

任意朝向的光伏电池板最佳安装倾角的研究

梅晓妍¹, 王民权¹, 邹琴梅², 黄文君²

(1. 宁波职业技术学院 海天学院, 浙江 宁波 315800; 2. 浙江大学 智能系统与控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:提出一种针对任意朝向安装的固定式光伏电池板计算最佳安装倾角的计算方法。通过建立倾斜面上瞬时光辐射量数学模型,推导出年聚光量的计算方法。以步长为 0.2° 逐一计算不同安装倾角下的年辐射量,寻优比较得到任意朝向安装的固定式光伏电池板的最佳安装倾角。以太阳能资源丰富的青海省部分地区为例,根据晴好天气条件下的太阳辐射参数,计算了不同坡度、不同朝向安装的光伏电池板的年聚光量。

关键词:任意朝向;光伏电池板;年聚光量;最佳倾角

中图分类号: TM 914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-087 X(2014)04-0687-04

Research on optimum tilt angle of PV panel for arbitrary direction installation

MEI Xiao-yan¹, WANG Min-quan¹, ZOU Qin-mei², HUANG Wen-jun²

(1. Faculty of Haitian, Ningbo polytechnic, Ningbo Zhejiang 315800, China;

2. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: A method of calculating the optimum tilt angle of fixed PV panels for arbitrary direction installation was presented. By establishing a model of instantaneous photoelectric energy on tilted surface, a method of annual collection energy was deduced. At 0.2° step size, the annual radiation energy at different assembled tilt angles were calculated respectively, optimum title angle of fixed PV panels for arbitrary direction installation was obtained by comparing with optimization. The regions of Qinghai province rich in solar resources were taken as an example, annual collection energy of PV panels installed by different slope and different orientation were calculated according to the data of solar radiation in sunny days.

Key words: arbitrary direction installation; PV panel; annual collection energy; optimum tilt angle

提高效率 and 降低成本是制约光伏发电的难点问题。全国各地经纬度不同,每个月份太阳辐射量有差异。在实际工程应用中,对于固定式安装的光伏电池板,最佳安装倾角的确定是保证全年接收太阳辐射总量最大、进而提高光伏发电效率的首要问题。

有关最佳倾角的研究国内外都有人进行过一些有益的探索。文献[1]通过建模和寻优得到适合土耳其 Sanliurfa 地区获取年辐射量最大的倾角;文献[2]针对负荷全年均衡分布的系统,提出在确定最佳倾角时应综合考虑方阵面上太阳辐射照度的连续性、均匀性和极大性;文献[3]在散射辐射各向同性的假定下,推导出了南向倾斜面上平均太阳总辐射的最佳倾角公式;文献[4]针对光伏组件的摆放和不同阵列的间距进行了计算和分析;文献[5]针对均衡性、季节性、临时性三种负载的

特点,根据 Hay 的天空散射辐射各向异性的模型,计算了倾斜面上的太阳辐射照量,给出了夏季型、冬季型负荷的参考倾角;文献[6]针对不同方位倾斜面的太阳辐射量及最佳倾角进行了计算。

从查阅资料看,现有研究的假设是在春分日或秋分日,固定式光伏电池板安装方位角正向朝南,即光伏电池板的法线在地面的投影与当地午时太阳射线在地面的投影重合,而实际工程中受地理和环境条件的限制,一些光伏电池板安装时无法做到正向朝南。本文考虑在不增加成本的前提下,针对非正南向安装的光伏电池板进行最佳倾角的计算与仿真,并以太阳能资源丰富的青海部分地区为例,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 各种算法模型比较

目前在光伏板收集太阳能辐射量的计算中,主要考虑光伏板收集面的直射辐射、散射辐射和反射辐射。在散射辐射的计算上又有 Liu 和 Jordan 等人提出的各向同性分布^[7]和 Hay 提出的各向异性分布^[8]两种模型。光伏板表面获取能量的计算模型视能够获取的气象资料而定,具体可利用日辐射量、月平均辐射量、瞬时辐射量等建立数学模型。

