

斜单轴跟踪式光伏组件的安装倾角优化设计

孔月萍¹, 张倩¹, 路婷婷¹, 许启明²

(1. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学材料与矿资学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 根据斜单轴跟踪式光伏设备的工作原理, 设计了其光伏组件的安装倾角优化方法. 该方法以光伏组件全年接收的太阳辐射量最大为目标函数, 从分析太阳的入射角着手, 推导倾斜面与水平面上接收太阳辐射量之间的关系, 构造了斜单轴跟踪式光伏组件接收太阳辐射量的测算模型, 并运用遗传算法求解了光伏组件的最佳安装倾角. 实验结果表明, 太阳辐射量测算模型的准确性较高、安装倾角优化方法有效.

关键词: 太阳辐射量; 安装倾角; 优化; 遗传算法

中图分类号: TP391.75

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0767-04

Optimal design for the installation of tilted single-axis tracking photovoltaic panel

KONG Yueping¹, ZHANG Qian¹, LU Tingting¹, XU Qiming²

(1. School of Information & Control, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Materials & Mineral Resources, Xi'an Univ. of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the working principle of the tilted single-axis tracking photovoltaic device, an optimization method for the installation angle of photovoltaic panel is proposed. The method takes the maximum of solar radiation received by photovoltaic panel as the objective function, studies the relationship between solar radiation received by inclined plane and horizontal plane by analyzing the solar incident angle, and builds up a model to calculate the solar radiation received by tilted single-axis tracking photovoltaic panel. It solved the optimal installation angle by genetic algorithm. Finally, the experiment results showed the accuracy of solar radiation calculated model and the availability of optimal method.

Key words: Solar radiation; Installation angle; Optimization; Genetic algorithm

光伏电站建设时, 为了提高光伏设备的电能产出, 其光伏组件需朝向南面以一定的倾斜角度安装. 对固定式光伏设备而言, 其光伏组件的倾角一旦选定后很少改变, 除了正午外其他时间太阳均斜射光伏组件, 斜射影响接收辐射量的大小, 因此光伏组件安装倾角的选择影响了其接收辐射量的大小^[1], 决定光伏电站的发电量. 公开发表的倾角选择文献中, 主要针对固定式光伏组件的安装倾角进行优化设计^[2-5]. 文献[2]分析了固定式光伏阵列倾斜角度对辐射量的影响, 提出了利用太阳最大辐射量为目标的光伏阵列支架倾角优化方法, 给出了每年四次调整固定倾角的参数. 文献[4]提出了一种使用逐步查找法确定光伏阵列每月最佳倾角的方法. 这些方法都是针对固定式光伏组件, 其计算模型中虽然考虑了组件倾角对接收太阳辐射量的影响, 但辐射数据的获取来源于两种途径, 一是设立观测站按一定时间间隔对水平面上接收的太阳辐射进行实测; 二是按Klein模型^[6]试算倾斜面上的月辐射量均值, 再按月步进测算后寻优. 由于资金、技术和环境等条件的限制, 我国的太阳辐射观测站

点仅有100个^[7], 不能满足光伏发电项目的设计需求. 因此, 有学者开始研究辐射量测算模型, 并以此为基础指导光伏组件安装倾角的选择.

为了提高发电效率, 附加跟踪系统的光伏设备陆续出现, 其中斜单轴跟踪式设备可实现其光伏组件每天跟踪太阳的方位角东西向转动, 保证太阳光线在每天东升西落的全过程中以接近垂直的角度照射光伏组件, 它与固定式组件相比可提高37.7%的发电效率^[8]. 显然, 若能精确测算其朝南的最佳倾斜角度, 就能更好的保证太阳光线垂直照射光伏组件. 但将文献[2, 4]提出的方法直接应用于斜单轴跟踪式光伏组件, 显然测算误差太大. 目前国内外学者对水平面和固定斜面上接收的太阳辐射量建立了许多理论计算模型^[9-10], 而对于实时转动的斜单轴跟踪式光伏组件接收太阳辐射量的测算方法尚未见报道. 因此, 以太阳入射角为观测点, 分析倾斜面与水平面上接收辐射量间的关系, 构造斜单轴跟踪式光伏组件接收太阳辐射量的测算模型, 研究安装倾角与接收辐射量之间的关系, 即可优化光伏组件的安装倾角.

