

太阳能路灯系统的优化设计

Optimal sizing of solar streetlight system

鞠振河 沈阳 110136

摘要:论述了利用太阳能电池组件“全年均衡冬半年最大”的接收太阳能辐射量原则以及利用全年累计最大亏欠量和放电深度计算蓄电池组件容量的方法,确定沈阳工程学院新校区太阳能路灯优化设计结果。

关键词: 太阳能路灯系统 优化设计

一、概述

面对人类的可持续发展,从现有常规能源向清洁、可再生的新能源过渡已提到议事上来了。因为新能源是依托高新技术的发展,开辟持久可再生能源的道路,以满足人类不断增长的能源需求,并保护地球的洁净。利用太阳能发电,既不需要燃料,也没有烟尘和灰渣,不污染环境,非常清洁。特别是太阳能电池组件,使用寿命可达 20 年以上,性能稳定,同时维护费用较低。

太阳能道路照明灯不需要架设输电线路或挖沟铺设电缆,不用专人管理和控制,可安装在广场、停车场、高尔夫球场、校园、公园、街道和高速公路等任何地方。本文是笔者为沈阳工程学院新校区设计的两款太阳能路灯主要内容和结果。

1. 设计原则

太阳能电池组件发电路灯系统设计的总原则是,在保证满足负载供电需要的前提下,确定使用最少的太阳能电池组件功率和蓄电池组件容量,以尽量减少初始投资。对系统设计者来说,在光伏发电系统设计过程中做出的每个决定都会影响造价。由于不适当的选择,可轻易地使系统的投资成倍地增加,而且未必见得就能够满足使用要求。

在设计计算中,需要的基本数据主要有:现场的地理位置,包括地点、纬度、经度和海拔高度等;安装地点的气象资料,包括逐月的太阳能总辐射量、直接辐射量及散射量,年平均气温和最高、最低气温,最长连续阴雨天数,最大风速及冰雹、降雪等特殊气象情况。气象资料一般无法做出长期预测,只能以过去 10 年到 20 年的平均值作为依据。

采取目前国际上流行的“全年均衡冬半年最大”的接收太阳能辐射量的光伏系统设计原则,即根据蓄电池组件均衡充电的要求,以夏半年和冬半年在组件面上的日辐射量相等,但同时还要使组件上冬半年的日辐射量尽量达到最大值,从而增加组件在太阳辐射强度较弱月份的发电量原则,来确定太阳能电池组件面的最佳倾角及其最佳发电电流值,同时统计出全年累计最大的连续亏欠电量,结合适当的蓄电池组件放电深度,确定出组件和蓄电池组件的合理搭配容量。

2. 设计方法

首先根据各向异性的天空辐射模型,计算出在纬度为 ϕ 处,倾角为 β 的斜面

上的太阳辐射量 H_T 。在实际应用时，可在当地纬度的 $-20^\circ \sim +30^\circ$ 范围内分别算出夏半年和冬半年的平均日辐射量 H_1 和 H_2 ，然后根据前述原则，确定当地的最佳倾角及各月平均日辐射量。

(1) 平均峰值日照时数 T_m

求出全年平均日太阳辐射量 $\overline{H_T}$ ，并用单位 mWh/cm^2 表示，除以标准日太阳辐射照度，即可求出平均峰值日照时数 $\overline{T_m}$ 。

$$\overline{T_m} = \frac{\overline{H_T} (\text{mWh} \cdot \text{cm}^{-2})}{100 (\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})} \quad (1)^i$$

(2) 确定太阳能电池组件最佳电流
太阳能太阳能电池组件应输出的最小电流为

$$I_{\min} = \frac{L}{T_m \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} \quad (2)^{ii}$$

式中， L 为负载每天总耗电量； η_1 为蓄电池组件充电效率（0.80~0.90）； η_2 为太阳能太阳能电池组件表面由于尘污遮蔽或老化引起的修正系数，通常可取 0.9~0.95ⁱⁱⁱ； η_3 为太阳能电池组件组合损失和对最大功率点偏离的修正系数，通常可取 0.9~0.95。

