

一种固定式光伏电池板最佳安装倾角优化算法

胡海燕¹, 王民权², 胡克满³

(1. 宁波职业技术学院 科研处, 浙江 宁波 315800; 2. 宁波职业技术学院 机电工程系, 浙江 宁波 315800;

3. 宁波职业技术学院 电子信息工程系, 浙江 宁波 315800)

摘要: 针对安装固定式的光伏电池板建立瞬时辐射量模型, 并给出固定安装时的年最佳设计倾角计算方法。以步长为 0.01° 逐一计算不同安装倾角下的年辐射量, 利用设定角度范围进行循环穷举法寻优的方式计算安装固定式的光伏太阳能电池板的最佳倾角。以部分城市为例计算固定安装时的年最佳设计倾角, 另外给出了以北京为例一个城市的每月最佳倾角及平均日光辐射总量。结果分析表明, 本算法具有一定的实用参考价值。

关键词: 最佳倾角; 光伏电池板; 寻优算法

中图分类号: TM 914

文献标识码: A

文章编号: 1002-087 X(2013)06-1004-03

Optimal algorithm of fixed PV panel optimum tilt angle

HU Hai-yan¹, WANG Min-quan², HU Ke-man³

(1. Scientific Research Office, Ningbo Polytechnic, Ningbo Zhejiang 315800, China;

2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo Zhejiang 315800, China;

3. Department of Electronic Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo Zhejiang 315800, China)

Abstract: Annual optimum design tilt angle algorithm in fixed installation was given upon assemble fixed PV panel establishing instantaneous radiation model. At 0.01° step size, the annual radiation volumes at different assemble tilt angles were calculated respectively. Angle range setting was utilized to conduct circulation exhaustive method for searching optimum in the calculation of optimum title angle of assemble fixed PV panel. Some cities were taken as examples for calculating the annual optimum design tilt angle in fixed assembling. Also, Beijing was taken as an example where optimum tilt angles at each month and average solar radiation total volume were given. Results and analysis show that this algorithm possesses some practical reference value.

Key words: optimum tilt angle; PV panel; searching optimal algorithm

光伏发电与光热发电是利用太阳能的重要手段。光热发电初期投资大且需要大规模的定日镜场, 该项技术更加适合在辐射量足、辐射值大及日照时间长的地区使用, 比如在我国西藏、云南、内蒙古、青海等地方。光伏发电适用于地理位置偏僻、居住分散、远离电网的地方; 也适应日照阳光充足的地区, 比如我国的西南地区。国际能源组织 (ITE) 预测未来各国光伏发电量的比例将有大幅度的提高。随着水利资源的缺失和石化能源的日益消耗, 我国已经开始制定《可再生能源中长期发展规划》。预计未来十年我国的光伏发电量将达到 30 GW, 占总发电量的 1% 左右。同时随着光伏技术的不断发展而煤炭、石化、水电等成本的上升, 光伏发电将在未来有着更好的发展前景。

光伏发电技术的效率和成本是目前光伏技术没有大规模推广的主要原因, 因此如何提高光电转化效率和降低成本已经是各大研究机构的研究热点, 也是有待攻克的难题。本文通过对安装光伏电池板的倾角研究, 利用最佳的安装倾角从而

提高光伏发电效率。

国内外许多专家学者对最佳倾角的计算均进行了探索研究。Angel A 等人在基于固定、单轴跟踪、双轴跟踪等三种情况下对光伏电池板的发电效率进行了探讨研究, 结合产品的生命周期评估倾角的角度提出了一种关于双轴跟踪综合效益最佳的方案^[1]; A. Babu 与 C.S. Chin 等人提出关于单轴跟踪的光伏系统, 并通过 MATLAB 的仿真验证对不同季节的最佳倾角的变化进行了估算^[2]; Hossein Mousazadeh 等人根据对多个试验系统的观测, 得出一种极轴或方位角的单轴跟踪系统的设计方法^[3]; Murat Kacira 等人通过建立数学模型和最优值的求解并计算获取年度总辐射量最大的倾角方案^[4]。Francisco Javier Gomez-Gil 等人在固定式光伏电池板倾角方面也做了研究^[5]; 刘祖明等人提出一种负荷全年均衡分布的系统, 并计算最佳倾角的方案^[6]; 朱超群等人在假设散射辐射各向同性的条件下, 提出一种南向倾斜面的最佳倾角公式^[7-9]等。