收稿日期:2013-09-03

基金项目:国家自然科学基金 2012 年度资助项目[61273100];浙江省教育厅 2012 年度科研计划项目[Y201226216];宁波职业技术学院 2013 年度教师专业发展专项科研项目[NZ13017ZF]

作者简介:梅晓妍(1981—),女,浙江省人,讲师,硕士,主要研究方向为光伏板聚光效益和工业自动化。

1.1 以倾斜面上日总辐射量建立模型

在能够获得当地完整气象资料的情况下,可采取日辐射量建立算法模型。设 H_T 和 H_i 分别为一年和一天的倾斜面上太阳辐射量, H_b 、 H_d 、 H 分别表示水平面上一天的太阳直接辐射量、散射辐射量、总辐射量, ρ 为地面反射率, R_b 、 R_d 、 R_g 分别为倾斜面上的直接辐射量、天空散射辐射量、地面散射辐射量与水平面上的辐射量之比, β 为光伏板安装倾角, 则一年的太阳总辐射量为^[9]:

$$H_T = \sum_{n=1}^{365} H_i = \sum_{n=1}^{365} (H_b \cdot R_b + H_d \cdot R_d + \rho \cdot H \cdot R_g)_n \quad (1)$$

设 K_b 为直接辐射比例系数, 即水平面上直接辐射量与总辐射量的比值; K_t 为透明系数, 则光伏板最佳倾角可由式(1)微分得到: $\frac{dH_T}{d\beta} = \sum H_n [(\rho_n + k_{bn} k_t - 1) \frac{\sin \beta}{2} + k_{bn} (1 + k_t - k_{bn} k_t) \frac{\partial R_{gn}}{\partial \beta}] = 0$ 时对应的值 β , 即为光伏板安装的最佳倾角。

1.2 以倾斜面上月辐射量建立模型

在能够获得当地各月完整气象资料的情况下,可采取月辐射量建立算法模型。设 B 为倾角, \bar{H}_T 为光伏板表面上每月所得的总辐射量, \bar{H}_b 为水平面上月总直射辐射量, \bar{H}_d 为水平面上月总散射辐射量, \bar{G} 为水平面上月总辐射量, \bar{R}_b 、 \bar{R}_d 、 ρ 分别为倾斜面与水平面上的直射辐射的月总量之比、倾斜面上月散射辐射量与水平面上月散射辐射量之比、地面反射率, 则光伏板倾斜面上年辐射能量为^[10]:

$$\bar{H}_T = \sum_{i=1}^{12} [\bar{H}_{bi} \cdot \bar{R}_{bi} + \bar{H}_{di} \cdot \bar{R}_{di} + \rho_i \cdot \bar{G}_i (1 - \cos \beta) / 2] \quad (2)$$

对于某一给定的月份, 利用计算机循环寻优法可求出各月的最佳倾角和全年的最佳倾角 β 。

1.3 以倾斜面上瞬时辐射量建立模型

无法获得当地详细太阳辐射资料时,可采用瞬时辐射量建立算法模型。设 t_{s-rise} 、 t_{s-set} 分别为每日太阳在倾斜面上的升起和日落时间, 设 H_{bi} 、 H_{di} 、 H_{gi} 分别为倾斜面上瞬时直射辐射量、散射辐射量和反射辐射量, 则光伏板倾斜面上年聚光量为:

$$H_a = \sum_{n=1}^{365} \int_{t_{s-rise}}^{t_{s-set}} (H_{bi} + H_{di} + H_{gi}) dt \quad (3)$$

在此基础上,围绕当地纬度角在 $\pm 20^\circ$ 范围内以 0.2° 为步进值,逐次计算不同倾角下光伏板上收集的能量,经过循环比较得到年累计能量最大时对应的最佳倾角。

青海地区属于我国太阳能资源一类地区,太阳能照射充足,空气透明度良好,海拔较高,年降雨量少,计算时可以按全晴天无云日做典型计算。本文以瞬时辐射量建立动态模型并进行相关的仿真计算。

2 倾斜面瞬时辐射量动态模型的建立

2.1 参数定义

H_0 —太阳辐射常数,地球大气上界垂直于太阳直射方向单位面积上的太阳辐射通量,取 1367 W/m^2 ;