由太阳能电池组件面上各月中最小的太阳能总辐射量 $H_{T_{\min}}$ 可算出各月中最小的峰值时数 $T_{\min}$ ，则太阳能太阳能电池组件应输出的最大电流为：

$$I_{\max} = \frac{L}{T_{\min} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} \quad (3)^{iv}$$

太阳能电池组件的最佳电流值介于 $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 之间，具体数值可用试验方法确定。方法是先选定一个电流值 I_A ，按月求出太阳能电池组件的输出发电量，对蓄电池组件全年的荷电状态进行试验。太阳能电池组件输出发电量可根据式 (4) 进行计算。

$$E_A = I_A \cdot N \cdot H_T \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 / 100 (\text{mW} \cdot \text{cm}^2) \quad (4)$$

式中， N 为当月天数。而各月负载耗电量为：

$$E_L = N \cdot L \quad (5)$$

两者相减，若 $\Delta E = E_A - E_L$ 为正，表示该月太阳能电池组件发电量大于用电

量，能给蓄电池组件充电；若 ΔE 为负，表示该月太阳能电池组件发电量小于耗电量，要用蓄电池组件贮存的电能来补充，蓄电池组件处于亏损状态。如果蓄电池组件全年荷电状态低于原定的放电深度（一般 ≤ 0.5 ），则应增加太阳能电池组件输出电流；如果荷电状态始终大大高于放电深度允许值，则可减少太阳能电池组件输出电流。当然，也可以增加或减少蓄电池组件容量。

（3）蓄电池组件容量的确定

列表算出全年各月 ΔE_i 的数值，并算出全年中 ΔE 连续为负值（即连续亏欠量）的累积值 $\sum \Delta E_i$ 。如果全年只有一个连续亏欠期，它就是累积亏欠量之和。对北半球来说，由于岁末年初是冬季，在计算累积亏欠量时应取两年进行连续计算。如有几个不连续的亏欠期，即在连续两个亏欠期之间有 ΔE_i 为正的盈余量，则应扣除此盈余量。最后求出累积亏欠量 $\sum \Delta E_i$ ，这样即可确定蓄电池组件的容量：

$$C = \frac{\sum \Delta E_i}{DOD} \quad (6)$$

式中，DOD 为放电深度，对铅酸蓄电池组件最大可达 75%—80%。但考虑蓄电池组件的寿命等影响因素，一般取 $DOD=60\text{—}70\%$ 为宜。

蓄电池组件容量与负载日耗电量相除，即可得到蓄电池组件的储备天数：

$$n = C/L \quad (7)$$

通常取 $n = 4 \sim 11$ 天即可^{vi}。如得出的 n 太大，则适当增加所取太阳能电池组件的工作电流，重新进行计算。如 n 过小，则适当减小太阳能电池组件的工作电流，直到 n 处于以上范围为止。

（4）确定太阳能电池组件的工作电压

太阳能电池组件的输出工作电压应足够大，以保证全年能有效地对蓄电池组件充电。因此，太阳能电池组件在任何季节的工作电压须满足

$$V_A = V_f + V_d + V_i \quad (8)$$

式中， V_f 为蓄电池组件浮充电压； V_d 为因阻塞二极管和线路直流损耗引起的压降； V_i 为因温度升高引起的压降。众所周知，厂商出售的太阳能电池组件所标出的标称工作电压和输出功率最大值（ W_p ），都是在标准状态下测试的结果。由太阳能电池组件的温度特性曲线可知，当温度升高时，其工作电压有较明显的下降，可用式（9）计算因温度升高而引起的压降 V_i 。

$$V_i = a(t_{\max} - 25)V_a \quad (9)$$

式中， a 是太阳能电池组件的温度系数，对单晶硅和多晶硅电池组件来说， $a=0.005$ ，对非晶硅电池组件来说， $a=0.003$ ； $T_{\max}$ 为太阳能电池组件的最高工作

