

文章编号: 0254-0096(2007)02-0169-05

跟踪式光伏发电系统研究

窦伟^{1,2}, 许洪华¹, 李晶¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据某地实测的太阳辐射数据, 仿真比较了配备有单轴跟踪和双轴跟踪等4种跟踪控制的光伏发电系统与固定式光伏发电系统的太阳辐射利用率。并在此基础上对4种跟踪系统的跟踪角控制规律及跟踪控制方式进行了详细的分析, 得出倾纬度角单轴跟踪系统控制规律最为简单, 算法实施更为实用的结论。同时, 也在理论上证明了采用步进式控制方式的跟踪系统能够在保持较高太阳辐射利用率情况下简化控制系统设计, 有利于工程设计及应用。

关键词: 光伏阵列; 跟踪系统; 仿真

中图分类号: TK513.4 **文献标识码:** A

0 引言

为提高光伏发电系统的发电量, 需要提高光伏阵列吸收太阳辐射能量的能力。通常工程中采用的方法是为光伏阵列安装跟踪装置。

文献[1~5]对光伏跟踪系统的运行性能进行了较全面的研究, 并根据当地的地理位置和气候条件提出跟踪系统设计方案。文献[6~9]通过建立数学模型对跟踪系统的性能进行预测与分析, 为光伏发电系统的优化设计提供依据。在国内, 文献[10~12]分别针对固定、单轴跟踪和双轴跟踪光伏发电系统的性能进行研究。但目前还没有文献对上面提到的几种跟踪式光伏发电系统的太阳辐射利用率、跟踪角控制算法和控制方式进行全面的比较分析。

本文结合实测太阳辐射数据, 对4种具有代表性的自动跟踪光伏发电系统的太阳辐射利用率进行了仿真计算, 并以固定光伏发电系统的太阳辐射利用率为基准, 对4种自动跟踪系统的仿真结果进行了详细的比较。同时, 还详细分析了这4种跟踪系统的跟踪角控制规律及跟踪控制方式。分析结果表明倾纬度角单轴跟踪系统控制规律简单、易于工程实施, 并在理论上进一步证明了采用步进式控制方式的跟踪系统能够在保持较高太阳辐射利用率情况下简化控制系统设计, 更有利于工程设计及应用。

1 仿真设计方案

1.1 自动跟踪设计原理

光伏阵列吸收太阳辐射的多少与太阳辐射入射光线和阵列法向之间夹角即入射角 θ_i 有关, 假设沿某方向入射的太阳辐射强度为 E_b , 则太阳电池阵列实际所能利用的太阳辐射强度为 $E_b \times \cos\theta_i$ 。因此, 为提高光伏阵列的太阳辐射利用率, 必须减小入射角 θ_i 。

太阳光入射角 θ_i 随昼夜、季节变化。因此, 固定安装的光伏阵列不能充分吸收太阳辐射的能量。如果采用自动跟踪光伏阵列, 随时根据太阳的运行轨迹调整阵列表面位置以减小入射角 θ_i , 就能够在相同的辐照条件下吸收比固定安装光伏阵列更多的太阳辐射能量。

自动跟踪光伏阵列按照旋转轴的个数可分为单轴跟踪和双轴跟踪。单轴跟踪的光伏阵列只能围绕一个旋转轴旋转, 旋转轴可以有多种放置方式: 水平南北向放置、水平东西向放置或地平面垂直放置等。单轴跟踪光伏阵列只能够跟踪太阳运行的方位角或者高度角的变化。因此, 一般情况下入射角只能减小而不能实现为零。双轴跟踪光伏阵列可沿两个旋转轴运动, 能同时跟踪太阳的方位角与高度角的变化, 在理论上可完全跟踪太阳的运行轨迹以实现入射角为零。

1.2 仿真模型选择

为全面分析各种光伏发电系统的太阳辐射利用率,本文选取固定、单轴跟踪和双轴跟踪光伏阵列这5种模型作为仿真模型。这些模型涵盖了目前实际应用中的各种光伏阵列安装方式,具有代表意义。