1 太阳入射角

光伏组件接收的太阳辐射量与太阳入射角有关,入射角越小,接收的辐射量越多.如图1所示, \vec{S} 为太阳入射光线, \vec{n} 为光伏组件表面的法向量, Z 为地平面的垂线.光伏组件表面的法线 \vec{n} 与太阳入射光线 \vec{S} 之间的夹角 θ 称为太阳入射角;光伏组件表面的法线 \vec{n} 在水平面的投影与正南方向的夹角 γ 称为光伏组件的方位角,以正南方向为0,向东为负,向西为正; h 为太阳高度角, α 为太阳方位角.则任意时刻太阳入射角 θ ^[11]的计算方法如式(1),式中, β 为电池面板的安装倾角.

$$\cos\theta = \cos\beta \sin h + \sin\beta \cosh \cos(\alpha - \gamma) \quad (1)$$

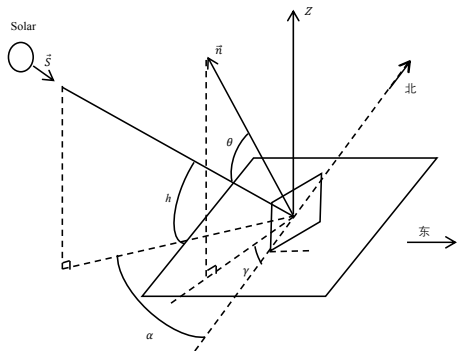


图1 太阳角示意图

Fig.1 Solar angle sketch map

为减小太阳入射角、接收更多的太阳辐射,斜单轴跟踪式光伏设备通过控制系统带动光伏组件绕旋转轴对太阳的方位角进行实时跟踪,因此,光伏组件的方位角 γ 与太阳方位角 α 时刻保持相等,即 $\alpha = \gamma$,则 $\cos(\alpha - \gamma) = 1$.由此得到斜单轴跟踪式光伏设备任意时刻的太阳入射角计算方法,如式(2).

$$\cos\theta = \cos\beta \sin h + \sin\beta \cosh = \sin(\beta + h) \quad (2)$$

2 辐射量测算模型及安装倾角优化

太阳入射角最小时光伏组件获得的太阳辐射量最大,此时组件的南向倾斜角度即为最佳.因此,构造倾斜面上光伏组件接收太阳辐射量的动态测算模型,成为解决问题的关键.

2.1 太阳辐射量测算模型

倾斜面上接收的太阳辐射总量 H_T 由三部分组成:直接辐射 H_{bT} 、天空散射辐射 H_{dT} 和地面反射辐射 H_{rT} ^[10],即式(3).

$$H_T = H_{bT} + H_{dT} + H_{rT} \quad (3)$$

光伏组件上接收的直接辐射 H_{bT} 与太阳入射角 θ 有关,如图2(a)所示,设某方向太阳入射光线直接辐射强度为 E ,则能被光伏组件接收利用的是与其垂直的太阳辐射强度分量,即 $E \times \cos\theta$.设倾斜光伏组件上和水平面上的太阳入射角分别为 θ 和 θ_1 ,则

其分别接收的直接辐射 H_{bT} 、 H_b 之比 R_b 如式(4).

$$R_b = \frac{H_{bT}}{H_b} = \frac{E \times \cos\theta}{E \times \cos\theta_1} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_1} \quad (4)$$

因此,得到水平面上的直接辐射 H_b 后,可通过式(4)推导出倾斜光伏组件上的直接辐射 H_{bT} ,即式(5).

$$H_{bT} = H_b \times R_b \quad (5)$$

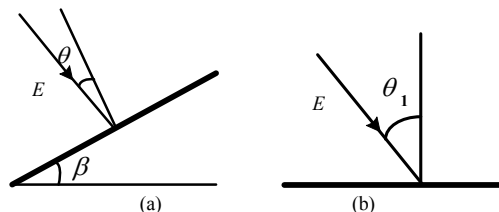


图2 倾斜光伏组件和水平面接收太阳直接辐射示意图

Fig.2 Direct solar radiation to the tile PV panel and the horizontal sketch map

倾斜光伏组件上散射辐射量的计算模型分为各向同性和各向异性两类.典型的有Liu-Jordan模型、Hay模型、HDKR模型、Klein模型和Perez模型等^[6, 12],文献[12]经过实验验证,利用Hay模型计算的散射辐射量最接近实测的辐射数据.该模型指出倾斜面上的天空散射辐射 H_{dT} 由两部分组成:太阳附近的散射辐射和其余天空穹顶均匀分布的散射辐射,其计算方法如式(6).

