

方阵倾角变化对基站供电系统低碳经济性的影响分析

王文柯¹, 杨晓辉², 辛利军¹, 臧紫坤², 邓晓峰¹, 邓福伟²

(1. 中国电建集团江西省水电工程局有限公司, 江西 南昌 330000;

2. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330000)

摘要: 为分析倾角变化对固定式基站光伏供电系统低碳经济的影响, 首先对各向同性、各向异性及 Klein 和 Theilacker (KT) 提出的三种斜面辐射计算模型得到的总辐射值与真实值进行欧氏距离 (ED) 分析, 再通过对比得出最合适的理论研究模型。利用电站输出功率模型建立系统减排及发电收益计算模型, 提出蓄电池均衡充放电系数计算蓄电池损失成本, 通过模型计算倾角变化时基站供电系统减排量、发电收益以及损失成本的对应值。最后, 利用 Visio 画出变化曲线图, 从平衡系统经济性与低碳性的角度确定最佳倾角的取值范围。以广州、敦煌为例, 广州地区各向同性、各向异性与 KT 三种模型的 ED 分别为 242.90、181.66 和 135.65, 而敦煌地区为 295.50、156.21、213.48。广州、敦煌两地最佳倾角取值范围分别为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 和 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。

关键词: 光伏发电; 通信基站; 方阵倾角; 均衡系数; 低碳经济

Analysis of influence of square array angle change on low carbon economy of base station power supply system

WANG Wenke¹, YANG Xiaohui², XIN Lijun¹, ZANG Zikun², DENG Xiaofeng¹, DENG Fuwei²

(1. Power Construction Corporation of China Jiangxi Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 2. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of inclination changes on low-carbon economy of photovoltaic power supply system of fixed base station, Euclidean distance (ED) analysis was carried out on the total radiation value obtained by isotropic, anisotropic and KT (Klein, Theilacker) slope radiation calculation models and the real value, and then the most appropriate theoretical research model was obtained by comparison. The output power model of the power station was used to establish the calculation model of system emission reduction and generation revenue, and the balanced charging and discharging coefficient of the battery was proposed to describe the battery loss cost. The corresponding values of emission reduction, generation revenue and loss cost of the base station power supply system were calculated by the model when the inclination Angle changed. Finally, VisIO was used to draw the change curve, and the optimal inclination range was determined from the perspective of balancing the system economy and low carbon. Taking Guangzhou and Dunhuang as examples, the ED of the three isotropic, anisotropic and KT models in Guangzhou are 242.90, 181.66 and 135.65, respectively, while those in Dunhuang are 295.50, 156.21 and 213.48. The optimal inclination ranges of Guangzhou and Dunhuang are $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ and $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$, respectively.

Key words: photovoltaic power generation; communication base station; square array inclination; equilibrium coefficient; low carbon economy

国家自然科学基金 (61963026)

0 引言

随着5G通信的大规模商用,我国信号基站的需求量大幅增加^[1]。因此,基站领域的碳排放问题受到业界广泛关注^[2]。太阳能光伏发电由于具有清洁环保、低碳经济的特点,为实现基站低碳供电提供了新的可能^[3],在固定式光伏系统组件过程中,倾角选择问题是关键^[4]。

理论上,光伏方阵的最佳倾角是时刻变化的,但由于倾角追踪装置成本高,故实际应用中光伏倾角通常是固定的^[4]。多年来,许多学者都对固定式光伏斜面最佳倾角进行了有益的研究。文献[5-6]分别从散射各向同性与各向异性计算各地区的最佳倾角。近年来,文献[7]以多个地区为例利用Klein-Hay模型计算最佳倾角,讨论了最佳倾角与太阳辐射量之间的变化;文献[8]引入直散分离模型对总辐射量进行直散分离计算,实现了对特殊地区最佳倾角的有效计算。在以前的研究中,对最佳倾角的分析仅局限于某种辐射模型的研究,缺乏理论模型间的对比。

此外,鲜有文献从低碳经济的综合视角分析基站固定式光伏供电系统中的最佳倾角问题。多数文章基于水平面辐射观测数据,以全周期方阵接收到的最大辐射量为原则确定最佳倾角^[9]。也有少数文献从其他角度分析光伏系统最佳倾角的选择问题,如文献[10]通过建立系统能源成本模型,从减少系统单位能耗成本的角度考虑斜面最佳倾角问题;文献[11]考虑区域经纬信息,利用聚类分析的方法得出固定式光伏系统的最佳倾角。以上研究都未涉及倾角的变化对基站光伏供电系统低碳性与经济性的影响分析。

针对以上问题,本文首先结合相关文献资料,利用天空各向同性模型、各向异性模型和KT模型三种斜面辐射模型确定适合广州与敦煌地区的总辐射计算模型。然后结合电站输出功率模型建立系统减排模型及发电收益模型,并提出蓄电池均衡充放电系数计算蓄电池的损失成本。通过分析倾角变化对基站供电系统低碳经济的影响,在确保系统发电效益与减排量较佳的同时,