温度 (45 ~60) ; V_a 为太阳能电池组件的标称工作电压。

(5) 确定太阳能电池组件功率

太阳能电池组件板的功率

$$P_A = \frac{I_A \cdot V_A \cdot K}{1 - a(t_{\max} - 25)} \quad (10)^{\text{vii}}$$

式中, a 、 $t_{\max}$ 取值与式 (9) 中相同, K 为考虑一些未知工作因素, 而引入的安全系数, 可根据电压等级, 数据准确程度, 运行环境等, 在 1.05~1.30 之间选取^{viii}。这样, 只要根据算出的蓄电池组件容量, 太阳电池组件的电流、电压及功率, 参照厂商提供的蓄电池组件和太阳能电池组件性能参数, 就可以选取合适的组件型号和规格了。

2、设计依据

(1) 沈阳工程学院(位于道义开发区)的(1961-1990)年平均基本气候资料

表 1 道义开发区的年平均基本气候资料(1961-1990)

月	水平 辐射 mWh/cm2	气温 (0.1)	最高气温 (0.1)	最低气温 (0.1)	极高气温 (0.1)	极低气温 (0.1)	相对湿 度(%)	日照时数 (0.1h)	平均风速 (0.1m/s)	降水 (mm)	降水 日数 (天)
平均	382.9	81.17	138.33	30.33	256.67	-100.92	62.92	2116.00	29.75	57.08	5.08
1	196.9	-115	-52	-166	86	-305	60	1671	26	7	2
2	299.9	-78	-17	-131	149	-272	55	1809	29	8	2
3	412.7	7	64	-44	198	-217	52	2313	34	16	3
4	498.4	98	160	38	293	-125	52	2406	40	43	5
5	569.3	172	232	111	343	2	55	2672	37	55	6
6	543.7	217	271	166	352	78	67	2473	31	87	8
7	477.2	245	290	204	352	124	78	2143	26	167	11
8	455.1	236	283	193	357	80	78	2237	24	157	9
9	434.3	173	235	119	307	10	71	2355	25	77	6
10	320.7	95	159	41	292	-83	65	2159	28	42	4
11	214.9	3	57	-42	217	-201	62	1643	30	17	3
12	171.8	-79	-22	-125	134	-302	60	1511	27	9	2

注：沈阳道义开发区位于(123° 26' E, 41° 46' N)海拔高度 43 米

(2) 主要指标

组件采用保定英利新能源有限公司生产的多晶硅太阳能电池组件, 设计使用寿命不小于 25 年, 转换效率达到 14%, 功率损失 10% ;

