

# 重庆地区太阳能光伏发电潜力分析

Analysis on Solar Photovoltaic Power Generation Potential in Chongqing

唐爽<sup>1</sup>, 丁勇<sup>1</sup>, 董孟能<sup>2</sup>, 叶强<sup>1,2</sup>

(1重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400045; 2重庆市城乡建设委员会,重庆 400014)

**摘要:** 该文对重庆市太阳能资源进行实际测试与分析对比;并采用PVsyst 软件对单、多晶硅和非晶硅太阳能电池组件的比功率发电量进行模拟;将光伏发电与常规发电技术对比,计算光伏发电成本与投资回收期。结果表明,重庆地区非晶硅太阳能电池板的比功率发电量大于单、多晶硅的比功率发电量,光伏发电成本约为常规发电技术的2~3倍。

**关键词:** 太阳能电池;PVsyst软件;比功率;发电量;发电成本;投资回收期

**中图分类号:** TU18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-9107(2014)09-0008-04

**Abstract:** Actual test and analysis are made in solar energy sources in Chongqing and simulations are also made in power amount by monocrystal silicon, polycrystalline silicon solar cells, and amorphous silicon solar cells with PVsyst software. Photovoltaic power generation is compared with conventional power generation methods to calculate the cost of photovoltaic power generation and investment return period. The results show that amorphous silicon solar cells specific yield is larger than monocrystal and polycrystal silicon solar cells and the cost is two to three times that of conventional power generation.

**Key words:** solar cells; PVsyst software; specific yield; generating cost; payback period

(重庆纬度)、 $19.5^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$ 、四种表面朝向均为正南。

将本次 $0^{\circ}$ 倾角表面的测试值与《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中典型年的数据进行对比。经对比,二者全年变化趋势基本相似,二者全年太阳辐照量分别为 $3155.7 \text{ MJ/m}^2$ 和 $3058.5 \text{ MJ/m}^2$ ,实测值仅比典型年大3.2%,测试值与典型年值基本接近,测试接近重庆地区太阳能资源的真实水平。

通过对重庆地区典型年太阳辐照量分析,重庆地区全年太阳能资源分布极不均匀,全年日太阳辐照量方差为 $46.42 \text{ MJ/m}^2$ ,具有明显的阶段性分布特征,4~9月份的太阳辐照量占全年的72.3%,具有较好的太阳能应用潜力。根据对重庆地区的典型年太阳辐射数据进行对比;对比分析单晶硅、多晶硅、薄膜等不同太阳能电池在重庆地区太阳能资源条件下的应用效果,并对全年逐月发电量进行了理论计算,对比火电、水电等常规发电技术做出技术经济分析,对重庆地区太阳能光伏发电做出评价。

## 0 引言

重庆市近年来大力发展可再生能源应用,目前已经开展的工作主要集中在利用浅层地热能的地源热泵系统,对太阳能资源的利用尚处于摸索阶段。

由于气候条件的限制,重庆地区的太阳能利用规模较小。为进一步探索重庆地区太阳能光伏在建筑上的应用,本文对重庆地区全年太阳能资源进行测试分析,研究其全年分布特征,并与《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中重庆地区的典型年太阳辐射数据进行对比;对比分析单晶硅、多晶硅、薄膜等不同太阳能电池在重庆地区太阳能资源条件下的应用效果,并对全年逐月发电量进行了理论计算,对比火电、水电等常规发电技术做出技术经济分析,对重庆地区太阳能光伏发电做出评价。

## 1 重庆地区太阳能资源分析

太阳辐射强度主要与太阳高度角、纬度、地势及天气状况有关。为探究重庆地区不同倾角表面下全年的太阳能资源分布,对重庆地区不同倾角表面下全年接收的太阳辐照量进行了连续测试。测试选用四种典型倾角表面,分别为 $39.5^{\circ}$ 、 $29.5^{\circ}$

收稿日期:2014-07-18

作者简介:唐爽(1992—),女,重庆人,硕士研究生,主要从事可再生能源建筑应用方面的研究。

丁勇(1975—),男,山东黄县人,博士,教授,主要从事可持续建筑环境与建筑节能方面的研究。

## 2 不同太阳能电池在重庆地区应用效果

### 2.1 发电量理论计算

单晶硅和多晶硅生产技术成熟,是光伏市场上的主导产品。多晶硅太阳能电池没有光致衰退效应,材料质量有所下降时也不会导致太阳能电池受影响。非晶硅太阳能电池易于大面积化生产,成本较低,透光性和弱光发电性能好,缺点是光电转换率低,要产生同样的电力,采用非晶硅薄膜电池时需要安装的面积应成倍增加。

为比较不同太阳能电池在重庆地区的应用效果,采用PVsyst软件对单晶硅、多晶硅、非晶硅(薄膜)太阳能电池的月发电量进行模拟计算。

## 重庆地区太阳能光伏发电潜力分析

### 2.1.1 计算过程

PVsyst软件选取重庆作为项目地理位置。将软件中气象数据值与重庆地区典型年气象数据进行对比。

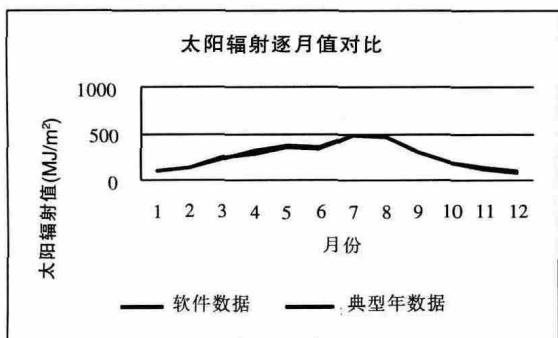


图1 太阳辐射逐月值对比

典型年太阳年辐射值为 $3058.5\text{ MJ/m}^2$ ，软件太阳年辐射值为 $3128.9\text{ MJ/m}^2$ ，差值为 $70.4\text{ MJ/m}^2$ 。从图1中数据对比看来，软件模拟使用的太阳逐月辐射值与典型年的数值接近，软件模拟的结果具有一定的参考性。