兼顾蓄电池的损失成本,从而确定系统的最佳倾角范围。

1 光电互补供电系统原理及设计

本文的基站光电互补供电系统如图1所示,主要由太阳能光伏阵列、电网供电系统、锂离子蓄电池、电力电子控制器和逆变器等组成。当光照充裕时,光伏供电系统通过直流控制器与逆变器给基站负载供电,并给蓄电池充电;当光照不足时,蓄电池利用储存的电通过电力电子控制器给基站负载供电,若蓄电池电能不足,则通过电网给通信基站补充供电。太阳能光伏系统在满足负载使用的情况下,可正常向基站直流负载供电;在不满足基站直流负载使用的情况下,也可向基站直流负载供电,作为备用蓄电池放电时的补充,延长备用蓄电池的使用时间。

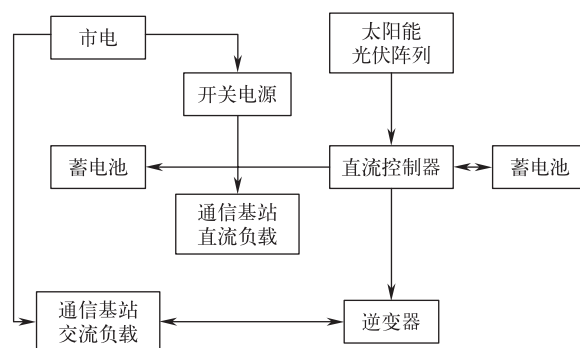


图1 通信基站光电互补供电系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric complementary power supply system for communication base station

供电系统采用实践可行的交直流混合接入模式,充分利用太阳能,集光伏发电系统及电力电子智能控制系统为一体,为基站负载提供清洁低碳的电力能源。该系统不仅在市电异常时延长基站负载持续供电时长,还有效降低基站负载用电的碳排放量,并带来一定的经济收益。

2 数学模型

2.1 光伏斜面辐射量计算模型

由于在计算太阳辐射量时一般只能得到水

平面辐射数据，任何一种理论模型难以对不同地区的辐射量进行精准计算，故本文选取各向同性^[12]、各向异性及KT^[13]三种模型进行对比分析。

对于朝向赤道倾斜面的太阳辐射量，主要采用文献[14-15]的经典模型^[16]将水平面上的太阳总辐射进行直散分离。倾斜面总辐射 Q_t 表达式为

$$Q_t = Q_{bt} + Q_r + Q_{dt} \quad (1)$$

式中， Q_{bt} 为倾斜面直接辐射量，单位为MJ/m²； Q_{dt} 为倾斜面散射辐射量，单位为MJ/m²； Q_r 为地面反射辐射量，单位为MJ/m²。

(1) 倾斜面直接辐射量

倾斜面直接辐射量是指从太阳直接接收到的、不改变方向的太阳辐射量，计算公式为

$$Q_{bt} = \frac{\cos \delta \cos(\phi - \beta) \sin \omega_{sT} + \frac{\pi}{180} \omega_{sT} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s} Q_{bh} \quad (2)$$

式中， Q_{bh} 为水平面太阳直射量，单位为MJ/m²； ϕ 为当地纬度； β 为斜面倾角； ω_s 为水平面太阳日落时角； ω_{sT} 为倾斜面太阳日落时角； δ 为太阳赤纬角。

太阳赤纬角 δ 一般用经验公式计算，即

$$\delta = 23.45 \sin(360 \times \frac{284+n}{365}) \quad (3)$$

式中， n 为日子数。

一年中各月的日子数见表1。

表1 计算太阳辐射量时的日子数

Tab. 1 The number of days in which solar radiation was calculated

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

水平面太阳日落时角计算式为

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

倾斜面上的日落时角为 $\arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)$ ，水平面日落时角中的最小值计算公式为

$$\omega_{sT} = \min\{\omega_s, \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)\} \quad (5)$$

(2) 倾斜面散射辐射量

在计算倾斜面散射辐射量时，一般认为太阳散射量是各向同性的，而实际的散射辐射量并不是均匀分布，因此导致计算辐射量偏小^[17]。本文采用Hay等人提出的各向异性模型，认为散射辐射由太阳光盘辐射和天空穹顶同质分布的散射辐射组成，计算公式为

$$Q_{dt} = Q_{dh} \left[\frac{Q - Q_{dh}}{Q_0} R_b + \left(1 - \frac{Q - Q_{dh}}{Q_0}\right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \right] \quad (6)$$