蓄电池组件采用深圳环宇昌电池组件有限公司生产的阀控式密封铅酸蓄电池组件, 其容量设计能满足工作地最长的连续阴雨天负载的正常供电要求。

负载每天耗电：0.084 和 0.168 KWH (度)。

(3) 计算的参数结果

经计算沈阳地区平均实际日照时数 7 小时,平均峰值日照时数(组件面上)为 4.56 小时;最小的日峰值日照时数为 3.68 小时。

太阳能电池组件最佳倾角为 51°。

二、太阳能路灯的构成及技术性能

1. 太阳能路灯工作原理图(图 1)和接线图(图 2)。

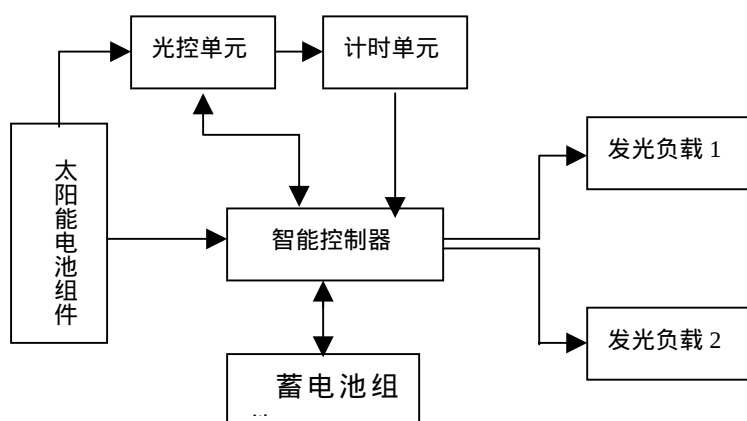


图 1 太阳能路灯原理方框图

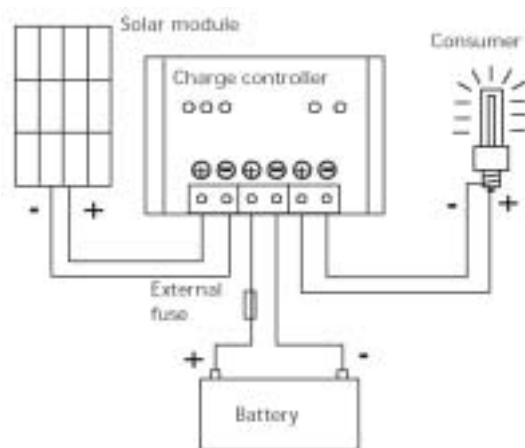


图 2 太阳能路灯接线图

2. 太阳能路灯相当于非并网的小型独立电站,采取免维护密封铅酸蓄电池组件贮能。

3. 太阳能路灯的系统由太阳电池组件组件、蓄电池组件组、智能控制器、高效节能直流灯、灯架、安装材料等组成。系统的工作原理是：在智能控制器的控制下，白天太阳电池组件向蓄电池组件组充电,晚上蓄电池组件组提供电力给直流灯负载。直流控制器能够在任何条件下（阳光充足或长期阴雨天）都能确保蓄电池组件组不因过充或过放而被损坏，同时具备光控、时控、声控、温度补偿

及防雷、反极性保护等功能。本控制器采用先进的无触点控制技术，具有先进的光控功能，晚上自动点亮，白天关灯，也可以定时关灯，而且具有夜间自动切换负载的功能，特别适合路灯和光伏电源控制，并且具有多种保护功能

4. 控制器说明：

控制器负责监视电池组件的充电状态，管理充电过程包括负载的开与关，使电池组件能量充分利用，并延长使用寿命。在温度作用下，充电过程的发生根据IU 曲线的特点。

保护措施：电池组件组：限制充电电压防止过充；关闭负载防止过放。控制器：防止电流过大、温度过高；控制器可以自动开/关负载或组件。负载：在过电压的情况下，关闭负载；系统电压的自动检测（12V/24V）。LED 指示灯会显示工作过程中的所有重要情况。

三、用电负荷计算（见表 2）

表 2 发光负载计算

地点				沈阳工程学院			
经度	123° 26 ' E	纬度	41° 46 ' N	海拔高度	42.8m		
负载情况（根据照明时间长短分为两种类型）							
项 目	负 载	额定功率(W)	数 量	功率(W)	用电时间(h)		日耗电量（Wh）
1	节能灯	7	2	14	6	84Wh	7Ah
2	节能灯	7	2	14	12	168Wh	14Ah

四、技术经济比较计算

1. 照明时间为 6 小时路灯系统

根据表 1 和表 2，当地近 30 年平均基本气象资料、水平面的辐射资料，根据前面公式（1）—（10）利用沈阳工程学院新能源研究中心编制的独立光伏系统设计专用软件计算出组件倾斜面上的平均日辐射数据，算出组件接收面最佳倾角，得出太阳能电池组件和蓄电池组件之间不同的容量组合，其中蓄电池组件容量是根据全年累计最大亏欠量和放电深度确定的。整个计算过程只需输入安装地的水平面逐年逐月日平均太阳能辐射数据、蓄电池组件放电深度及负载大小，程序将自动完成计算，根据已有数据库对组件蓄电池组件进行自动实际设备选型、经济分析（部分数据见表 3）和蓄电池组件荷电状态的校核（表 4），确定出太阳能电池组件和蓄电池组件的最佳容量组合参数。