H_i —太阳光透过大气层后到达地平面的辐射量(W/m^2);

n —日序,计算日在全年中的序列数;

φ —当地地理位置的纬度角($^\circ$);

θ —当地地理位置的经度角($^\circ$),我国处于北半球,这里的

经度指的是东经度;

δ —赤纬角($^\circ$),地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角;

ω —时角($^\circ$),当地太阳所在的时圈与当地 12 时时圈之间的夹角;

α_s —太阳高度角($^\circ$),即太阳光线与地平面之间的夹角;

γ_s —太阳光方位角($^\circ$),太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角;

β_s —光伏电池板安装倾角($^\circ$),即光伏电池板平面与地平面的夹角;

γ_b —光伏电池板方位角($^\circ$),光伏电池板法线在地平面的投影与当地春分日午时正南向之间的夹角;

ψ —光伏电池板中心法线与太阳光线的夹角($^\circ$)。

图 1 为太阳角示意图。

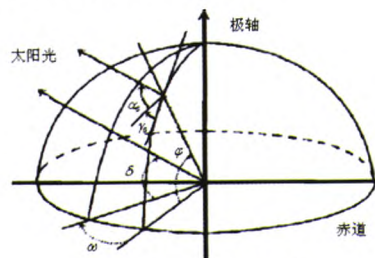


图 1 太阳角示意图

2.2 瞬时辐射量数学模型

基于以上定义,任意时刻,太阳光透过大气层后到达地平面的辐射量 H_i 与大气层外的光辐射量 H_0 有如下关系^[11]:

$$H_i = H_0 (1 + 0.0344 \cos \frac{360^\circ n}{365}) \quad (4)$$

赤纬角 δ 是赤道面与黄道面之间的夹角,任一天的赤纬角与日序 n 可由库伯方程^[11]求得:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin(360^\circ \times \frac{284 + n}{365}) \quad (5)$$

太阳时角 ω 与当地太阳时 t_{sm} 相关,可表示为:

$$\omega = 15^\circ \times (t_{sm} - 12) = 15^\circ \times [t_{bj} + \frac{E - 4(120^\circ - \theta)}{60} - 12] \quad (6)$$

式中: t_{bj} 表示北京时间; E 表示地球绕太阳公转和转速变化而产生的修正时差,含义如下:

$$E = 9.87 \times \sin 2\lambda - 7.53 \cos \lambda - 1.5 \sin \lambda \quad (7)$$

$$\lambda = 360^\circ \times (n - 81) / 364$$

太阳高度角 α_s 和方位角 γ_s 与当地纬度 φ 、赤纬角 δ 和太阳时角 ω 关系如下^[12]:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \\ \cos \gamma_s &= \frac{\sin \alpha_s \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \end{aligned} \quad (8)$$

以光伏电池板板几何中心为原点建立空间三维直角坐标系(图 2)。定义 X 为正南、 Y 为正东,方向均与地面平行; Z 指向天顶,垂直于 X - Y 平面。设太阳入射光线 H 指向地球表面,其在坐标系中的方向向量为 $(-\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s, -\cos \alpha_s \cdot \sin \gamma_s, -\sin \alpha_s)$; 光伏电池板中心法线 N 指向天空,在坐标系中的方向向量为 $(\sin \beta_s \cdot \cos \gamma_b, \sin \beta_s \cdot \sin \gamma_b, \cos \beta_s)$,则二者之间的夹角 ψ 可表示为:

$$\cos\psi = \frac{(-\cos\alpha_s \cdot \cos\gamma_s, -\cos\alpha_s \cdot \sin\gamma_s, -\sin\alpha_s) \cdot (-\sin\beta_B \cdot \cos\gamma_B, -\sin\beta_B \cdot \sin\gamma_B, -\cos\beta_B)}{|(-\cos\alpha_s \cdot \cos\gamma_s, -\cos\alpha_s \cdot \sin\gamma_s, -\sin\alpha_s)| \cdot |(-\sin\beta_B \cdot \cos\gamma_B, -\sin\beta_B \cdot \sin\gamma_B, -\cos\beta_B)|} \quad (9)$$