式中， Q_{dh} 为水平面散射辐射量，单位为MJ/m²； Q_0 为地球大气层外水平辐射量，单位为MJ/m²，一般取值为1 353 MJ/m²。

(3) 地面反射辐射量

光伏斜面上的总辐射量除了上述两项辐射量以外，还需考虑来自地面的反射辐射量。地面反射辐射量 Q_r 最经典的算法是假设反射光线与散射光线相似且均为各向同性^[18]。影响地面反射辐射量 Q_r 的因素为地表反射率， Q_r 的表达式可以简化为

$$Q_r = \rho Q_{gh} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (7)$$

式中， ρ 为地表反射率，一般情况下 ρ 取平均值0.2。

2.2 供电系统减排模型

基站供电系统通过光伏发电替换市电，从而减小基站用电的碳排放量。要计算基站供电系统的减排量，首先要得到光电转换后的光伏发电功率，再计算系统单位时间内的发电总量，之后根据单位市电碳排放系数与供电系统发电总量得到系统减排量。根据原理法得到光伏电站输出功率模型为

$$P = \eta_s [1 - L(T_c - 25)] Q_t SK / 1\,000 \quad (8)$$

$$T_c = T_a + \frac{T_{NOC} - 20}{800} Q_t \quad (9)$$

$$K = (1 - kY_a) K_2 K_3 \quad (10)$$

式中， P 为光伏发电功率； η_s 为标准条件下的小光电转换效率； L 为温度系数； T_c 为阵列板温； S 为光伏组件有效面积； K 为光伏阵列损失系数；

K_2 为光伏阵列老化损失系数； K_3 为尘埃遮挡系数； T_a 为气温； T_{NOC} 为额定太阳能电池工作温度； k 为光伏电站使用年数； Y_a 为太阳能电池材料衰减率。

光伏供电系统在一定时间内光伏发电量以及由光能供电所减少的碳排放量计算模型为

$$W = \int_{T_0}^{T_1} \eta_s \frac{[1 - L(T_c - 25)]}{1000} Q_t S K dt \quad (11)$$

$$Q_t = Q_{bh} R_b + Q_{dh} \left[\frac{Q - Q_{dh}}{Q_0} R_b + \left(1 - \frac{Q - Q_{dh}}{Q_0} \right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] + \frac{1}{2} \rho Q_{gh} (1 - \cos \beta) \quad (12)$$

$$C = W \eta \quad (13)$$

式中， W 为光伏总发电量； T_0 与 T_1 分别为光伏系统发电始末时刻； C 为供电系统在 $T_0 \sim T_1$ 时段减排量； η 为单位市电碳排放系数。

2.3 蓄电池均衡充放电系数

本文采用的光伏供电系统为独立光伏发电系统，系统将多余的太阳能转化为电能，仅存储于蓄电池，并不参与并网。若发电量不均衡，蓄电池的额定容量限制会导致过充电和过放电，这将严重影响蓄电池的寿命，间接增加系统成本。因此，本文提出蓄电池均衡充放电系数描述阵列倾角的改变导致发电量变化对蓄电池寿命的影响，间接表示蓄电池在过充电、过放电过程中，电池损耗的成本，其值越大损耗成本越大，反之越小。计算模型为

$$H = \frac{|H_1 - H_2|}{\min(H_1, H_2)} \quad (14)$$

式中， H 为蓄电池均衡充放电系数； H_1 、 H_2 分别为夏、冬半年方阵面上接受到的日平均辐射量。

3 计算与分析

3.1 计算说明

本文以敦煌（北纬40.08°、东经94.47°）和广州（北纬23.13°、东经113.26°）为例，查找相关文献[17-18]获得两地的水平面辐射量、光伏发电量等数据，参考相关基站资料^[19]，以

通信基站载频数6个，设备负载总功率约为2 kW作为基础数据。首先通过三种辐射计算模型对比，通过ED分析选择广州、敦煌最合适的辐射计算模型。再结合上述所建的碳排放、发电收益等模型计算两地各量随倾角变化的曲线图，利用MATLAB求解，具体求解流程如图2所示。

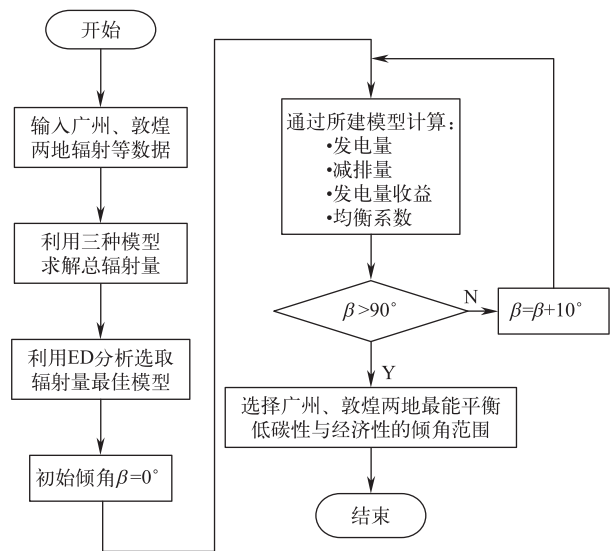


图2 模型求解流程图

Fig. 2 Model solving flow chart

3.2 辐射量理论计算与实验对比

在以往有关斜面总辐射量的计算研究中，由于观测数据与斜面计算方法的差异，导致同一地区的方阵斜面总辐射量均不相同。因观测数据的不可逆性，导致误差不可避免。本文通过对多种辐射计算模型的实验对比，选取误差最小的计算模型。