$$H_{dT} = H_d \left[\frac{H_b}{H_o} R_b + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_b}{H_o} \right) (1 + \cos\beta) \right] \quad (6)$$

式中: H_b 和 H_d 分别为水平面上的直接辐射和散射辐射; β 为光伏组件的安装倾角; H_o 为大气层外水平面上的太阳辐射量,其计算方法如式(7).式中: $I_{sc} = 1\,367\text{ W/m}^2$ 为太阳常数; n 表示积日; ϕ 为当地纬度; δ 为太阳赤纬角; ω_s 为日出日落时角.

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} (1 + 0.033) \times \cos \frac{2\pi n}{365} \times I_{sc} \left(\frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s \right) \quad (7)$$

地面反射辐射量 H_{rT} 主要与水平面总辐射量及地面反射率 ρ 有关,其计算方法如式(8).其中,由直接辐射 H_b 和散射辐射 H_d 构成,一般情况下 $\rho = 0.2$.

$$H_{rT} = \frac{1}{2} \rho H (1 + \cos\beta) \quad (8)$$

将式(5)、(6)、(8)代入式(3),即可建立斜单轴跟踪式光伏组件接收太阳辐射量的测算模型如式(9).

$$H_T = H_b \times R_b + H_d \left[\frac{H_b}{H_o} R_b + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_b}{H_o} \right) (1 + \cos\beta) \right] + \frac{1}{2} \rho H (1 + \cos\beta) \quad (9)$$

2.2 安装倾角取值优化

根据建立的太阳辐射量测算模型,可研究安装倾角与接收辐射量间的关系.由式(4)~式(9)可知,获得水平面上的直接辐射 H_b 和散射辐射 H_d 后,通过 R_b 即可推算出光伏电池面板上接收的辐射量.如前所述, R_b 、太阳入射角 θ 和太阳高度角 h 的定义式分别为

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_i$$

$$\cos \theta = \cos \beta \sin h + \sin \beta \cos h = \sin(\beta + h)$$

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

可见, R_b 与太阳入射角 θ 相关,而入射角 θ 与安装倾角 β 和太阳高度角 h 相关.太阳位置参数如太阳高度角 h 、太阳赤纬角 δ 、太阳时角 ω 等每年周而复始地按其运行规律变化,因此,光伏组件全年接收的太阳辐射量与安装倾角 β 相关,故最佳安装倾角的设计问题实质上是以全年接收辐射量最大为目标函数的安装倾角求解过程.一般安装倾角的经验值范围在当地地理纬度 20° 变化区间内^[4],因此,可建立如式(10)的优化模型.式中, H_T 为光伏设备全年接收的太阳辐射量, β 为光伏组件的安装倾角, ϕ 为光伏电站建设地点的地理纬度.

$$\text{目标函数: } \max(H_T) = \min\left(\frac{1}{H_T}\right) = \min f(\beta) \quad (10)$$

$$\text{约束条件: } \phi - 20^\circ \leq \beta \leq \phi + 20^\circ$$

该模型 H_T 为三角函数方程,因此本问题是典型的非线性优化问题,智能优化算法很适合对它的求解.遗传算法^[13]是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种概率搜索算法,它使用群体搜索技术,通过对当前群体施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作,使群体逐步进化到包含或接近最优解的状态.相比其他算法,遗传算法的编码技术和遗传操作比较简单,算法进行全空间并行搜索,从而能够提高效率且不易陷入局部极小.遗传算法求解斜单轴跟踪式光伏阵列的最佳安装倾角,求解流程如图3所示.根据遗传算法中参数的选取建议^[14],设置迭代次数为100,种群规模为50,交叉概率为0.7,变异概率为0.2.