国内外学者均在针对单轴跟踪式、双轴跟踪式、固定式、极轴跟踪式的光伏发电系统的基础上建立数学模型和试验研究得出不同的方案和计算结果^[9-10]。从查阅文献得知, 现有研究的固定式光伏电池板安装角度大都是基于理想的状态, 对于北半球而言大多正南方向、辐射量充分等状态。而在我国实际

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 浙江省教育厅 2012 年度科研计划项目 (Y201226216)

作者简介: 胡海燕 (1982—), 女, 浙江省人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能控制、光伏技术研究、计算机应用技术。

工程应用中由于地域差异和安装条件的限制很难保证安装的位置。本文针对正南向安装的光伏板,在计算最佳倾角的基础上,在不增加光伏发电成本的前提下确定最佳倾角的范围从而提高光伏电池板的综合效率,并以全国部分城市为例,根据理想天气条件下的太阳辐射参数计算了各种不同角度下的年聚光量。

1 算法建模

1.1 模型参数定义

B_0 : 地球大气层外的日光辐射总量, $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;

B : 阳光透过大气层以后到达地球表面的日光辐射量, $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;

γ_s : 太阳光方位角($^\circ$);

δ : 太阳光下的倾角($^\circ$);

ω : 时角($^\circ$);

θ : 当地经度($^\circ$);

γ : 为当地地理纬度($^\circ$);

φ_s : 太阳高度角($^\circ$);

α_B : 光伏电池板安装的倾角,即光伏电池板平面与地平面之间的夹角($^\circ$);

γ_b : 光伏电池板的方位角,本文定义为光伏电池板的法线在地平面的投影与当地春分日午时正南方向之间的夹角($^\circ$)。

太阳光照透过大气层以后到达地球平面的日光辐射量和地球大气层之外的太阳光照辐射量关系如式(1)所示:

$$B = B_0[1 + 0.034 \cos(360^\circ n / 365)] \quad (1)$$

$$\cos \sigma = \frac{(-\cos \alpha \cdot \cos \gamma_s, -\cos \alpha \cdot \sin \gamma_s, -\sin \alpha) \cdot (-\sin \beta \cdot \cos \gamma_b, -\sin \beta \cdot \sin \gamma_b, -\cos \beta)}{|(-\cos \alpha \cdot \cos \gamma_s, -\cos \alpha \cdot \sin \gamma_s, -\sin \alpha)| \cdot |(-\sin \beta \cdot \cos \gamma_b, -\sin \beta \cdot \sin \gamma_b, -\cos \beta)|} \quad (6)$$

假设忽略了当地的地球表面的弯曲率与大气折射所引起的误差,我国地域处于地球的北半球,令纬度为 φ 、太阳电池板安装倾角为 β 、正向朝南,可以得到电池板和光照的倾斜面上的日出时间 t_{sunrise} 和日落时间 t_{sunset} ,如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega &= 0 \\ \omega &= \min \left\{ \arccos(-\tan \delta \tan \varphi), \arccos[-\tan \delta \tan(\varphi - \beta)] \right\} \\ t_{\text{sunrise}} &= 12 - (\omega + \gamma_b) / 15^\circ \\ t_{\text{sunset}} &= 12 + \omega / 15^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

设倾斜放置的太阳电池板任意时刻接收到的太阳光辐射总量为 B_p ,其主要取决于散射辐射 B_{sd} 、直接辐射 B_{sb} 和反射辐射 B_{sr} 等因素,本文采用各向异性的散射模型,那么任意时刻的太阳电池板上的辐射量如式(8)所示:

$$B_p = B_{sb} + B_{sd} + B_{sr} = B(\eta_b \cdot \cos \sigma + \eta_d \cdot \sin \alpha \cdot \frac{2 + \cos \beta}{3} + \rho \cdot \eta_r \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}) \quad (8)$$

式中: η_d 、 η_b 、 η_r 分别为散射辐射透明系数、太阳光直射辐射透明系数、反射辐射透明系数; ρ 为地表植被反射率,本文取值 0.2^[11]。

设 t_{sundown} 和 t_{sunrise} 分别表示为计算日阳光在倾斜面上的日落时间和升起时间,那么光伏太阳电池板上一年可获得到的

赤纬角为赤道切面与黄道切面之间的夹角,任意一天的赤纬角与日序 n 的关系,可以由库伯方程求得,如式(2)所示:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin(360^\circ \times \frac{284 + n}{365}) \quad (2)$$