在三种辐射计算模型下，不同倾角斜面年总辐射量变化的对比如图3所示。年总辐射量计算分别采用各向同性、各向异性与KT三种模型。以2019年总辐射数据为例，三种模型计算的辐射量随倾角变化趋势与真实值大致相同，呈先增后减的趋势，仅最大值所对应的倾角范围略有不同。通过ED描述三种模型的理论计算值与真实值的误差大小，见表2。由表2可知广州采用KT模型计算更为精确，而敦煌地区选取各向异性模型计算较佳。

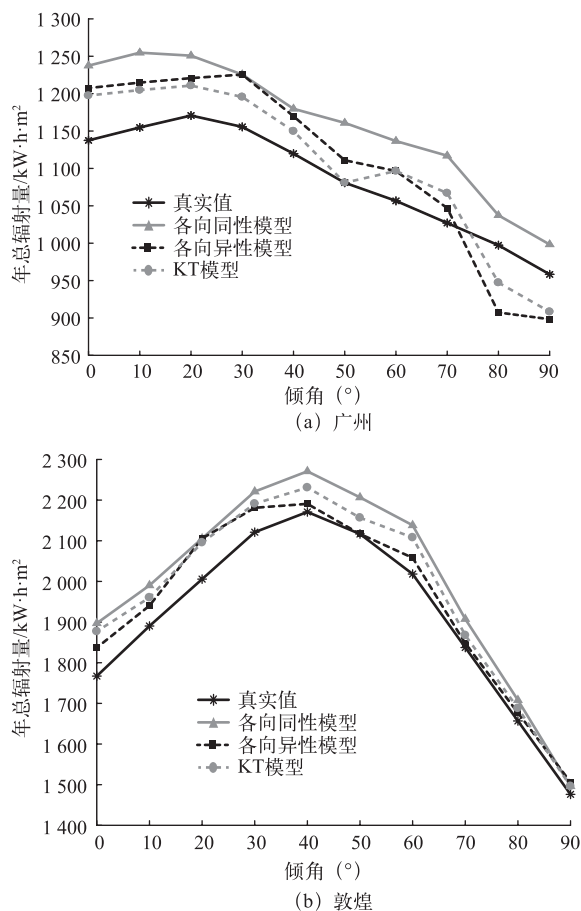


图3 不同倾角斜面年总辐射变化对比

Fig. 3 Comparison of annual total radiation variation of inclined plane with different inclination angles

表2 三种模型斜面年总辐射计算ED分析

Tab. 2 ED analysis of annual total radiation calculation of inclined plane of three models

计算模型	各向同性	各向异性	KT模型
广州	242.90	181.66	135.65
敦煌	295.50	156.21	213.48

3.3 不同倾角对系统低碳性的影响分析

广州与敦煌不同倾角斜面时光伏阵列单位发电量与减排量的变化曲线如图4所示。由图4可知,两地年平均发电量的变化趋势与减排量的变化趋势基本一致。广州地区在倾角为 $\beta \in (0^\circ, 20^\circ)$ 时,单位发电量与减排量呈递增变化;而在 $\beta \in (20^\circ, 90^\circ)$ 时,呈现递减变化。敦煌地区在倾角为 $\beta \in (0^\circ, 40^\circ)$ 时,单位发电量与减排量递增;在 $\beta \in (40^\circ, 90^\circ)$ 时递减。在全年不改变斜面倾角的情况下,广州、敦煌地区最大单位发电量

与减排量的倾角分别为 20° 和 40° 。

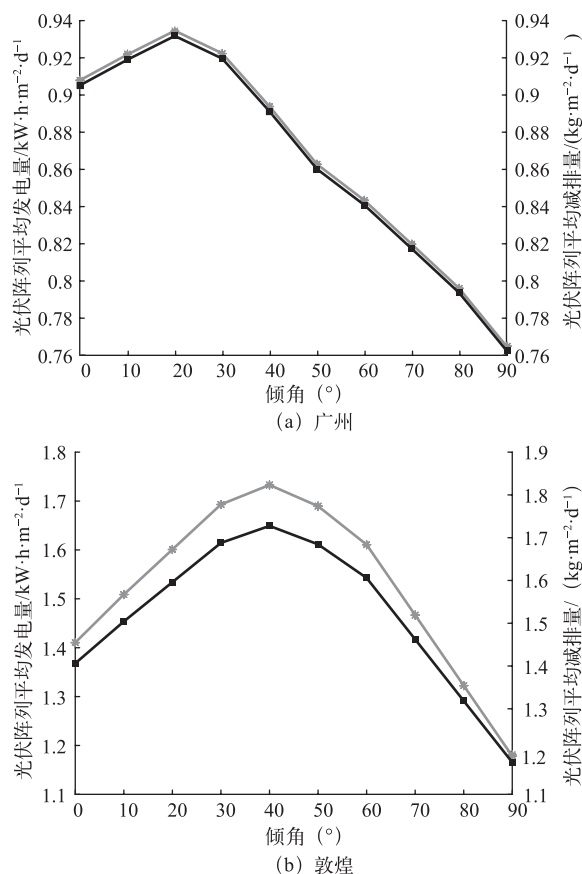


图4 不同倾角斜面单位发电量与减排量的变化曲线

Fig. 4 Change curves of unit energy yield and emission reduction of inclined plane with different inclination angles

