

光伏电池板的铺设问题研究

张俊丽, 高陈燕

(西安欧亚学院 陕西 西安 710065)

摘要:以全年发电量最大,成本最少为目的,利用数学规划建模方法,通过数值模拟对小屋光伏电池板的铺设方案进行了分析研究,建立了光伏电池铺设的通用模型。通过该模型计算出光伏电池安装时的最佳倾角;确定了铺设电池数量及分组阵列图形以及逆变器的选配方案及电池板的组建连接方式,最后经济效率及收回年限的计算方法。对于此问题的确定方法可以在不同地区太阳能光伏电池板铺设中推广。

关键词: Hay 模型; 规划模型; 光伏电池; 最佳倾角

中图分类号: TN6

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2015)01-0043-04

Research on the problem of laying volt battery plate

ZHANG Jun-li, GAO Chen-yan

(Xi'an eurasia University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this paper, through the numerical simulation the scheme of laying photovoltaic cell panel on cabin appearance was analyzed and researched, building the programming model aiming for electric energy production maximum and cost minimum. With the model, worked out the optimum angle of the laying photovoltaic cell panels, confirmed the amount of batteries, selection scheme of inverters and connection type of panels. Confirmed the computational method of the finally economic efficiency and years of Battery Recycling. The model is applicable to extend to different areas which want to lay photovoltaic cells panels.

Key words: Hay model; planning model; photovoltaic cells; optimum tilt

DOI: 10.14022/j.cnki.dzsjgc.2015.01.014

在设计能供家庭使用电的太阳能小屋时,需在建筑物外表面(屋顶及外墙)铺设光伏电池,光伏电池组件所产生的直流电需要经过逆变器转换成 220 V 交流电才能供家庭使用,并将剩余电量输入电网。不同种类的光伏电池每峰瓦的价格差别很大,且每峰瓦的实际发电效率或发电量还受诸多因素的影响。因此,在太阳能小屋的设计中,要考虑到分别给出的小屋外表面光伏电池的铺设方案,使小屋的全年太阳能光伏发电总量尽可能大,而单位发电量的费用尽可能小。

1 问题解决方案

在仅考虑贴附安装方式的情况下对小屋进行铺设,使小屋的全年太阳能光伏发电量尽可能大,且收益尽可能高,为此我们建立了一个以发电最多,成本最少为目标函数的多目标规划模型。主要分以下几个步骤:

1.1 计算辐射总量

将水平面上的太阳辐射数据转化为倾斜面上太阳辐射,计算出屋顶斜面上太阳辐射量,再分别计算出其它各个面的总辐射量。

1.2 电池日有效辐射时间计算

根据不同材料的电池板对太阳辐射强度的要求不同,分

别计算出电池日有效工作时间。

1.3 太阳能电池板性价比排序

对 24 种电池板按照单位面积上的单价、转化效率及日有效辐射时间 3 个因素综合考虑排序,优先考虑使用性价比比较高的电池板。

1.4 确定铺设电池数量及分组阵列图形

建立以总发电量最大为目标的优化模型,并运用 LINGO 编程求解出房子的 6 个面(南顶、北顶、东立面、西立面、南立面、北立面)的几种铺设方案,并根据每天额定输出电量对比确定出每个面的最终铺设方案。

1.5 逆变器的选配方案及电池板的组建

以总费用最小为目标函数,以逆变器的额定电流和允许输入电压范围为约束条件,建立一个规划模型,运用 LINGO 编程求解出每种电池板最终串联和并联的个数,以此确定所用逆变器的型号和个数。

1.6 经济效率及收回年限的计算

通过计算、比较:成本、收益、回收年限等因素对模型结果进行评价。

2 数值模拟

根据山西省大同市的气象数据,仅考虑贴附安装方式,选定光伏电池组件,对小屋的部分外表面进行铺设,并根据

收稿日期: 2014-02-26

稿件编号: 201402186

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(2013JK0603)

作者简介: 张俊丽(1982—),女,陕西韩城人,硕士研究生。研究方向: 概率统计。

电池组件分组数量和容量,选配相应的逆变器的容量和数量。

2.1 辐射总量的计算

1) 屋顶斜面上太阳辐射量的计算

将水平面上的太阳辐射数据转化为倾斜面上太阳辐射数据需要依次计算出:倾角 s 、系统所在地的纬度 ϕ 、每个月中有代表性的一天的水平面上日落时间角 h_s 、倾角面上的日落时间角 h'_s 、大气层外的太阳辐射 H_0 、倾角面与水平面上直接辐射量之比 R_b 、直接太阳辐射量 H_{bt} 、天空散射辐射量 H_{dt} 、地物表面反射率 ρ 、地面反射辐射量 H_{rt} 。