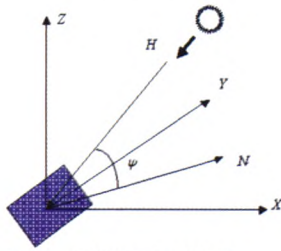


图2 光伏板三维坐标系

忽略地表曲率和大气折射的影响,在北半球,纬度为 φ 、倾角为 β_B 、任意朝向安装的光伏电池板上日出日落时间 t_{s-rise} 和 t_{s-set} 可由下两式确定:

$$\sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega = 0$$

$$\omega = \min \left\{ \begin{array}{l} \arccos(-\tan\delta \tan\varphi) \\ \arccos[-\tan\delta \tan(\varphi - \beta)] \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$t_{s-rise} = \max \left\{ \begin{array}{l} 12 - (\omega - \gamma_B) / 15^\circ \\ 12 - (\omega) / 15^\circ \end{array} \right\}$$

$$t_{s-set} = \min \left\{ \begin{array}{l} 12 + (\omega + \gamma_B) / 15^\circ \\ 12 + \omega / 15^\circ \end{array} \right\} \quad (11)$$

设 k_b 为太阳光的直射辐射透明系数^[13],它与当地海拔高度有关,则太阳光在倾斜面上的直射辐射量为:

$$H_{bi} = H_0 \cdot k_b \cdot \cos\psi \quad (12)$$

设 k_d 为太阳光散射辐射透明系数,按Hamilton各向异性散射辐射模型^[14],倾角为 β_B 的光伏板上瞬时散射辐射量为:

$$H_{di} = H_0 \cdot k_d \cdot \sin\alpha_s \cdot \frac{2 + \cos\beta_B}{3} \quad (13)$$

太阳光的反射辐射透明系数 k_g 与当地地表的坡度、坡向、

反射率相关,假设反射面是个朗伯体^[15],则反射辐射量为:

$$H_{gi} = 0.2 \cdot H_0 \cdot k_g \cdot \sin\alpha_s \cdot \frac{1 - \cos\beta_B}{2} \quad (14)$$

这样,在倾斜的光伏板上太阳光年聚光量为:

$$H_a = \sum_{n=1}^{365} \int_{t_{s-rise}}^{t_{s-set}} H_0 (k_b \cdot \cos\psi + k_d \cdot \sin\alpha_s \cdot \frac{2 + \cos\beta_B}{3} + 0.2 \cdot k_g \cdot \sin\alpha_s \cdot \frac{1 - \cos\beta_B}{2}) dt \quad (15)$$

3 计算实例

为检验算法的可行性,以式(15)对日本新能源产业技术开发机构(NEDO)发布的日本部分光伏电场光伏板的最佳安装倾角^[16]进行验证,计算结果如表1所示。

表1 仿真结果与NEDO发布结果对比

| 地区 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 海拔/m | 倾角/(°) | 仿真结果/(°) | 误差/% |
|-----|--------|--------|------|--------|----------|-------|
| 东京 | 139.7 | 35.7 | 5 | 32.0 | 33.2 | 4.06 |
| 仙台 | 140.9 | 38.3 | 39 | 33.8 | 35.2 | 4.44 |
| 名古屋 | 136.9 | 35.2 | 51 | 32.1 | 32.8 | 2.18 |
| 札幌 | 141.0 | 43.1 | 17 | 35.4 | 39.0 | 10.17 |
| 横滨 | 139.7 | 35.7 | 39 | 31.5 | 33.4 | 5.71 |

表1表明,在北半球的实际安装倾角和仿真结果均略小于当地的北纬度,实际安装倾角与本文的仿真结论相近,证明本算法的可行性。基于此,本文针对我国太阳能资源丰富的青海省部分地区任意朝向安装的光伏板最佳倾角进行了仿真计算。

3.1 任意朝向安装的最佳倾角

本文按照相隔 5° 的间隔,分别仿真计算了光伏电池板方位角 β_B 与正南向夹角在 $\pm 20^\circ$ 范围内固定安装时的最佳设计倾角 β_B ,详细结果如表2所示。