1.2.1 系统 A

光伏阵列固定安装,阵列面向正南与水平面的夹角 $\beta = 21^\circ$ (此倾角为当地固定安装电池阵列的最佳倾角^[8])。

1.2.2 系统 B

单轴跟踪,旋转轴与水平面垂直。太阳电池阵列表面与水平面夹角为 $\tau = 25^\circ$ (此倾角值能够保证光伏阵列获得最佳的太阳辐射利用率,倾角值随着安装地点纬度的变化而变化)。

1.2.3 系统 C

单轴跟踪,旋转轴在水平面上的投影与南北向经度线平行,旋转轴与其在水平面投影的夹角 $\beta = 28.39^\circ$ (此倾角的选取是为实现跟踪轴与极轴平行)。

1.2.4 系统 D

单轴跟踪,旋转轴与水平面东西方向平行。

1.2.5 系统 E

双轴跟踪,光伏阵列可绕两个旋转轴转动。第一个旋转轴与水平面垂直,第二个旋转轴与水平面平行。

1.3 太阳辐射入射角计算

入射角 θ_i 是以地平坐标系为参考计算得到的。因此,定义地平坐标系为:以地面上的观察者或某一个固定点为坐标原点,南北方向轴 N 和东西方向轴 E 组成水平面,指向天顶的轴 Z 与水平面垂直,由 ZNE 三条轴所组成的坐标系就称为地平坐标系。太阳在地平坐标系中的位置可以用图 1 中的向量 S 表示。

地平坐标系中固定安装的光伏阵列如图 2 所示。由文献[13],计算太阳直射到该阵列表面的入射角通用公式是:

$$\theta_i = \cos^{-1}(\sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta \cos(\gamma - A)) \quad (1)$$