太阳时角为当地的太阳所在的时圈(地球经度圈)和 12 时午时的时圈之间的夹角,太阳时角和当地的太阳时 t_{sun} 有着密切的关系,可表示式(3):

$$\omega = 15^\circ \times (t_{\text{sun}} - 12) = 15^\circ \times [t_b + \frac{E - 4(120^\circ - \theta)}{60} - 12] \quad (3)$$

式(3)、(4)中: λ 为修正系数; E 表示为地球绕着太阳公转与转速变化而产生的修正时差; t_b 表示为北京时间; θ 表示当地的经度。

$$\begin{aligned} E &= 9.87 \times \sin 2\lambda - 7.53 \cos \lambda - 1.5 \sin \lambda \\ \lambda &= 360^\circ \times (n - 81) / 364 \end{aligned} \quad (4)$$

方位角和太阳的高度角与赤纬角、当地纬度与太阳的时角关系如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \\ \cos \gamma_s &= \frac{\sin \alpha_s \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 数学模型

阳光透过大气层入射的光线的坐标值可以用向量表示 $(-\cos \alpha \cos \gamma_s, -\cos \alpha \sin \gamma_s, -\sin \alpha)$,光伏电池板的中心法线的坐标可以表示为 $(-\sin \beta, 0, -\cos \beta)$ 。令阳光入射光线和光伏电池板中心法线的夹角为 σ ,那么:

阳光辐射总量如式(9)所示:

$$B_{pa} = \sum_{n=1}^{365} \int_{t_{\text{sunrise}}}^{t_{\text{sundown}}} (B_{sb} + B_{sd} + B_{sr}) dt \quad (9)$$

2 计算实例

本文按照每相隔 0.01° , 分别计算了光伏板方位角 γ_b ($0^\circ \sim +90^\circ$),其计算流程如图 1 所示。部分城市固定安装时的年最佳设计倾角详细结果如表 1 所示,另外给出了以北京为例一个城市的每月最佳倾角及平均日光辐射总量,详细结果如表 2 所示。

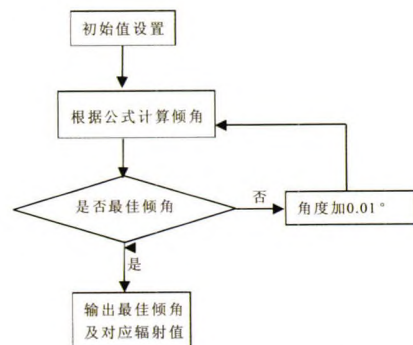


图 1 计算最佳倾角程序流程图

表 1 部分城市的年最佳倾角及各月平均日辐射量

	北京	上海	广州	拉萨	重庆	杭州	长沙	佳木斯	济南	乌鲁木齐
纬度/(°)	39.56	31.17	23.1	29.4	29.35	30.14	28.13	46.49	36.36	43.47
最佳倾角/(°)	33.2	23.1	19.2	31.4	12.5	21.1	18.7	42.9	29.1	31.0
月平均辐射总量($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)										
1月	3.40	2.46	2.62	5.88	1.22	2.13	1.55	2.82	2.66	2.15
2月	4.26	2.94	2.06	5.89	1.43	2.33	1.78	3.89	3.52	2.83
3月	4.51	3.23	2.00	5.78	2.16	2.55	2.00	4.77	3.98	3.68
4月	5.10	4.06	2.30	5.86	2.97	3.42	2.88	4.65	5.12	5.78
5月	5.25	4.45	3.20	6.10	3.45	3.92	3.76	4.90	5.20	5.78
6月	5.01	3.97	3.35	5.92	3.32	3.53	3.95	4.68	5.18	5.99
7月	4.36	4.65	3.91	5.64	3.99	4.45	5.21	4.48	4.30	5.82
8月	4.32	4.56	3.70	5.53	4.22	4.39	4.66	4.31	4.22	5.81
9月	4.23	3.98	3.82	5.60	2.78	3.41	3.82	4.33	4.01	5.25
10月	3.89	3.49	3.81	6.40	1.72	3.12	2.96	4.02	3.67	4.07
11月	3.21	2.63	3.28	5.97	1.02	2.32	2.12	2.58	2.72	1.70
12月	3.01	2.63	3.20	5.90	1.00	2.26	2.01	2.45	2.64	1.60
平均	4.21	3.59	3.10	5.87	2.44	3.15	3.06	3.99	3.94	4.20