图5为广州、敦煌两地不同倾角各通信基站单位减排量的月变化曲线,不同倾角的单位减排量全年的变化趋势大致相同,具有一定的波动特征。如图5a所示,广州地区除倾角 $\beta=0^\circ$ 、 10° 之外,其余倾角时单位碳排放的波动特性基本一致。广州地区减排量全年的变化趋势为:2月以前递减,2~10月份逐渐递增,在10月份达到峰值,10~12月呈现减小的趋势;在倾角为 $\beta=0^\circ$ 、 10° 时,单位减排量在7月以前变化趋势和其余倾角变化情况基本一致,并在7月达到峰值,之后呈不成比例减小趋势。广州地区所有倾角在下半年的平均减排量普遍大于上半年的减排量,分析气候特征发现广州地区下半年太阳辐射强度普遍大于上半年。

敦煌地区各倾角的单位减排量随月份变化的

趋势基本相同, 总体变化特性较广州地区更为复杂。当倾角 $\beta=0^\circ$ 时, 单位减排量在1~7月普遍递增, 在6月份稍有回落, 在7月以后单位减排量逐月递减。其余斜面倾角的单位减排量变化特征基本趋于一致, 一般在1~3月单位减排量先递增, 3~6月再递减, 然后在6~9月期间递增, 最后在9~12月逐渐减小。各倾角单位减排量的最大和最小值也略有不同, 倾角为 $0^\circ\sim40^\circ$ 时单位减排量的最小值在1月份, 除 0° 以外, 其余在3月份达到最大。当倾角为 $50^\circ\sim90^\circ$ 时, 单位减排量的最小值在6月份, 而最大值一般在3月或9月。以6月末为界分为上半年和下半年, 从图5b可知, 各倾角在上半年和下半年的总减排量较为接近。

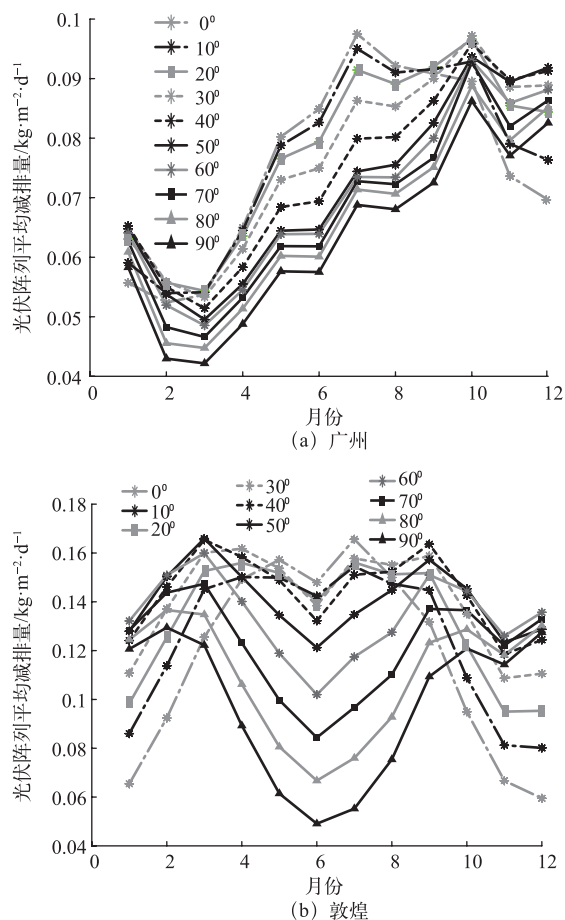


图5 不同倾角斜面月平均减排量的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of monthly mean displacement reduction of inclined plane with different inclination angles

分析不同倾角各月平均碳减排量的变化, 如图6所示。各月平均减排量的变化趋势随倾角

变化有较大差异, 但相邻月份的变化趋势较为相似。如图6a所示, 广州地区7~10月份, 供电系统平均减排量要大于其他月份, 这是因为广州地区全年在7~10月光照辐射强度最大, 同一倾角下光伏发电量也较大。从各月的变化趋势来看, 平均减排量随倾角变化的波动较缓, 而平均减排量最大值基本为 $20^\circ\sim30^\circ$ 时。