倾斜面上的太阳辐射总量 H_t 由直接太阳辐射量 H_{bt} 、天空散射辐射量 H_{dt} 和地面反射辐射量 H_{rt} 3 部分所组成。

$$H_t = H_{bt} + H_{dt} + H_{rt} \quad (1)$$

计算直接太阳辐射量 H_{bt} 引入参数 R_b

$$R_b = \frac{H_{bt}}{H_0}$$

倾角面与水平面上直接辐射量之比 R_b 的计算:

$$R_b = \frac{\cos(\phi-s)\cos\sigma\sin h'_s + (\frac{\pi}{180})h'_s\sin(\phi-s)\sin\sigma}{\cos\phi\cos\sigma\sin h_s + (\frac{\pi}{180})h_s\sin\phi\sin\sigma}$$

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

$$\omega = \arccos(-\tan\phi\tan\sigma)$$

$$h'_s = \min\{h_s, \cos^{-1}[-\tan(\phi-s)\tan\sigma]\}$$

倾斜面上天空散射辐射量 H_{dt} 由太阳光盘的辐射量和其

余天空穹顶均匀分布的散射辐射量两部分组成。

$$H_{dt} = H_d[\frac{H_b}{H_0}R_0 + 0.5(1 - \frac{H_b}{H_0})(1 + \cos\sigma)]$$

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} [1 + 0.033\cos(\frac{360n}{365})] \times [\cos\phi\cos\sigma\sin h_s + (\frac{2\pi h}{360})\sin\phi\sin\sigma]$$

$$I_{sc} = 1367 \text{ w/m}^2$$

$$H_{rt} = 0.5\rho H(1 - \cos\sigma)$$

求倾斜面上太阳辐射量的公式为:

$$H_t = H_b R_b + H_d[\frac{H_b}{H_0}R_b + 0.5(1 - \frac{H_b}{H_0})(1 + \cos\sigma)] + 0.5\rho H(1 - \cos\sigma) \quad (2)$$

通过公式(2)可计算出倾斜面上的辐射总量,则年日均辐射总量 254.78 W/M^2 。

2) 墙面太阳辐射量的计算

东、南、西、北 4 个墙面日均太阳辐射总量可通过公式(2)计算:

$$H_i = \frac{H_{it}}{H_{ie}} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

可以求出东、南、西、北四个墙面日均有效太阳辐射总量。

2.2 电池日有效辐射时间的计算

由于 A 单晶硅电池当辐射强度低于 200 w/s 时,电池转换效率小于转换效率的 5%,经统计计算发现当 $80 < L_A < 200$ 时转换效率非常低,因此理论上可以将它忽略不计,A、B、C 类电池板的日平均辐射时间可通过公式(1),(3)计算:

表 1 有效照射时间

Tab. 1 The effective irradiation time

日照强度	顶斜面日有效照射时间	东面日有效照射时间	南面日有效照射时间	西面日有效照射时间	北面日有效照射时间
大于 200(A 电池)	9.7	3.2	5.8	4.0	0.4
大于 80 即(B 电池)	10.6	5.8	8.6	6.1	2.2
大于 30(C 电池)	14.2	8.9	10.4	10.2	7.6

$$L_i = \frac{24n_i}{n} \quad (4)$$

2.3 太阳能电池板性价比排序

首先对电池板性价比进行排序,影响性价比的指标有:电池板单位面积上的单价、转化效率及日有效辐射时间,即

$$Q_i = \frac{T_i}{S_i \cdot \eta_i \cdot L_i} \quad (i=1, 2, \dots, 24) \quad (5)$$

当 Q 值越小表明该类型号的产品性能越好。

从表 1 可以看出电池板 A3、B3、B5 的性能较高,所以铺设时优先考虑这几类电池板。

2.4 确定铺设电池数量及分组阵列图形

为了使小屋的全年太阳能光伏发电量尽可能大,而单位发电量的费用尽可能小,首先考虑了以每个面发电量尽可能大为目标,以需要太阳辐射量不超过太阳实际辐射量,需要的电池个数应该比面积最大的电池铺上后的数量要多,又要比电池面积最小的电池铺上后的数量少,以及电池总面积不大于应该要小于各面的面积 3 个条件为约束条件建立了以下优化模型:

$$\text{Max} Z_j = \sum_{i=1}^{24} J_i P_i L_i$$

表 2 电池板性能排名

Tab. 2 The ranking of panels

产品型号	组件尺寸(mm×mm)	组件功率 P/w	转换效率 $\eta/\%$	单价 T	面积 S	衡量指标(Q)
A3	1 580×808	200	0.187 0	2 980.0	1 494 800	0.010 7
B3	1 482×992	210	0.159 8	2 625.0	1 470 144	0.011 2
B5	1 956×992	280	0.159 8	3 500.0	1 940 352	0.011 3
B4	1 640×992	240	0.148 0	3 000.0	1 626 880	0.012 5
.....