表2 不同安装方位角下的最佳安装倾角

| 地区 | 地理参数 | | | 光伏电池板安装方位角 $\gamma_B/(^\circ)$ | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 东经/(°) | 北纬/(°) | 海拔/m | -20 | -15 | -10 | -5 | 0 | +5 | +10 | +15 | +20 |
| | | | | 光伏电池板最佳安装倾角 $\beta_B/(^\circ)$ | | | | | | | | |
| 西宁 | 101.74 | 36.56 | 2295 | 32.8 | 33.6 | 34.2 | 34.4 | 34.6 | 34.4 | 34.2 | 33.6 | 33.0 |
| 海东·平安 | 102.09 | 36.47 | 2125 | 32.8 | 33.6 | 34.0 | 34.4 | 34.4 | 34.0 | 33.4 | 32.6 | |
| 海北·海晏 | 100.99 | 36.89 | 3080 | 33.4 | 34.0 | 34.6 | 35.0 | 35.0 | 34.8 | 34.2 | 33.4 | |
| 黄南·同仁 | 102.02 | 35.54 | 2491 | 32.0 | 32.8 | 33.4 | 33.6 | 33.8 | 33.6 | 33.4 | 32.8 | 32.0 |
| 玉树·结古 | 96.97 | 33.03 | 3681 | 30.2 | 31.0 | 31.4 | 31.8 | 31.8 | 31.4 | 31.0 | 30.4 | |
| 海西·德令哈 | 97.23 | 37.22 | 2982 | 33.6 | 34.4 | 35.0 | 35.2 | 35.4 | 35.4 | 34.8 | 34.2 | 33.6 |
| 格尔木 | 94.89 | 36.41 | 2808 | 33.0 | 33.6 | 34.2 | 34.6 | 34.6 | 34.0 | 33.6 | 32.8 | |
| 果洛·玛多 | 98.26 | 34.92 | 4272 | 32.0 | 32.8 | 33.2 | 33.6 | 33.6 | 33.4 | 32.8 | 32.0 | |
| 民和 | 102.81 | 36.30 | 1780 | 32.6 | 33.2 | 33.8 | 34.2 | 34.2 | 33.6 | 33.2 | 32.4 | |
| 河南 | 101.62 | 34.75 | 3500 | 31.6 | 32.4 | 33.0 | 33.2 | 33.4 | 33.2 | 33.0 | 32.4 | 31.8 |
| 共和 | 100.61 | 36.27 | 2850 | 32.8 | 33.4 | 34.0 | 34.4 | 34.4 | 34.2 | 33.6 | 32.8 | |
| 门源 | 101.62 | 37.37 | 2800 | 33.6 | 34.4 | 35.0 | 35.2 | 35.6 | 35.2 | 35.0 | 34.4 | 33.6 |
| 海南 | 101.43 | 36.05 | 2835 | 32.6 | 33.4 | 33.8 | 34.2 | 34.2 | 34.0 | 33.4 | 32.8 | |