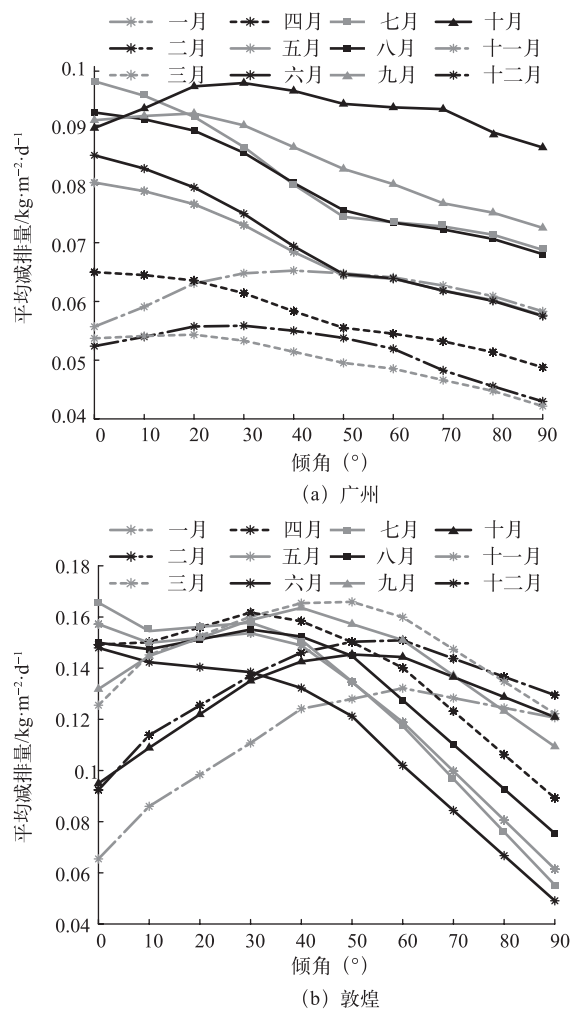


图6 各月平均减排量随斜面倾角的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of monthly average displacement reduction with slope Angle

对比图5与图6可知, 广州和敦煌两地基站在不同月份供电系统月均碳减排量最大值所对应的倾角均不相同, 且同一倾角在不同月份间的减排量也有较大差异。因为广州地区雾霾以及海拔过低等环境因素导致广州全年的平均减排量远小于敦煌地区。

3.4 不同倾角对系统经济性的影响分析

对于本文的通信基站光伏供电系统,利用蓄电池作为储能元件。因蓄电池有额定容量,过充电、过放电都会严重影响蓄电池的使用寿命,从而增加供电系统的成本。由于倾角变化仅影响系统的发电收益以及蓄电池的损失成本,对系统的初始投资成本无关。故本文提出蓄电池均衡充放电系数,利用均衡充放电系数大小来计算蓄电池损耗成本,从发电收益与蓄电池损耗成本分析倾角变化对基站供电系统经济性的影响。

如图7所示,基站供电系统收益基本与光伏阵列发电量变化趋势一致,广州地区以倾角为 20° 为界,呈先增后减趋势。敦煌地区以倾角 40° 为界,也呈先增后减趋势。

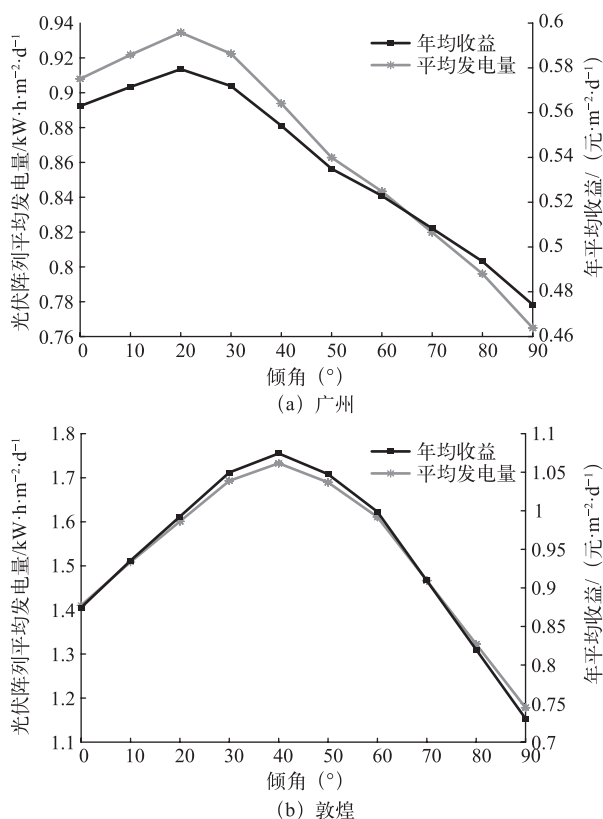


图7 不同倾角斜面单位发电量与平均收益的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of unit power generation and average revenue of inclined planes with different inclination angles