$$s.t. \begin{cases} \frac{S_j}{S_{qmax}} \leq \sum J_i \leq \frac{S_j}{S_{qmin}} (j=1,2,3,4) \\ \sum_{i=1}^{24} J_i S_{qi} < S_j (j=1,2,3,4) \\ \sum_{i=1}^{24} J_i P_i L_i \leq H_i \end{cases} \quad (6)$$

从实际情况考虑,在现实生活中一面墙上所拼太阳能电池板的种类不会太多,因为同一高度看上去更加美观、且更便于雨雪排泄等原因,一般同一面墙上所铺太阳能电池板的种类不会超过3种,因此我们选取相对来说性价比更高的A3、B3、B5板铺设房屋表面。

由此可得到发电量尽可能大的以下几个电池组满足条件。

表3 光伏电池板总发电量对比
Tab. 3 The comparison of Electricity

名称	型号	数量	每天总发电量
南顶	A3	43	76 970
	B3	37	80 808
	B5	25	72 800
北顶	A3	6	10 740
	B3	6	13 104
	B5	5	14 560
东立面	A3	15	26 850
	B3	12	26 208
	B5	9	26 208
西立面	A3	17	30 430
	B3	15	32 760
	B5	11	32 032
南立面	A3	7	12 530

由于每个面面积相同,所以单位费用尽可能低即为整个面费用最小,以面积费用最小为目标进行求解,即

$$MinP = \frac{\sum K_i \cdot P_i}{S_j} \quad (7)$$

则可得最终铺设方案为如表4所示。

表4 铺设方案
Tab. 4 Laying scheme

名称	电池板类型	数量
南顶	B3	37
北顶	B5	5
东立面	B3	12
西立面	B3	15
南立面	A3	8
北立面	C7	231

2.5 逆变器的选配方案及电池板的组建连接方式示意图

由于逆变器有额定电流及允许电压范围,而并联会改变线路电流,串联会改变线路的电压,故能每种逆变器能并联电池的个数范围为:

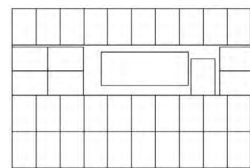


图1 南顶面电池板铺设图

Fig. 1 The panels laying of south top

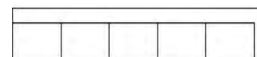


图2 北顶面电池板铺设图

Fig. 2 The panels laying of north top

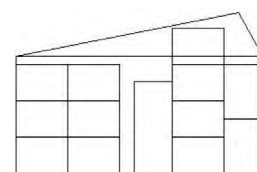


图3 东立面电池板铺设图

Fig. 3 The panels laying of east

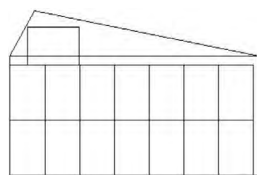


图4 西立面电池板铺设图

Fig. 4 The panels laying of west

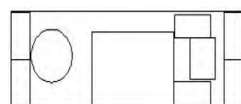


图5 南立面电池板铺设图

Fig. 5 The panels laying of south

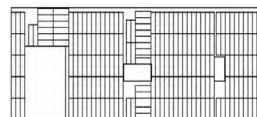


图6 北立面电池板铺设图

Fig. 6 The panels laying of north

$$N_{b_i} \leq \frac{I_i}{I_d}$$

串联的电池个数 N_{c_i} 的取值范围为: $\frac{U_{mini}}{I_d} \leq N_{c_i} \leq \frac{U_{maxi}}{I_d}$