3 实验与分析

首先,验证所建立太阳辐射量测算模型的准确性.通过敦煌(北纬 40.1° ,东经 94.7°)气象观测站获得“敦煌光伏电站分钟气象采集报表^[15]”,对该地点全年9:00~15:00时间段内的太阳辐射实测数据进行汇总;再运用所建立的单轴跟踪式光伏组件太阳辐射量测算模型模拟计算同一时段内的辐射数据.两组数据的对比结果见表1.

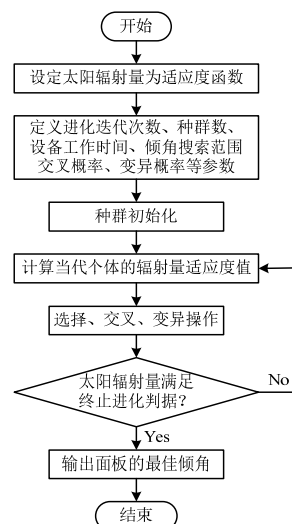


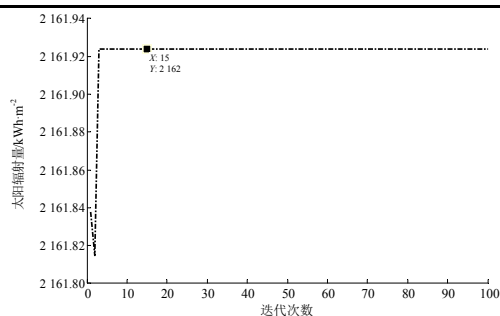
图3 遗传算法求解最佳倾角流程

Fig.3 Process of genetic algorithm for solving the optimal angle

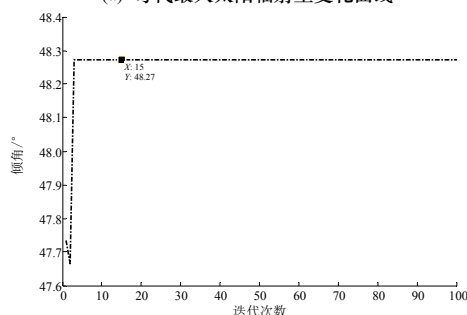
表1 模拟数据与实测数据对比 (kWh/m^2)

Tab.1 Comparison between simulated and measured data

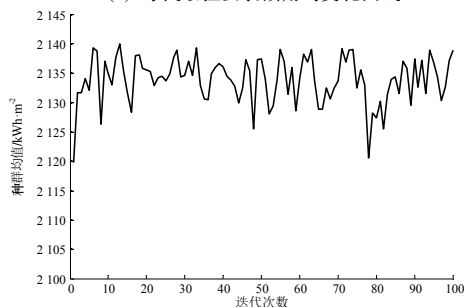
9:00-15:00	地面接收辐射量	光伏组件接收辐射量
实测数据	1 430.65	2 059.50
模拟计算数据	1 489.40	2 136.52
相对误差	4.1 %	3.7 %



(a) 每代最大太阳辐射量变化曲线



(b) 每代最佳安装倾角的变化曲线



(c) 各代太阳辐射量均值变化曲线

图4 遗传算法寻优结果

Fig.4 Optimized results of genetic algorithm

由表1可知,对于地面和跟踪式光伏组件接收的太阳辐射量而言,通过测算模型计算出的模拟数据与气象站实测数据之间的绝对误差分别为4.1%、3.7%,均在5%以内,满足太阳能工程设计和科学研究的需要^[16]。其次,以敦煌为实验地点,用新方法对该地点斜单轴跟踪式光伏组件的安装倾角进行优化设计,图4为运用遗传算法迭代寻优的结果。从图4(a)、4(b)中可以看出,经过15次迭代后,各代太阳辐射量最大值趋于平缓,全年接收的太阳辐射量最大为2 162 kWh/m²,此时的最佳安装倾角为48.27°。由图4(c)可知,各代太阳辐射量的均值在一定范围内上下波动,说明种群无论是在初始阶段、还是进化过程中都很好地保持了多样性,在一定程度上克服了过早收敛,较快搜索到了最优解。