3.2 光伏板年聚光量预计

根据式(15),本文对表2中所列地区单位面积的光伏板年预计辐射总量进行了仿真计算,结果如表3所示。

3.3 坡度不同朝向不同的年聚光量

某些智能建筑为降低成本,其表面的光伏电池板安装时常常按房屋的朝向和坡度就势安装,以青海省海西市德令哈

地区为例,计算了不同坡度、不同朝向的聚光量,结果如表4所示。

3.4 坡度不同朝向不同的年聚光量比较

根据表4数据,对德令哈地区不同安装朝向的光伏电池板最佳倾角与任意安装倾角下的年聚光量做了比较,具体对比数据如表5所示。从表5可以看出,当地年聚光量最大增益

表3 最佳安装倾角时光伏板年预计辐射总量

| 地区 | 朝向 | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -20° | -15° | -10° | -5° | 0° | +5° | +10° | +15° | +20° |
| 西宁/(MJ·m ⁻²) | 9.994 | 10.07 | 10.12 | 10.16 | 10.17 | 10.16 | 10.12 | 10.07 | 9.990 |
| 海东·平安/(MJ·m ⁻²) | 9.947 | 10.02 | 10.07 | 10.11 | 10.12 | 10.11 | 10.07 | 10.02 | 9.946 |
| 海北·海晏/(MJ·m ⁻²) | 10.21 | 10.29 | 10.36 | 10.38 | 10.39 | 10.38 | 10.35 | 10.29 | 10.21 |
| 黄南·同仁/(MJ·m ⁻²) | 10.11 | 10.18 | 10.24 | 10.27 | 10.28 | 10.28 | 10.24 | 10.18 | 10.11 |
| 玉树·结古/(MJ·m ⁻²) | 10.59 | 10.66 | 10.71 | 10.74 | 10.75 | 10.74 | 10.71 | 10.66 | 10.59 |
| 海西·德令哈/(MJ·m ⁻²) | 10.16 | 10.24 | 10.30 | 10.33 | 10.34 | 10.33 | 10.30 | 10.24 | 10.16 |
| 格尔木/(MJ·m ⁻²) | 10.16 | 10.23 | 10.28 | 10.32 | 10.33 | 10.32 | 10.29 | 10.23 | 10.16 |
| 果洛·玛多/(MJ·m ⁻²) | 10.66 | 10.74 | 10.80 | 10.83 | 10.84 | 10.83 | 10.80 | 10.74 | 10.66 |
| 民和/(MJ·m ⁻²) | 9.852 | 9.924 | 9.976 | 10.01 | 10.02 | 10.01 | 9.975 | 9.923 | 9.851 |
| 河南/(MJ·m ⁻²) | 10.45 | 10.52 | 10.58 | 10.61 | 10.62 | 10.61 | 10.58 | 10.52 | 10.45 |
| 共和/(MJ·m ⁻²) | 10.18 | 10.25 | 10.31 | 10.34 | 10.35 | 10.34 | 10.31 | 10.25 | 10.18 |
| 门源/(MJ·m ⁻²) | 10.10 | 10.18 | 10.24 | 10.27 | 10.28 | 10.27 | 10.23 | 10.18 | 10.10 |
| 海南/(MJ·m ⁻²) | 10.19 | 10.26 | 10.32 | 10.35 | 10.36 | 10.35 | 10.31 | 10.26 | 10.18 |

表4 德令哈地区不同坡度、不同安装朝向的光伏电池板年聚光量

| 建筑物坡度 (安装倾角)/(°) | 不同坡度、不同安装朝向的光伏电池板年聚光量/(MJ·m ⁻²) | | | | | | | | |
|---------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | -20° | -15° | -10° | -5° | 0° | +5° | +10° | +15° | +20° |
| 10 | 9.426 | 9.450 | 9.467 | 9.478 | 9.481 | 9.478 | 9.467 | 9.450 | 9.425 |
| 13 | 9.599 | 9.631 | 9.653 | 9.667 | 9.671 | 9.667 | 9.653 | 9.630 | 9.599 |
| 16 | 9.750 | 9.789 | 9.816 | 9.833 | 9.839 | 9.833 | 9.816 | 9.788 | 9.750 |
| 19 | 9.878 | 9.924 | 9.956 | 9.976 | 9.983 | 9.976 | 9.956 | 9.923 | 9.877 |
| 22 | 9.983 | 10.04 | 10.07 | 10.10 | 10.10 | 10.10 | 10.07 | 10.03 | 9.982 |
| 25 | 10.06 | 10.12 | 10.17 | 10.19 | 10.20 | 10.19 | 10.17 | 10.12 | 10.06 |
| 28 | 10.12 | 10.19 | 10.23 | 10.26 | 10.27 | 10.26 | 10.23 | 10.19 | 10.119 |
| 31 | 10.15 | 10.23 | 10.28 | 10.31 | 10.32 | 10.31 | 10.28 | 10.23 | 10.15 |
| 34 | 10.16 | 10.24 | 10.30 | 10.33 | 10.34 | 10.33 | 10.30 | 10.24 | 10.16 |
| 37 | 10.15 | 10.23 | 10.29 | 10.33 | 10.34 | 10.33 | 10.29 | 10.23 | 10.15 |
| 40 | 10.11 | 10.20 | 10.26 | 10.30 | 10.32 | 10.30 | 10.26 | 10.20 | 10.11 |
| 43 | 10.04 | 10.14 | 10.21 | 10.25 | 10.27 | 10.25 | 10.21 | 10.14 | 10.04 |
| 46 | 9.956 | 10.06 | 10.13 | 10.18 | 10.19 | 10.18 | 10.13 | 10.06 | 9.954 |