表 2 北京每月份的最佳倾角与平均日光辐射总量

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最佳倾角/(°)	62.2	53.1	36.7	24.3	11.2	5.5	8.2	16.7	32.6	48.8	59.2	62.9
月平均辐射总量($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	3.9	4.4	4.8	5.2	5.6	5.5	4.8	4.4	4.3	4.2	3.4	3.3

其中,图 2 表示北京月份对应的最佳倾角变化图,图 3 表示北京月份对应的平均辐射总量变化图。从图 2 和图 3 可以发现,当太阳靠近北回归线时在北京安装固定式光伏电池板倾角角度最小,且太阳的辐射平均总量值也最大;反之,当太阳靠近南回归线时在北京安装固定式光伏电池板倾角最大,这一结果与实际情况相符。

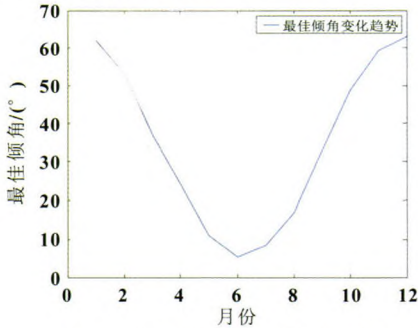


图 2 北京月份对应的最佳倾角变化图

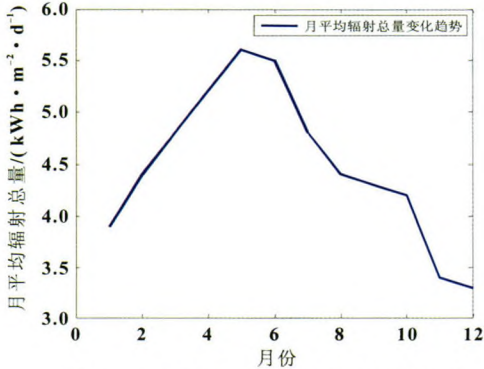


图 3 北京月份对应的平均辐射总量变化图

3 结语

本文在结合反射辐射、散射辐射和直接辐射影响的基础上,采用各向异性的散射辐射数学模型并构建了光伏太阳能电池倾斜平面上的太阳辐射光数学模型。同时利用设定角度

范围进行循环穷举法寻优的方式计算正南向安装的光伏太阳能电池板的最佳倾角。整年的最佳倾角值与当地直接辐射量占总的辐射量比例有着紧密的关系。若比例大的地区,那么它的全年最佳倾角相应也大,反之亦然。提出了利用设定角度范围进行循环穷举法寻优的方式计算以确定最佳倾角,结果分析表明,本算法具有一定的实用参考价值。

参考文献:

[1] CHIN C S, BABU A, MCBRIDE W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink[J]. Renewable Energy, 2011,36:3075-3090.

[2] BAYOD-RÚJULA Á A, LORENTE-LAFUENTE A M. Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed modules systems [J].Energy,2011,36:3148-3158.

[3] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A.A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13:1800-1818.

[4] GOMEZ-GIL F J, WANG X T, BARNETT A. Energy production of photovoltaic systems fixed, tracking, and concentrating [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012,16:306-313.

[5] KACIRA M, SIMSEK M, BABUR Y. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey [J]. Renewable Energy, 2004, 29: 1265-1275.

[6] 刘祖明, 廖华, 李耀飞, 等. 固定式光伏方阵最佳倾角[J].太阳能学报,1992, 13(4):385-388.

[7] 李实, 田春宁, 鞠振河, 等. 光伏系统的优化设计[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2011,7(4):107-110.

[8] 朱超群, 廖静明. 我国最佳倾角的计算及其变化[J].太阳能学报, 1992, 13(1):38-44.

[9] 谈金军. 户用光伏系统设计与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[10] 杨金焕, 葛亮, 陈中华, 等. 季节性负载光伏方阵的倾角[J]. 太阳能学报,2004, 24(2):241-244.

[11] GATES D M. Biophysical Ecology[M].New York:Springer-Verlag, 1980.