

本研究主要探讨固定式太阳能光伏板输出功率的若干问题。

## 1 太阳能电板最佳倾斜角的选择

太阳能光伏板倾角的选择对光伏板上太阳辐射能的接收有着重要的影响。在假设全晴天辐射的基础上,

本研究通过推导太阳能光伏板的年最佳倾角和季节最佳倾角, 并将两者进行比较, 以得出最佳倾角的设计方案。

### 1.1 与太阳能相关的天文参数的确定

#### 1.1.1 大气层外的太阳辐射

垂直于大气层的太阳辐射强度<sup>[3]</sup>为:

$$I_0 = S_0 (1 + 0.033 \cos(2\pi(N + 10)/365)) \quad (1)$$

式中  $S_0$ —太阳常数, 取值  $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ ;  $N$ —日序, 从 1 月 1 日算起。

#### 1.1.2 太阳高度角 ( $\alpha$ )

太阳高度角是太阳光与水平面的夹角, 随地理纬度、太阳赤纬和时间变化, 其计算公式为:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s \quad (2)$$

式中  $\phi$ —地理纬度;  $\delta$ —太阳赤纬角。

$\delta$ 的计算公式为:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin(2\pi(284 + N)/365) \quad (3)$$

式中  $\omega_s$ —时角, 以正午为基准, 上午为负, 下午为正。

#### 1.1.3 日出日落时间 ( $\omega_{ss}$ , $\omega_{ss}$ )

日出日落时刻, 太阳高度角为零, 即:

收稿日期: 2007-09-27

基金项目: 浙江省科技计划重点资助项目 (KYZ011106006)

作者简介: 苏忠贤 (1983-), 男, 浙江瑞安人, 主要从事太阳能应用方面的研究。E-mail: stanley\_1983@hotmail.com

通信联系人: 周建军, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: zhoujj@hziee.edu.cn

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_{sr} = 0 \quad (4)$$

$$\omega = \pm \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (5)$$

#### 1.1.4 太阳直射辐射和散射辐射的透明度系数

1978年, K retih 等人<sup>[4]</sup>提出全晴天条件下直射辐射的透明度系数 ( $\tau_b$ ) 的经验公式:

$$\tau_b = 0.56(e^{-0.56M_h} + e^{-0.093M_h}) \quad (6)$$

式中  $M_h$ —一定地形高度下的大气量。

$M_h$  的计算公式为:

$$M_h = ((1.229 + (614 \sin \alpha)^2)^{1/2} - 614 \sin \alpha) \times ((288 - 0.0065 \cdot h)/288)^{5.256} \quad (7)$$

式中  $h$ —当地海拔高度。

在全晴天辐射条件下, 散射辐射与直射辐射存在线性关系<sup>[5]</sup>, 即散射透明度系数  $\tau_d$  可由下式得到:

$$\tau_d = 0.271 - 0.274\tau_b \quad (8)$$

#### 1.2 倾斜放置的太阳能电板表面总辐射的计算

在北半球, 朝向正南、与水平面成  $\beta$  倾斜角的太阳能电池板上的太阳光线的入射角为:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega_s$$

在纬度为  $\phi$ 、倾角为  $\beta$  的太阳入射角和在纬度为  $\phi - \beta$  的水平面上的入射角是相等的, 从而得到斜面上的日出日落时间分别为:

$$\omega = \pm \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \quad (9)$$

综合考虑式 (5) 和式 (9), 得到斜面上的日出日落时间分别为:

$$\omega = \pm \sin^{-1} [\arccos(-\tan \phi \tan \delta), \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)] \quad (10)$$

电池板上太阳瞬时直射辐射  $I_b$  为:

$$I_b = I_0 \tau_b \cos \theta \quad (11)$$

电池板上瞬时太阳散射辐射  $I_d$ <sup>[6]</sup> 为:

$$I_d = I_0 \tau_d \cos^2 \beta / 2 \sin \alpha \quad (12)$$

由于反射光基本不影响电池板辐射能的接收, 板面上一天内接收的太阳瞬时总辐射为:

$$Q_N = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{sr}} (I_b + I_d) dT \quad (13)$$