式中, α 、 A ——地平坐标系中的太阳高度角与方位角; γ ——太阳电池阵列安装方位角。

单轴跟踪系统的跟踪轴在地平坐标系中的放置位置如图 3 所示(图中 UBR 坐标系为以太阳电池阵列表面为基准平面的坐标系, U 轴为太阳电池阵列表面法向轴)。

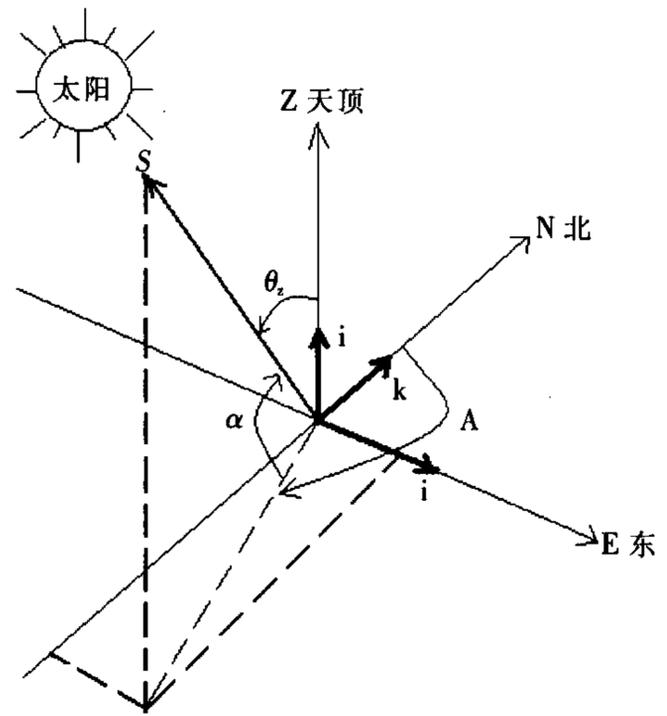


图 1 地平坐标系

Fig.1 Earth-surface coordinate

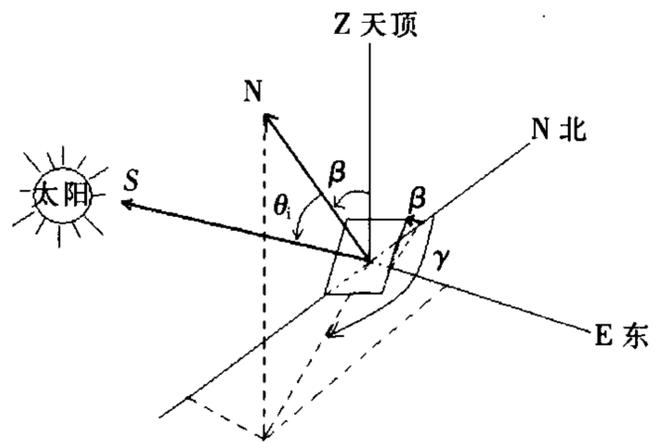


图 2 太阳电池阵列安装位置

Fig.2 Position of PV array in the earth-surface coordinate systems

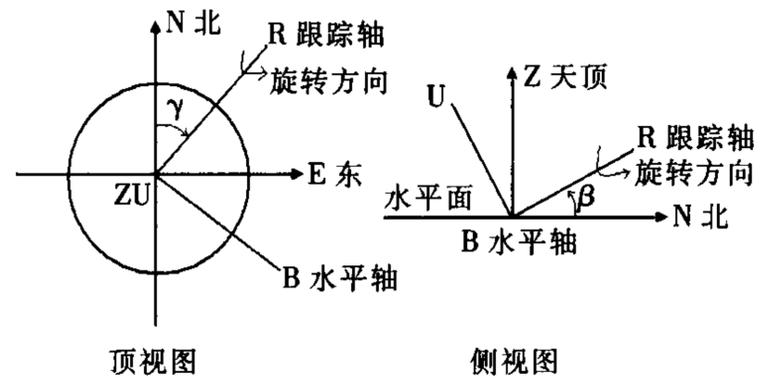


图 3 单轴跟踪系统跟踪轴的放置位置

Fig.3 Position of tracking axis in earth-surface coordinate systems

计算太阳直射到单轴跟踪光伏阵列表面的入射角通用公式是:

$$\theta_i = \cos^{-1} \sqrt{1 - \{\cos(\alpha - \beta) - \cos\beta \cos\alpha [1 - \cos(A - \gamma)]\}^2} \quad (2)$$

由公式(1)、(2)即可计算得到系统 A、B、C、D、E 的入射角,公式如下:

1) 系统 A

$$\theta_i = \cos^{-1}(\sin\alpha \cos 21^\circ + \cos\alpha \sin 21^\circ \cos(180^\circ - A))$$

2) 系统 B

以 $\beta = 25^\circ, \gamma = 0^\circ$ 代入公式(2), 并考虑阵列表面与水平面的夹角 $\tau = 25^\circ$, 则 $\theta_i = \alpha - U$, 其中 $U = 65^\circ$ 。

3) 系统 C

系统 C 的旋转轴 R 与水平面的倾角为当地纬度角, 并且旋转轴 R 在水平面的投影与南北方向经度线 N 平行, 可以得出 $\theta_i = \delta$, 式中 δ 为赤纬角。

4) 系统 D

将 $\gamma = 90^\circ, \beta = 0^\circ$ 代入公式(2)得到:

$$\theta_i = \sqrt{1 - \cos^2\alpha \sin^2 A}$$

5) 系统 E

双轴跟踪系统理论上能够保证任何时刻光伏阵列表面都能跟踪太阳运行轨迹, 因此双轴跟踪系统的入射角可表示为 $\theta_i = 0$ 。

1.4 仿真假设条件

本文选用的太阳辐射数据为某地(北纬 28.39° , 西经 80.76° , 海拔 18.1m) 2000 年 3 月、6 月、9 月和 12 月的实测记录数据。

对光伏发电系统而言, 太阳散射辐射的影响微小。因此在仿真中不计太阳散射辐射 E_{sk} 。同样, 仿真中也忽略地面反射辐射对系统能量输出的影响。

2 仿真计算与分析

由模型的数值仿真得出的光伏阵列表面太阳直射辐射利用率年变化曲线如图 4 所示。图中假设系统 A 的太阳辐射利用率为 100%, 则该图直观显示出跟踪系统 B、C、D、E 在全年大部分时间均能够得