表 3 组件与蓄电池组件容量组合及经济组合点的确定

组件 U(V)	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50
组件 I(A)	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.09	2.10	2.11
组件计算 P(W)	41.23	41.43	41.64	41.84	42.04	42.24	42.45	42.65
组件峰值 Pm(W)	40.00	40.00	40.00	40.00	50.00	50.00	50.00	50.00
蓄电池组件容量 Cb(Ah)	90.00	65.00	65.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
投资价格比较	1850.00	1725.00	1725.00	1675.00	2025.00	2025.00	2025.00	2025.00

注：太阳能电池组件价格为 35 元/Wp, 蓄电池组件价格为 5 元/Ah。最佳组合点为对应组件输出电流为 2.07A, 组件和蓄电池组件容量分别为 40Wp, 55Ah。

表 4 SL1406 路灯系统对应组件 2.07A 电流时的蓄电池组件荷电状态校核

负载情况 2*7W*6h			月负荷 Ah	发电量 Ah	月盈亏量 Ah	蓄电池组件状态		荷电状态	放电深度
月份	天数 N	日均 Ht	El	E(2.07)	E(2.07)	月初	月末	SOC(%)	DOC(%)
1.00	31.00	395.30	217.00	198.52	-18.48	100.00	81.52	81.52	18.48
2.00	28.00	498.80	196.00	234.17	38.17	81.52	100.00	100.00	0.00
3.00	31.00	538.70	217.00	280.00	63.00	100.00	100.00	100.00	0.00
4.00	30.00	504.20	210.00	253.62	43.62	100.00	100.00	100.00	0.00
5.00	31.00	482.50	217.00	250.79	33.79	100.00	100.00	100.00	0.00
6.00	29.00	426.90	203.00	207.58	4.58	100.00	100.00	100.00	0.00
7.00	31.00	390.20	217.00	202.82	-14.18	100.00	85.82	85.82	14.18
8.00	31.00	424.60	217.00	220.70	3.70	85.82	100.00	100.00	0.00
9.00	30.00	519.10	210.00	261.11	51.11	100.00	100.00	100.00	0.00
10.00	31.00	507.00	217.00	263.53	46.53	100.00	100.00	100.00	0.00
11.00	30.00	421.80	210.00	212.17	2.17	100.00	100.00	100.00	0.00
12.00	31.00	368.20	217.00	191.38	-25.62	100.00	74.38	74.38	25.62
1.00	31.00	395.30	217.00	205.47	-11.53	74.38	62.85	62.85	37.15
2.00	28.00	498.80	196.00	234.17	38.17	62.85	100.00	100.00	0.00

2. 照明时间为 12 小时路灯系统

经过上述同样的计算可得到照明时间为 12 小时的路灯, 最佳经济组合点为对应组件电流为 4.24A, 其组件、蓄电池组件容量分别为 85Wp、90Ah。经过蓄电池组件荷电状态校核其最大放电深度为 55.13%, 小于 60%设计要求(荷电状态校核表略)。

四、最终技术方案的确定

经过计算比较校核, 最后确定出表 6 所列太阳能路灯系统参数。

表 6 太阳能路灯系统配置

SL1406 路灯系统	SL1412 路灯系统
(1) 太阳能电池组件：40Wp 实际选用 YL40(17)P516*663/ Pm=40, Um=17.5V, Im=2.25A, Uoc=21V, Isc=2.7A, Weight=4.3kg	(1) 太阳能电池组件：75Wp 实际选用 YL85(17)P1172*541/ Pm=85, Um=17.5V, Im=4.86A, Uoc=22V, Isc=5.53A, Wight=7.1kg
(2) 充电控制器：12V、6A/60W/Io=3mA	(2) 充电控制器：12V、10A/120/Io=5mA
(2) 蓄电池组件：12V、55Ah HYS12550/12V/55Ah/229*138*208(215)/15kg	(3) 蓄电池组件：12V、90Ah HYS12900/12V/90Ah/307*169*208(227)/31kg
(4) 节能灯：12V、7W×2	(4) 节能灯：12V、7W×2
满足连续阴雨天 5 天以上正常照明的要求	满足连续阴雨天 4 天以上正常照明的要求