电池表面一年内接收的太阳瞬时总辐射为:

$$Q_y = \sum_N Q_N \quad (14)$$

#### 1.3 最佳倾角的计算

##### 1.3.1 年最佳倾角的计算

给定地理纬度和地形高度等参数以后, 太阳能电池板上接收的年总辐射  $Q_y$  是关于变量  $\beta$  的函数, 即  $Q_y(\beta)$ , 对  $Q_y(\beta)$  关于  $\beta$  求导, 取值为 0 即:

$$\frac{dQ_y}{d\beta} = 0 \quad (15)$$

通过上式, 得到年最佳倾角  $\beta_y$ 。实际上, 上式的求解过程比较复杂。为了简化计算, 用 Matlab 编程将  $\beta$  量化成  $0^\circ \sim 90^\circ$  的值, 增量为  $1^\circ$ , 从中取使  $Q_y$  最大的  $\beta$  作为  $\beta_y$  的近似值。这样的近似取值基本已满足工程计算的精度。

以杭州为例, 当地的地理纬度  $\phi = 30^\circ 33'$ , 计算得到的最佳倾角  $\beta_y = 20^\circ$ 。 $\beta$  分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  时, 电池板上接收的太阳辐射的情况如图 1 所示。

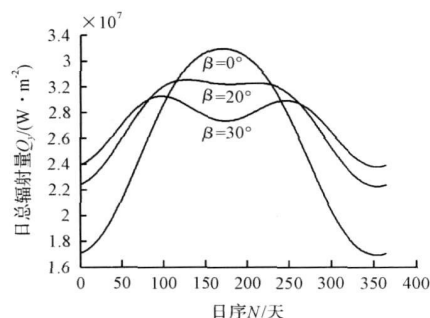


图 1 不同倾角下电板表面接收的辐射能

同水平放置的太阳能电板相比,  $\beta = 20^\circ$  的太阳能电板的表面年辐射量可以提高 8% 左右。

##### 1.3.2 季节最佳倾角的计算

如果以季节为单位, 给定地理纬度和地形高度等参数以后, 可以得到最佳季节倾角。

将太阳能电板表面接收的年辐射能分成 4 个部分, 即:

$$Q_{si} = \sum_N Q_N \quad (16)$$

式中  $i$ —季节序数,  $i = 1, 2, 3, 4$  为了更符合当地的天气情况,  $N$  的取值可以不均等。

对  $Q_{si}$  关于变量  $\beta$  求导并取值为 0 即:

$$\frac{dQ_{si}}{d\beta} = 0 \quad (17)$$

经上式的求解过程, 计算得到  $\beta_{s1} = 19^\circ$ 、 $\beta_{s2} = 0^\circ$ 、 $\beta_{s3} = 18^\circ$ 、 $\beta_{s4} = 39^\circ$ 。各个季节 (并非严格意义上的季节划分) 在不同倾角下太阳能电板表面的辐射量随倾角的变化情况如图 2 ~ 图 5 所示。