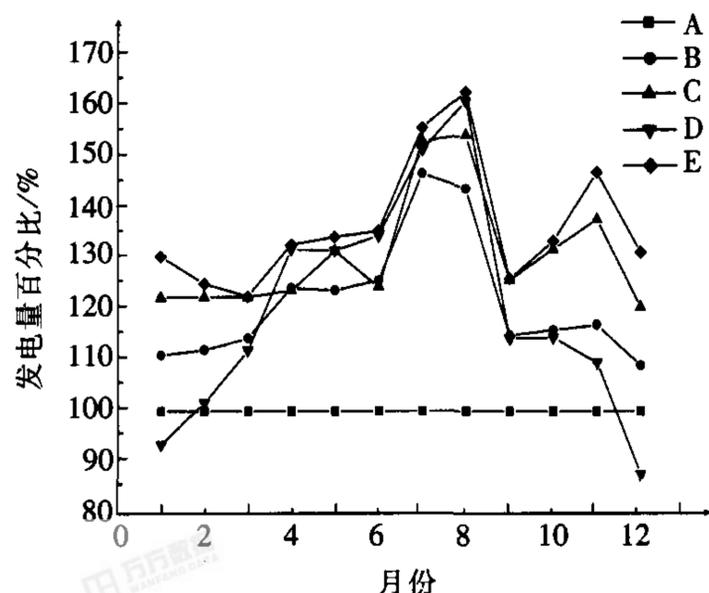


图 4 全年太阳辐射利用率对比图

Fig.4 Utilization ratio of solar radiation in one year

到比系统 A 更高的太阳辐射利用率。

同时, 根据仿真数据对系统 A、B、C、D、E 的太阳辐射利用率进行了统计, 结果如表 1。

表 1 太阳辐射利用率统计结果

Table 1 Statistic result of utilization ratio of solar radiation

	太阳辐射利用率/%				
	3 月	6 月	9 月	12 月	全年
系统 A	100	100	100	100	100
系统 B	114.4	125.7	115.0	109.7	121.7
系统 C	122.5	124.4	125.9	120.5	131.9
系统 D	112.0	128.5	114.3	87.6	120.3
系统 E	122.6	135.5	126.1	131.3	136.4

(注: 表中全年发电效率的计算是根据 1~12 月份的系统发电量求出的结果。表中只列出其中有代表性的 3、6、9、12 月的发电效率统计值)

根据统计结果可得出结论如下:

1) 比较于其它跟踪系统, 系统 E 在所有情况下都能够最大效率的利用太阳辐射能量。理论上直射到系统 E 的光伏阵列表面的太阳辐射强度就是实际到达地球表面的太阳辐射。因此, 系统 E 的变化曲线可以代表实际太阳辐射强度。而固定安装光伏阵列即系统 A 的全年太阳辐射利用率最低。

2) 采用倾纬度角方式安装的单轴跟踪系统 C 的太阳辐射利用率在多数情况下都高于另外两种单轴跟踪系统 B 和系统 D, 尤其在 3 月和 9 月这一结果更为明显。这是因为在 3 月和 9 月, 太阳辐射直射地球赤道附近地区, 此时 $\delta \approx 0^\circ$, 这段时间内系统 C 的性能接近双轴跟踪系统 E 的性能。

3) 夏季, 跟踪系统 B、C、D、E 更能有效利用太阳辐射能量。因为, 此时太阳运行到北半球, 太阳辐射强度增高、高度角变大, 跟踪系统 B、C、D、E 吸收的太阳辐射能量明显高于其它季节。而系统 A 的光伏阵列安装倾角固定, 太阳辐射强度的增加并不能显著增加系统吸收的太阳辐射能量。

4) 冬季, 系统 D 的太阳辐射利用率低于系统 A。这是因为, 系统 D 跟踪太阳高度角, 而在冬季, 太阳运行在南半球, 太阳高度角较低。此时对太阳高度角进行跟踪反而增大了入射角, 降低了系统 D 吸收的太阳辐射能量。