4 结 语

构造了斜单轴跟踪式光伏电池面板接收太阳辐射量的测算模型,分析了电池面板的安装倾角与接收辐射量之间的关系,运用遗传算法构建了安装倾角的优化设计方法。所建立的辐射量测算模型较为准确,能有效获取光伏工程建设地点的电池面板最佳安装倾角,使设备全年接收的太阳辐射量最大。运用该方法可求解光伏组件在不同月份、季节、年度的最佳工作倾角,并可按时段调节,但面板的支架构造和成本会有所增加,具体应用有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 王丽娟,王吉生.不同安装方式太阳电池板倾斜面上辐射量分析计算[J].太阳能,2010(6):20-21.
WANG Lijuan, WANG Jisheng. Analysis and calculation of radiation solar panels installed with various angle[J]. Solar Energy, 2010(6): 20-21.
- [2] YADAV P, CHANDEL S S. Optimal slope angles for solar photovoltaic panels for maximum solar energy gain[J]. International Journal of Sustainable Development and Green Economics, 2013, 2(1): 85-89.
- [3] 冯巍,董宏,杨柳.不同朝向太阳辐射测试及应用对策分析[J].可再生能源,2015,33(1):1-5.
FENG Wei, DONG Hong, YANG Liu. Measurement of solar radiation absorbed in different building orientation and its application analysis[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(1): 1-5.
- [4] 顾超,崔容强.独立光伏系统最佳倾角计算新方法[J].电源技术,2005,29(1):31-34.
GU Chao, CUI Rongqiang. A new way to calculate the optimum angle of solar battery system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2005, 29(1): 31-34.
- [5] 孙韵琳,杜晓荣,王小杨,等.固定式并网光伏阵列的辐射量计算与倾角优化[J].太阳能学报,2009,30(12):1597-1601.
SUN Yunlin, DU Xiaorong, WANG Xiaoyang, et al. Calculation of solar radiation and optimum tilted angle of fixed grid connected solar PV array[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(12): 1597-1601.
- [6] POSADILLO R, LUQUE Lopez R. Evaluation of the performance of three diffuse hourly irradiation models on tilted surfaces according to the utilizability concept[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(12): 2324-2330.
- [7] 杨刘,许启明,张笙,等.一种侧拉式太阳能跟踪装置的研究[J].机械科学与技术,2014,33(3):383-386.
YANG Liu, XU Qiming, ZHANG Sheng, et al. Research on a new side-pull tracking device for solar energy system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(3): 383-386.
- [8] 李宗玮.固定式光伏阵列倾角对辐射量影响分析[J].中小企业管理与科技,2014(5):310-312.
LI Zongwei. Analysis of the influence of fixed photovoltaic array angle of radiation[J]. Management & Technology of SME, 2014(5): 310-312.
- [9] TAHA Ahmed, TAWFIK Hussein. Estimation of Hourly global solar radiation in egypt using mathematical model[J]. International Journal of Latest Trends in Agriculture & Food Sciences, 2012, 2(2): 74-82.
- [10] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surface[J]. Solar Energy, 1979, 23(4): 301-307.
- [11] HANDOYO E A, ICHSANI D. The optimal tilt angle of a solar collector[J]. Energy Procedia, 2013, 32: 166-175.
- [12] CUCUMO M, DE ROSA V, FERRARO V, et al. Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende[J]. Solar Energy, 2007, 81(5): 692-695.
- [13] PEZZELLA F, MORGANTI G, CIASCHETTI G. A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. Computer & Operation Research, 2008, 35(10): 3202-3212.
- [14] 马天政,秦代成,张义民.基于遗传算法的谐波齿轮可靠性优化设计[J].工程设计学报,2011,18(4):246-250.
MA Tianzheng, QIN Daicheng, ZHANG Yimin. Reliability-based optimization of harmonic gears using genetic algorithm[J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(4): 246-250.
- [15] 敦煌光伏工业园太阳能气象站.敦煌光伏电站分钟气象采集报表[Z].敦煌光伏工业园太阳能气象站,2012-05-31.
Solar weather station of Dunhuang photovoltaic industrial park. Photovoltaic minutes of Dunhuang collected meteorological report[Z]. Solar weather station of Dunhuang photovoltaic industrial park, 2012-05-31.
- [16] 邱国全,夏艳君,杨鸿毅.晴天太阳辐射模型的优化计算[J].太阳能学报,2001,22(4):456-460.
QIU Guquan, XIA Yanjun, YANG Hongyi. An optimized clear-day solar radiation model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 456-460.

(编辑 桂智刚)