基站发电系统在不同倾角下蓄电池的损耗成本与减排量变化趋势并不一致,如图8a所示,广州地区的减排量在倾角为 20° 前递增,之后持续

下降。蓄电池均衡系数在斜面倾角为 50° 以前快速递减,而在 50° 以后缓慢增大。说明系统蓄电池损耗成本与系统发电减排量的最佳倾角并不相似,且相差较大。当系统需要减少蓄电池损失成本时,需舍弃一定的碳减排潜能,当系统要通过改变倾角增大光伏发电保持碳减排量时,需要增大蓄电池的损耗成本。

与广州地区相比,敦煌地区不同倾角下蓄电池的损耗成本与减排量变化趋势有较大差异。由图8b可知,在倾角为 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围内,系统碳减排量成一定比例递增,最大值约为 $1.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;在斜面倾角 $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内,系统碳减排量逐渐递减。而蓄电池均衡,充放电系数曲线在 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 内不断下降,至 50° 达到最小,之后逐渐增大。敦煌地区系统发电减排量与蓄电池损耗成本的最佳倾角较为接近,说明可在减少损耗成本的同时,保证光伏单位碳减排量的最大值。

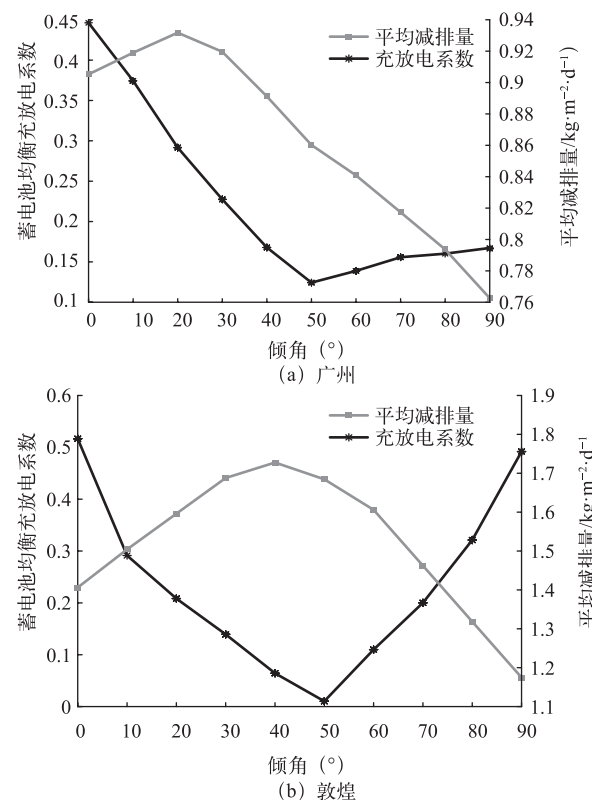


图8 不同倾角斜面单位减排量与均衡系数的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of unit displacement reduction and equilibrium coefficient of inclined plane with different inclination angles

为分析基站光伏发电系统的发电收益与电池均衡系数随倾角变化的关系,得到二者之间的对比图,如图9所示。广州与敦煌两地其发电收益和均衡系数随倾角变化的关系大致与发电收益和均衡系数的变化曲线相似。广州地区除在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 期间收益和损耗成本均随倾角增大而减小之外,在 20° 以前和 50° 以后收益和损耗成本变化趋势相反。敦煌地区在倾角为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 期间收益和损耗成本同时减小,其余倾角变化时段二者变化趋势均相反。说明系统发电收益达到最大时蓄电池损耗成本不一定最小,在保证发电收益的同时需充分考虑蓄电池的损耗成本。

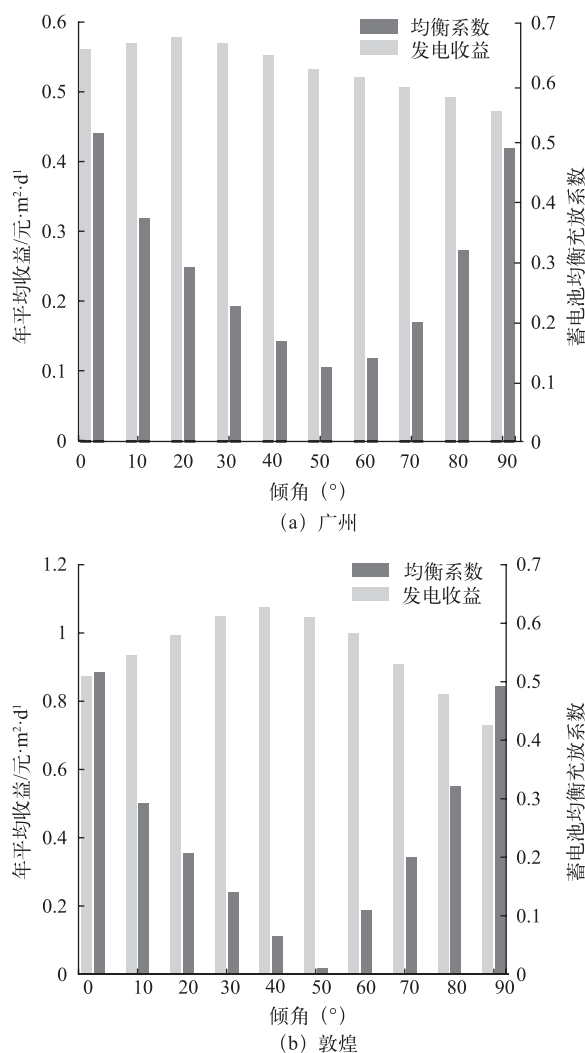


图9 不同倾角平均收益与均衡系数的变化对比

Fig. 9 Comparison of average returns and equilibrium coefficients at different inclination angles