表5 不同坡度-朝向与最佳安装倾角年聚光增益比较

| 建筑物 坡度/(°) | 建筑物朝向 | | | | | | | | |
|---------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -20° | -15° | -10° | -5° | 0° | +5° | +10° | +15° | +20° |
| | 年聚光增益/% | | | | | | | | |
| 10 | -7.22 | -7.71 | -8.09 | -8.25 | -8.31 | -8.25 | -8.09 | -7.71 | -7.23 |
| 13 | -5.52 | -5.95 | -6.28 | -6.42 | -6.47 | -6.42 | -6.28 | -5.96 | -5.52 |
| 16 | -4.04 | -4.40 | -4.70 | -4.81 | -4.85 | -4.81 | -4.70 | -4.41 | -4.04 |
| 19 | -2.78 | -3.09 | -3.34 | -3.43 | -3.45 | -3.43 | -3.34 | -3.10 | -2.79 |
| 22 | -1.74 | -1.95 | -2.23 | -2.23 | -2.32 | -2.23 | -2.23 | -2.05 | -1.75 |
| 25 | -0.98 | -1.17 | -1.26 | -1.36 | -1.35 | -1.36 | -1.26 | -1.17 | -0.98 |
| 28 | -0.39 | 0.49 | -0.68 | -0.68 | -0.68 | -0.68 | -0.68 | -0.49 | -0.40 |
| 31 | -0.10 | -0.10 | -0.19 | -0.19 | -0.19 | -0.19 | -0.19 | -0.10 | -0.10 |
| 34 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 37 | -0.10 | -0.10 | -0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.10 | -0.10 | -0.10 |
| 40 | -0.49 | -0.39 | -0.39 | -0.29 | -0.19 | -0.29 | -0.39 | -0.39 | -0.49 |
| 43 | -1.18 | -0.98 | -0.87 | -0.77 | -0.68 | -0.77 | -0.87 | -0.98 | -1.18 |
| 46 | -2.01 | -1.76 | -1.65 | -1.45 | -1.45 | -1.45 | -1.65 | -1.76 | -2.03 |

可减少 8.31%。由此看来,选择最佳倾角安装有一定的经济价值。

4 结语

本文在考虑直接辐射、散射辐射以及反射辐射的情况下,借鉴国内外计算太阳辐射的经验公式,采用各向异性的散射辐射模型建立了光伏电池板倾斜面上的太阳辐射量动态模型,利用逐步寻优的方式获取任意朝向的光伏电池板最佳安装倾角。在晴朗天气下,仿真计算了青海省部分地区任意朝向安装的光伏电池板最佳倾角,同时以青海省海西州德令哈地区为例,计算了不同坡度、不同安装朝向的光伏电池板年预计辐射总量。该计算可为该地区进行光伏电站建设提供有益的参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

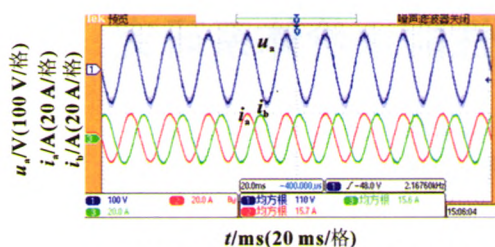
[3] 朱超群, 廖静明. 我国最佳倾角的计算及其变化[J]. 太阳能学报, 1992, 13(1): 38-44.

[4] 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.