五、分析结论

两套太阳能路灯系统的最长连阴天数是计算机程序根据太阳能辐射数据自动计算的，与基本气象数据表 1 中平均 5 天降水天数相吻合。

经过对 SL1412 路灯系统 1-3 月实际近 2 个月的测试观察，其结果基本满足设计要求，智能控制器能够准确地对整个系统进行控制。太阳能电池组件能够正确对蓄电池组件进行充电，蓄电池组件在经过 4 天的连阴天后，路灯仍然准时工作，且经测试蓄电池组件放电深度为 49.2%，系统仍能完成第五天的照明工作。经检验设计工作成功，可以对相关产品进行 CE 认证和批量加工生产。

参考资料

- 1.《Tibetan Photovoltaic Village System》, Zhenhe JU, 2003/8, 欧洲太阳能研究中心。
2. RAPS Design Manual, 1992, P. 22, PV Design/PV system sizing; Stuart R. Wenham, Martin A. Green Muriel E. Watt, Applied Photovoltaics, 1990, P25.
4. Chapman, RN. Sizing Handbook for Stand-alone Photovoltaic/Storage Systems. Sandia.
5. Report SAND 87-1087 VC-63 (1987)。
6. <http://www.energy-china.com/energy/zhonghe/book/saidi1.htm>, <http://www.nrel.gov/documents/serf.html>
7. <http://www.newenergy.org.cn/magazine/tynxb/99tekan/99tekan14.htm>.
8. <http://www.newenergy.org.cn/magazine/tynxb/99tekan/99tekan10.htm>.
9. <http://www.newenergy.org.cn/magazine/tynxb/99tekan/99tekan10.htm>.
10. <http://www.coolsolar.com/cn/situation/web/a73.htm>.
11. <http://www.newenergy.org.cn/magazine/tynxb/99tekan/99tekan11.htm>.
12. http://www.energy-china.com/energy/news/newenergy/newenergynr/633/20030307/24425_1.html.
13. 李安定，《光伏发电的系统工程》，北京工业大学出版社，2001。

ⁱ Chapman, R N. Sizing Handbook for Stand-alone Photovoltaic / Storage Systems. Sandia Report SAND 87-1087 VC-63 (1987).

ⁱⁱ Acta Energiae Solaris Sinica, P. 409; where η_3 is added to the equation by the author.

ⁱⁱⁱ Stuart R. Wenham, Martin A. Green Muriel E. Watt Applied Photovoltaics, 1990, P260.

^{iv} 《太阳能学报》，Vol. 16, No. 4 Oct. 1995, P. 409。

^v <http://www.cs.jmu.edu/common/projects/UNPEPP/PVCH07.doc>.

^{vi} 《太阳能学报》1995, 16(4), 410.

^{vii} <http://www.newenergy.org.cn/magazine/tynxb/9901/990118.htm>.

^{viii} Groumpos P P, Papageorgiou G. An Optimal Sizing Method for Stand-Alone Photovoltaic Power Systems. Solar Energy, 1987, 5, 341-351.

Abstract: This paper presents an optimizing design result of the solar streetlight for the new campus of Shenyang College of Engineering. Design principle is that solar radiation received by solar module is equilibrium in whole year and the biggest in a half a year of winter. The battery capacity is calculated through the maximal accumulated deficit in whole year and the depth of discharge the battery.

Key words: Solar streetlight system optimal sizing