4 结束语

通过三种辐射模型的理论值与真实值作对比,结合年总辐射量的吻合度选取最优计算模型,提出蓄电池均衡充放电系数计算基站供电系统电池损耗成本,建立系统减排模型。从系统低碳性与经济性两方面讨论倾角变化对固定式光伏发电系统的影响,为基站供电系统最佳倾角的选择提供参考。

广州、敦煌两地的最佳总辐射量计算模型并不相同。广州地区三种模型理论值与真实值的ED分别为242.90、181.66和135.65,而敦煌地区为295.50、156.21和213.48,因此可知,广州、敦煌两地分别采用KT模型、各向异性模型计算更为精确。

不同斜面倾角对供电系统的减排量有较大差别。广州、敦煌地区分别在 20° 与 40° 左右时全年光伏阵列的单位减排量最大,并在最大值处随斜面倾角向两侧递减。广州、敦煌两地单位减排量最大值分别是最小值的1.25倍与1.42倍。

不同倾角对系统低碳性的影响与对经济性的影响并不一致。从图8与图7可看出,广州与敦煌地区均在倾角为 50° 时蓄电池损耗成本达到最小,而广州地区的方阵单位减排量为 20° 时最大。因此,广州、敦煌两地供电系统在保证一定经济性的情况下减少基站系统的用电碳排放,需要选择的倾角范围分别为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 和 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。

对于全年负荷均匀的固定式通信基站供电系统,其方阵倾角的选取应综合考虑光伏发电系统的方阵单位减排量、蓄电池损耗成本以及发电收益等因素,不应仅考虑全年系统的发电量。

参考文献

- [1] 安涛,何明宪.双碳目标达成与移动通信基站节能减排技术的探索[J].移动通信,2022,46(3):93-98,102.
- [2] 曾博,穆宏伟,董厚琦,等.考虑5G基站低碳赋能的主动配电网优化运行[J].上海交通大学学

- 报, 2022, 56(3): 279-292.
- [3] LAPPALAINEN K, VALKEALAHTI S. Number of maximum power points in photovoltaic arrays during partial shading events by clouds[J]. Renew Energy, 2020, 152: 812-822.
- [4] 陈艳, 张科智, 鲁长琴. 固定式光伏方阵最佳倾角的计算与分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1567-1575.
- [5] 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(自然科学版), 2000, 20(6): 24-28.
- [6] 杨刚, 陈鸣, 陈卓武. 固定式光伏阵列最佳倾角的 CAD计算方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(S2): 165-169.
- [7] 张俊, 俞文政, 申彦波. 太阳辐射变化对光伏电站最佳倾角的影响分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 86-92.
- [8] 李遥, 李照荣, 王小勇, 等. 基于斜面辐射组合计算模型的光伏阵列最佳倾角研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 127-136.
- [9] 陈维, 沈辉, 刘勇. BIPV中光伏阵列朝向和倾角对性能影响理论研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 206-210.
- [10] OSMANI, KHALED, et al. Optimization of PV array tilt angle for minimum levelized cost of energy[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96: 107474.
- [11] 迟福建, 葛磊蛟, 洪博文, 等. 固定式光伏发电组件最佳倾角的聚类分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13): 89-93, 123.
- [12] LIU B Y H, JORDAN R C. The interrelationship and characteristics and distribution of direct, diffuse, and total solar radiation[J]. Solar Energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [13] KLIEN S A, THEILACKER J C. An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces[J]. Solar Energy Engineering. 1981, 103(1): 29-33.
- [14] 苏成仁, 陈正武, 胡芳林, 等. GSM直放站太阳能独立光伏供电的优化设计[J]. 电源技术, 2013, 37(10): 1779-1780, 1786.
- [15] SUN Y L, DU X R, WANG X Y, 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.
- [16] 陈艳, 张科智, 鲁长琴. 固定式光伏方阵最佳倾角的计算与分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1567-1575.
- [17] 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.
- [18] 李芬, 赵晋斌, 段善旭, 等. 3种斜面月平均总辐射模型评估及光伏阵列最佳倾角研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 502-509.
- [19] 石力博, 罗艺霞. 通信基站风光互补供电系统设计与应用[J]. 湖南电力, 2012, 32(2): 12-15.

作者简介

王文柯(1978—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为配电网与新能源优化。

(收稿日期: 2023-04-18)