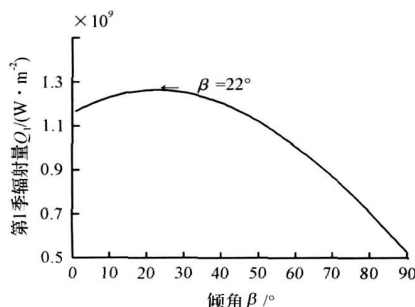


图 2 第 1 季太阳能电板表面接收的辐射能随倾角的变化

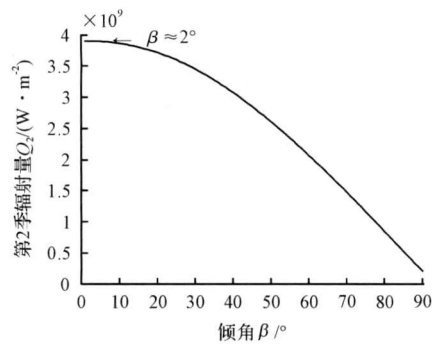


图 3 第 2 季太阳能电板表面接收的辐射能随倾角的变化

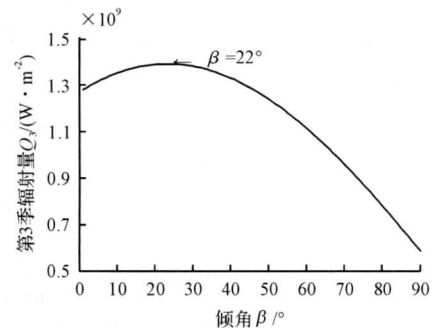


图 4 第 3 季太阳能电板表面接收的辐射能随倾角的变化

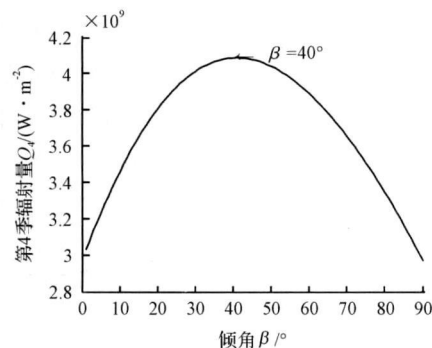


图 5 第 4 季太阳能电板表面接收的辐射能随倾角的变化

在最佳季节倾角下太阳能板表面接收的辐射能情况如图 6 所示。

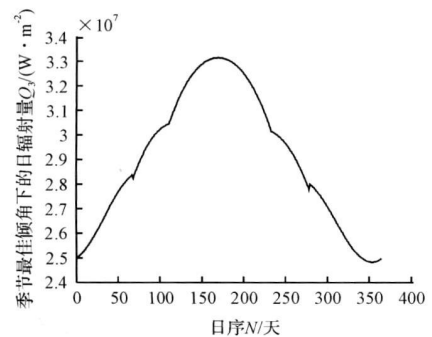


图 6 在最佳季节倾角下太阳能电板表面接收的辐射能

与水平放置和  $\beta = 20^\circ$  的太阳能光伏板相比, 倾角随季节调整的太阳能电板表面接收的辐射能分别提高了 12% 和 5% 左右。

2 太阳能硅电板的温度特性

不仅太阳能电板倾角对电板输出功率有着重要的影响, 电板表面的温度也同样有着重要的影响。笔者在实测太阳能数据的基础上对太阳能电板温度因素加以分析。

2 1 PV 电板的温度特性

PV 电池的工作电压随温度的升高而降低, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , PN 节的导通电压约减少  $2.5\text{ mV}$ ; 对一块由 32 个 PN 节组成的太阳能方阵来说, 温度上升  $10^\circ\text{C}$ , 电压就下降  $0.8\text{ V}$  左右。

2 2 实例

本研究通过实测杭州 2007 年 8 月 31 日这一天的太阳能数据及太阳能电板 (TDB125  $\times$  125- 32P) 的输出功率来分析温度对太阳能电板发电的影响。太阳能总辐射表、直辐射表、温度传感器和太阳能电板如图 7 所示; 测试软件的界面如图 8 所示。

在观测地的太阳日总辐射、电板的输出功率 (3 块太阳能板串联) 及电板的表面温度如图 9~ 图 11 所示。从图中可以明显看出, 日总辐射曲线呈近似的正弦分布, 而功率却呈近似的梯形分布, 即在  $7:00\sim 10:00$  和  $14:30\sim 18:00$  之间, 太阳能辐射能保持线性关系; 而中间的时间 ( $10:00\sim 14:00$ ), 由于电池表面的温度基本超过  $50^\circ\text{C}$ , 电板的输出功率并未随太阳辐射的升高而增加。由此可以看出, 温度对太阳能电板的输出功率有着较大的影响。