3 跟踪控制系统特性分析

自动跟踪光伏阵列能够提高太阳辐射利用率,

但也需要很高的初始安装成本和后期维护费用。而降低跟踪系统成本的关键是设计简单可靠的跟踪控制器。

3.1 跟踪角变化规律

跟踪控制系统的控制对象是旋转轴的跟踪角 ρ , 不同跟踪系统的跟踪角变化规律差别很大。由文献[13], 推导出单轴跟踪系统 B、C、D 和双轴跟踪系统 E 的跟踪角变化规律, 见表 2。

表 2 跟踪角变化规律

Table 2 Tracking angle regulation algorithm

太阳电池阵列安装方式	跟踪角变化规律
系统 B	$\rho = -A$
系统 C	$\rho = w$
系统 D	$\rho = \tan^{-1}(\cos(A)/\tan\alpha)$
系统 E 地平坐标 系跟踪	$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{-\cos\phi \sin\delta \sin w}{\cos\alpha} \left(\frac{dw}{dt}\right)$ $\frac{dA}{dt} = \frac{\cos\delta}{\cos A \cos^2 \alpha} (\cos\delta \sin^2 w \tan\alpha \cos\phi - \cos\alpha \cos w) \frac{dw}{dt}$
系统 E 地心坐标 系跟踪	$\frac{d\delta}{dt} = \frac{0.01634}{\cos\delta} \sin(0.98563(N - 173))$

由表 2 可知:

1) 实现双轴跟踪需要同时控制两个变量, 复杂的控制增加了系统成本, 系统运行可靠性降低。双轴跟踪系统更适合于需要非常准确跟踪太阳运行轨迹的聚光系统。

2) 单轴跟踪系统 C 的跟踪角变化只与太阳运行时角 w 有关, 时角 w 不受季节变化的影响, 这令系统 C 的跟踪控制变得尤为简单。

3) 相对于系统 C 而言, 系统 B 和 D 的跟踪角变化与太阳高度角和方位角有关, 控制相对复杂。

3.2 跟踪控制方式

通常, 跟踪控制可以采用连续跟踪和步进跟踪两种基本方式。连续跟踪方式为跟踪角按照变化规律随时间连续调节以跟随太阳运行轨迹的变化。而步进跟踪方式则为每隔一段时间调整一次跟踪角, 其余时间光伏阵列跟踪角固定不动。显然, 步进跟踪方式简化了系统控制, 但同时也降低太阳辐射的利用率。

如果能从数量上得到连续跟踪和步进跟踪光伏阵列之间太阳辐射利用率的关系, 必将对跟踪系统

控制方案的选择有很大帮助。

固定不动的光伏阵列在 $(-T/2) \sim (T/2)$ 时间内所吸收的太阳辐射能量可表示为:

$$W = \int_{-T/2}^{T/2} E_b(t) \cos\theta_i(t) dt \quad (3)$$

式中, W ——光伏阵列所吸收的太阳辐射总量; $E_b(t)$ ——太阳辐射强度。

假设在这段时间内, 太阳直射辐射强度 $E_b(t)$ 保持不变, 则:

$$W = E_b T \frac{\sin(wT/2)}{wT/2} \quad (4)$$

式中, $E_b T$ —— $(-T/2) \sim (T/2)$ 时间内的曝辐量。

公式(4)表明, 如果某段时间之内光伏阵列固定不动, 那么阵列所吸收的太阳辐射能量可用公式(4)求出。假设 $T = 1h$, 并且在此时间段内只考虑太阳的方位角变化, 则可算出 $\frac{\sin(wT/2)}{wT/2} = 0.9971$ 。

这一结果充分说明如果步进跟踪系统每隔 1h 调整一次跟踪角, 则该光伏阵列的太阳辐射利用率与连续跟踪系统的太阳辐射利用率差别微小。因此, 采用步进跟踪控制的光伏阵列不但设计简单, 而且也可获得相当满意的跟踪效果。

4 结 论

综合上述分析可以看出:

1) 双轴跟踪系统能够最大效率的利用太阳辐射能量, 但是其控制复杂, 系统维护费用高;

2) 单轴跟踪系统能够得到比固定安装系统更高的太阳辐射利用率, 而其控制又简单于双轴跟踪系统。尤其是倾纬度角单轴跟踪系统 C, 在太阳辐射能量利用率相对较高的情况下, 控制最为简单;