通过计算可得每种逆变器允许的电池串并联数目。

设计对第 i 种逆变器需要选取 m_{1i} 个电池并联, m_{2i} 个电池串联,并且需要第 i 种逆变器 k_i 个。以选取的逆变器费用最低为目标函数,以逆变器允许的电压电流为约束条件建立并串联数及逆变器的选配模型:

$$MinZ = \sum_{i=1}^{18} K_i p_i$$

表 5 电池板串并联的最大数目
Tab. 5 The maximum number of series and parallel panels

序号	逆变器型号	A3 并串联个数范围		B3 并串联个数范围		B5 并串联个数范围		C7 并串联个数范围	
		并联	串联	并联	串联	并联	串联	并联	串联
1	SN1	[0,4]	0	[0,3]	0	[0,3]	0	[0,35]	2
2	SN2	[0,9]	0	[0,6]	0	[0,6]	0	[0,71]	2
3	SN3	[0,4]	1	[0,2]	1	[0,2]	1	[0,34]	4
.....
16	SN16	[0,8]	[4,6]	[0,4]	[6,8]	[0,5]	[4,6]	[0,69]	[15,23]
17	SN17	[0,7]	[5,17]	[0,4]	[8,23]	[0,4]	[5,17]	[0,57]	[20,63]
18	SN18	[0,7]	[5,17]	[0,4]	[8,23]	[0,4]	[5,17]	[0,57]	[20,63]

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^{18} (m_{1i}+m_{2i})k_i=n \\ m_{1i} \leq m_{\max} \\ n_{\min} \leq m_{1i} \leq n_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

运用 LINGO 编程确定出逆变器的选配方案,具体见表 6。

2.6 经济效率及收回年限的计算

年总发电量计算:

表 6 逆变器的选择方案

Tab. 6 Options of Inverter

名称	电池板类型	数量	逆变器型号及个数	电池及逆变器的连接方式
南顶	B3	37	2 号 1 个, 11 号 4	2 号 5 个并联, 11 号 8 个串联
北顶	B5	5	11 号 1 个	11 号 5 个串联
东立面	B3	12	11 号 2 个	11 号 6 个串联
西立面	B3	15	11 号 1 个, 12 号 1	11 号 7 个串联, 12 号 8 个串联
南立面	A3	8	11 号 2 个	11 号 4 个串联
北立面	C7	231	12 号 1 个, 5 号 2 个	12 号 15 个串联, 5 号串联 103 个并联

$$Q = \sum_{i=1}^3 \Delta t_i \cdot N \cdot P \cdot L \cdot \eta_0 \cdot 365 \cdot \eta_i \quad (9)$$

35 年总收入计算:

$$V = Q \cdot C \cdot 35 \quad (10)$$

成本计算:

$$M = M_b + M_n \quad (11)$$

利润计算:

$$P_r = V - M \quad (12)$$

回收年限计算:

$$t = \frac{M}{Q_0} \quad (13)$$

通过模型(9)~(13)进行计算发现,当铺设北立面时 35 年总收入为 944 338.5 元,成本为 297 475.2 元,利润为 646 863.3 元,预计投资回收年限大约为 9.9 年;当不铺设北立面时,35 年总收入为 902 096.6 元,成本为 265 740 元,利润为 636 356.6 元,预计投资回收年限大约为 9.3 年。北立面的太阳辐射相对较少,因此只能选用光照条件较低的 C 类电池板,但是用 231 块 C7 铺满北立面成本较高,而且收益不大,所以如果考虑到回收年限的长短,则不铺北立面就可以更早地收回成本,故在实际中铺设北立面没有多大意义。

3 结 论

本文在理论分析与数值验证的基础上,对小屋外表光伏电池板的铺设方案进行了分析研究,建立了以全年发电量最

大,成本最少为目标的多目标规划模型。根据电池板单位面积上的单价、转化效率及日有效辐射时间 3 个因素对电池的性价比能进行排序。再以总发电量最大,单位费用最小为目标函数,利用 LINGO 编程求解出不同规格电池板铺设的最优方案。又以逆变器的选用费用最小为目标函数,以逆变器的额定电流和允许输入电压范围为约束条件,建立了一个规划模型,运用 LINGO 编程求解出电池板的组件和逆变器的选配方案,最后对经济效率及收回年限进行了计算。此方法有着严密的逻辑推理,具有很大的指导性,根据不同地区的经纬度、太阳辐射强度、日落时间等信息可以进行推广。

参考文献:

- [1] (美)Mark M. Meerschaert, 数学建模方法与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 李国勇. 最优控制理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 周品,赵新芬. MATLAB数学建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 姜启源,谢金星,叶俊. 数学建模[M]. 3版北京:高等教育出版社,2003.
- [5] 谢金星,薛毅. 优化模型与 LINDO/LINGO 软件[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [6] 戴明强,李卫军,杨鹏飞. 数学模型及其应用[M]. 北京:科学出版社,2007.