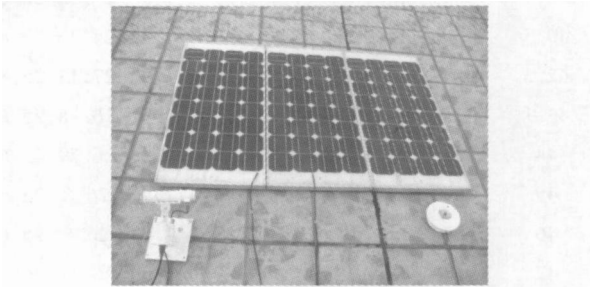


图 7 总辐射表、直辐射表和太阳能光伏板

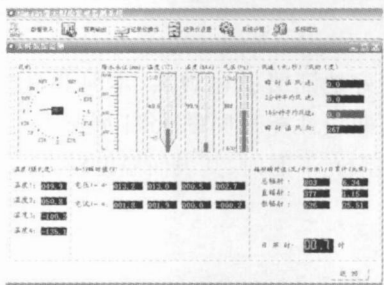


图 8 太阳能测试软件界面

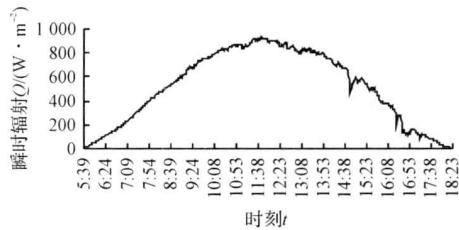


图 9 太阳能日总辐射

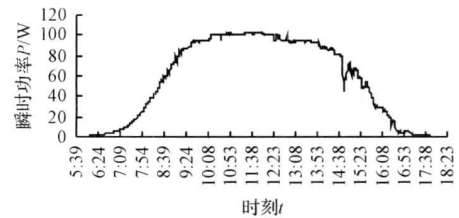


图 10 太阳能电板输出功率

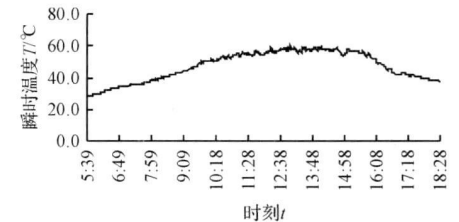


图 11 太阳能电板的表面温度

表 1 太阳能光伏板的工作电压、电流及输出功率随温度的变化情况

	温度 1	温度 2	电压 1	电压 2	电流 1	电流 2	功率 1	功率 2
	/℃	/℃	/V	/V	/A	/A	/W	/W
1	37.5	45.4	14.6	14	2	2	29.2	27.4
2	38.9	45.6	14.5	14	1.9	1.9	27.55	26.03
3	40.5	46	14.4	14	1.9	1.9	27.36	25.84
4	42.3	46.5	14.3	14	1.9	1.9	27.17	25.84
5	43.1	47	14.2	14	1.9	1.9	26.98	25.65
6	44	47.2	14.1	14	1.9	1.9	26.79	25.65
7	45	48	14	14	1.9	1.9	26.6	25.65
8	46	48.7	14	14	1.9	1.9	26.6	25.65
9	47	49.2	13.9	14	1.9	1.9	26.41	25.65
10	49	50	13.5	13	1.8	1.8	24.3	23.58
11	49.7	50.1	13.2	13	1.8	1.8	23.76	23.58

为了更好地证明上述观点,本研究做了一组对比实验。挑选两块性能相同的太阳能光伏板 A 和 B 其中 A 一直在阳光下照射,其表面温度较高,另一块放置

在室内,在某一时刻移到阳光下暴晒。两块光伏板工作电压、电流、输出功率和表面温度的情况如表 1 所示。从表中可以看出,随温度的升高,光伏板 A 的工作电压迅速下降,而工作电流基本保持不变。通过计算表明,初始温度为室温的条件下,光伏板表面的温度每升高 10℃,其输出功率下降 5% 左右。

3 结束语

(1) 借鉴国内外太阳能辐射计算的经验公式,在考虑大气衰减和地形高度的基础上,本研究建立了倾斜放置的太阳能电板上接收的太阳辐射的模型,并据此采用 Matlab 编程得出太阳能电板的年最佳倾角和季节最佳倾角。通过计算发现,太阳能电板接受的辐射在年最佳倾角 ( $\beta = 20^\circ$ , 以杭州为例,下同) 和季节最佳倾角 ( $\beta_{s1} = 19^\circ$ ,  $\beta_{s2} = 0^\circ$ ,  $\beta_{s3} = 18^\circ$ ,  $\beta_{s4} = 39^\circ$ ) 下比与当地纬度相同的倾斜角下 ( $\phi = 30^\circ$ ) 分别提高了 3% 和 8% 左右。实际上,只要在太阳能光伏板上安装简易调节装置便可实现一年 4 次的倾角调整。

(2) 太阳能电板的表面温度对其输出功率有着重要影响,特别是温度超过一定范围以后,其输出功率不再随辐射能的增加而增加。因此,太阳能光伏板要尽量安装在通风、地面反射低的地方,以降低太阳能光伏板的工作温度,减少内部的热能损耗。

参考文献 (References):

[1] 杨金焕,葛亮,谈倍月,等.太阳能光伏发电的应用[J].上海电力,2006 9(12): 355-361

[2] 张盛忠.基于 PIC16F676 调宽调频式太阳能交通黄闪信号灯控制器的设计[J].电源技术应用,2006 9(12): 14-17

[3] ALATA M, NMRM A, QAROUH Y. Developing a multi-purpose sun tracking system using fuzzy control[J]. **Energy Conversion and Management** 2005, 46(7-8): 1229-1245.

[4] KREITH F, KREDER J F. Principles of Solar Engineering [M]. New York: McGraw Hill 1978

[5] LIU B Y, JORDAN R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. **Solar Energy**, 1960 4(1): 1-19.

[6] 谢家奎. 电子线路 (线性部分) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998

[编辑: 张 翔]