3) 相对于连续跟踪控制光伏阵列而言, 步进跟踪控制光伏阵列能够在较高太阳辐射利用率情况下, 大大简化控制系统的结构和控制方式。

符号表

E_b	太阳直射辐射强度
E_{bh}	水平面上太阳直射辐射强度
E_{dh}	水平面上太阳散射辐射强度
E_{th}	水平面上太阳总辐射强度
θ_z	天顶角
θ_i	入射角
δ	太阳赤纬角

- ϕ 纬度
 β 太阳能电池阵列倾角
 γ 太阳能电池阵列方位角
 ω 时角
 α 太阳高度角
 A 太阳运行方位角

[参考文献]

- [1] Baltas Platon, Tortoreli Marina, Russell Paul E. Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays [J]. *Solar Energy*, 1986, 37(2): 147—163.
- [2] Emslie William A, Dollard Carol J. Photovoltaic pilot plant [A]. *Photovoltaic Specialists Conference [C]*, 1988, 2: 1283—1288.
- [3] Gordon J M, Wenger Howard J. Central-station solar photovoltaic systems: field layout, tracker, and array geometry sensitivity studies [J]. *Solar Energy*, 1991, 46(4): 211—217.
- [4] Helwa N H, Bangat A B G, ElShenawy E T. Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems [J]. *Energy Source*, 2000, 22: 23—34.
- [5] Hoff T, Joseph J J. Maximizing the benefits derived from PV plants: selecting the best plant design and plant locations [C]. *Photovoltaic Specialists Conference*, 1990, 12: 892—897.
- [6] Helwa N H, Bangat A B G, ElShenawy E T. Computation of the solar energy captured by different solar tracking systems [J]. *Energy Source*, 2000, 22: 35—44.
- [7] Ai Bin, Shen Hui, Ban Qun, et al. Calculation of the hourly and daily radiation incident on three step tracking planes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44: 1999—2011.
- [8] Ineichen P, Zelenka A, Guisan O, et al. Solar radiation transposition models applied to a plane tracking the sun [J]. *Solar Energy*, 1988, 41(4): 371—377.
- [9] Evans D L. Simplified method for predicting photovoltaic array [J]. *Solar Energy*, 1981, 27(6): 555—560.
- [10] 张迎胜, 唐忆春, 杨波. 一种新型的极轴式自动跟踪装置 [J]. *太阳能学报*, 1994, 15(4): 377—379.
- [10] Zhang Yingsheng, Tang Yichun, Yang Bo. A new design of automatic tracker with polar axis [J]. *Acta Energetica Sinica*, 1994, 15(4): 377—379.
- [11] 张迎胜. 子午坐标双轴完全跟踪系统 [J]. *太阳能学报*, 1992, 13(3): 298—302.
- [11] Zhang Yingsheng. The two axes complete tracker with meridian coordinates [J]. *Acta Energetica Sinica*, 1992, 13(3): 298—302.
- [12] 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.
- [12] Yang Jinhuan. Analysis of optimum tilted angle for fixed photovoltaic arrays [J]. *Acta Energetica Sinica*, 1992, 13(1): 86—92.
- [13] Stine W B, Harrigan R W. *Solar energy fundamentals and design [M]*. New York: John Wiley.

ANALYSIS OF SOLAR PV TRACKING SYSTEM

Dou Wei^{1,2}, Xu Honghua¹, Li Jing¹

(1. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academic of Science, Haidian District, Beijing 100080, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academic of Science, Shijingshan District, Beijing 100039, China)*

Abstract: The output of solar PV power generation systems depends on the solar energy received by the PV array. Solar Tracking system can increase solar energy absorption. Based on the recorded solar radiation data, a simulation was carried out and the results shows that tracking PV array receives more energy than the fixed PV array under the same circumstances. The tracking angle control algorithms of different tracking systems were also analyzed and tilted-latitude one axis tracking system has the simplest tracking control algorithm. Finally, theoretic analysis of stepwise tracking performance was studied. Compared with continuous tracking system, stepwise tracking system simplifies the tracking control system without any great loss in power.

Keywords: PV array; tracking system; simulation