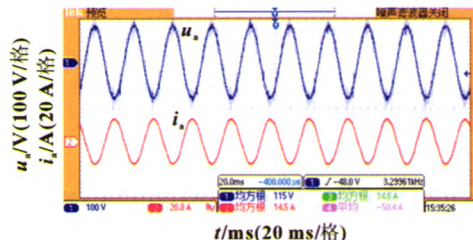
[5] 杨金焕, 葛亮, 陈中华, 等. 季节性负载光伏方阵的倾角[J]. 太阳能学报, 2004, 24(2): 241-24.

[6] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1032-1036.

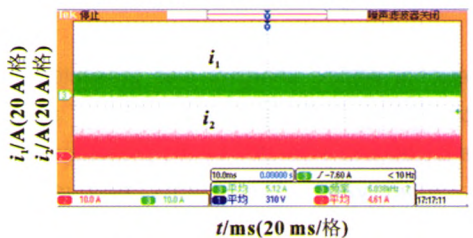
(下转第 733 页)



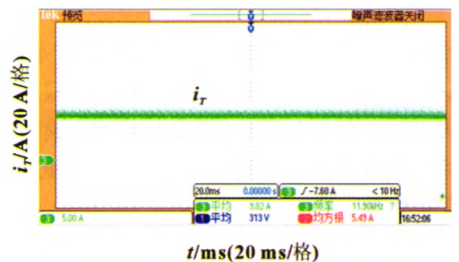
(a) 充电状态下交流侧的电流与电压波形



(b) 放电状态下交流侧的电压与电流波形



(c) 升降压电路单路工作的电流波形



(d) 直流侧二重化后的合成的电流波形

图6 系统实验结果分析

重化后的电流 i_r , 从图中可以看出电波的纹波要明显小于各个桥臂单独工作时的波形。

4 结论

本文对双极变换充放电机的拓扑结构和工作原理进行了介绍, 对 PWM 高频整流和并网逆变在充放电装置中的实现做了较为详细的分析, 并针对大功率蓄电池充放电要求对升降压电路进行了二重化, 这种方法极大削弱了直流纹波并成倍提升了充放电电流与功率。从充放电电机装置的实验结果上看, 文章研制的双极变换大功率电池充放电电机能成功并网运行, 并能实现能量的双向流动, 交流侧电流正弦度良好, 功率因数近似为 1, 直流电流稳定、纹波小。

参考文献:

- [1] MA L, RAN W, ZHENG T Q. Modeling and control of three-phase grid-connected photovoltaic inverter[C]//2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation. Xiamen, China: IEEE, 2010: 2240-2245.
- [2] ZHANG S C, WANG P Z, GE L S. Study on PWM control strategy of photovoltaic grid-connected generation system [J]. IEEE, 2006, 3 (14): 1-5.
- [3] SINGH B N, JAIN P, JOOS G. Three-phase PWM voltage source rectifier with a reduced number of switches [C]//Proceedings of 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Canadian: 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2006: 951-955.
- [4] SUH B S, YANG J H. A tuning of PID regulators via LQR approach [J]. Society of Chemical Engineers, 2005, 38(5): 344-356.
- [5] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.

(上接第 690 页)

- [7] LIU B Y H, JORDAN R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. Solar Energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [8] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surface [J]. Solar Energy, 1979, 23(4): 301-307.
- [9] 刘祖明, 李迎军, 谢建, 等. 固定式联网光伏方阵的最佳倾角[J]. 云南师范大学学报, 2000, 20(6): 24-28.
- [10] 唐润生, 吕恩莱. 集热器最佳倾角的选择[J]. 太阳能学报, 1988, 9(4): 369-376.
- [11] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar Engineering of Thermal Processes [M]. New York: Wiley, 2006.

- [12] 高国栋. 气候学教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1996.
- [13] KREITH F, KREIDER J F. Principles of Solar Engineering [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1978.
- [14] KORONAKIS P S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens Basin area [J]. Solar Energy, 1986, 36(3): 217-225.
- [15] GUYOT A, MARVIN C F, KIMBALL H H. Smithsonian Meteorological Tables [M]. Washington: The Smithsonian Institution, 2010.
- [16] 韩斐, 潘玉良, 苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究 [J]. 工程设计学报, 2009, 16(5): 348-353.