表2 不同太阳能电池发电量及发电效率

月份	单晶硅			多晶硅			非晶硅		
	日发电量 (kW·h/d)	月发电量 (kW·h)	发电效率	日发电量 (kW·h/d)	月发电量 (kW·h)	发电效率	日发电量 (kW·h/d)	月发电量 (kW·h)	发电效率
1	71.23	2208	4.18%	66.78	2070	3.92%	94.31	2924	5.61%
2	99.47	2785	5.27%	93.25	2611	4.94%	131.7	3688	7.08%
3	152.2	4720	8.94%	142.7	4425	8.38%	201.6	6249	12.00%
4	222.2	6666	12.62%	208.3	6250	11.83%	294.2	8827	16.95%
5	251.6	7801	14.77%	235.9	7313	13.84%	333.2	10329	19.83%
6	256.4	7692	14.56%	240.4	7211	13.65%	339.5	10184	19.55%
7	326.9	10134	19.18%	306.5	9501	17.99%	432.8	13418	25.76%
8	328.5	10182	19.28	307.9	9546	18.07%	434.9	13482	25.89%
9	220.3	6610	12.51%	206.6	6197	11.73%	291.7	8751	16.80%
10	125.6	3895	7.37%	117.8	3651	6.91%	166.4	5157	9.90%
11	96.18	2885	5.46%	90.17	2705	5.12%	127.3	3820	7.33%
12	61.32	1901	3.60%	57.49	1782	3.37%	81.19	2517	4.83%
年	184.9	67479	—	173.3	63262	—	244.8	89345	—

重庆位于北半球，方位角选取正南面。最佳倾角的选取由实验所得结论为 $0^\circ$ 倾角表面(水平面)全年太阳辐照量最大。安装方式选择固定角安装。

模拟计算以 $70\text{ kW}$ 并网光电站为例。表1为非晶硅和单、多晶硅光伏发电系统的具体数据<sup>[1]</sup>。组件类型选择标准型，通风状态下，选择平屋顶进行安装。对不同的光伏材料进行选择，将三种系统类型的安装面积分别对应输入软件中，模拟出不同的结果。

表1 不同太阳能电池光伏发电系统数据

类型	模组功率/W	总功率/kW	行	列	电池板数量	安装面积/m <sup>2</sup>
单晶硅	80	71	37	24	888	574
多晶硅	80	71	37	24	888	574
非晶硅	30	70	38	61	2318	1216

对三种不同材料的太阳能电池发电量进行模拟，结果如表2。

### 2.1.2 不同太阳能电池应用效果比较分析

用比功率发电量反映太阳能电池组件在应用中的实际发电能力<sup>[2]</sup>。

由表3可知，该并网光伏发电系统中，每千瓦多晶硅太阳能电池的日平均发电量为 $2.44\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，与单晶硅 $2.60\text{ kW}\cdot\text{h}$ 接近。但非晶硅的日平均发电量为 $3.50\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，为单晶硅的 $1.35$ 倍，为多晶硅的 $1.43$ 倍。根据PVsyst软件的模拟比较，结果表明，在重庆地区，非晶硅太阳能电池板的比功率发电量均大于单、多晶硅太阳能电池的比功率发电量。非晶硅太阳能电池板的生产成本约为单、多晶硅太阳能电池板的 $60\%$ ，但由于非晶硅太阳

表3 不同太阳能电池比功率发电量

类型	年发电量/(MW·h)	比功率发电量/(kW·h)
单晶硅	67.48	2.60
多晶硅	63.26	2.44
非晶硅	89.35	3.50

能电池的转换效率比单、多晶硅太阳能电池的转换效率要低，在发电量相同的情况下采用非晶硅薄膜电池时，安装面积需要成倍增加。重庆属于山地城市，建筑密度大，安装非晶硅薄膜电池时需要更大的面积，应用的难度可能会增大。

## 2.2 太阳能光伏发电成本计算

### 2.2.1 度电成本计算

根据前文软件模拟年发电量的结果，对重庆地区太阳能并网光伏系统发电系统成本与度电成本，及投资回收期进行测算，见表4。

表4 初始条件

计算项目	计算公式	内容
装机成本 $C_{i_{as}}$	—	参考现有项目，1.6万元/kW <sub>p</sub>
运营管理成本 $C_{op}$	$C_{op}=C_{i_{as}} \times R_{op}$ <sup>[7]</sup>	假定 $R_{op}$ 为 2%
财务费用 $C_{fin}$	$C_{fin}=C_{i_{as}} \times C_{loan} \times C_{intr}$ <sup>[7]</sup>	假设贷款占总投资比例 $C_{loan}$ 为 70%，贷款利率 $C_{intr}$ 为 6.55%
使用期限	—	20年
光伏发电补贴	—	暂不考虑补贴
发电量测算	—	取前文模拟计算三种太阳能电池板发电量平均值，每1kW <sub>p</sub> 光伏组件每年发电量为 1048kW·h

假设  $T_{cost}$  为成本电价（在预定的投资回报期内能够收回光伏电站总投资成本的最低电价），因为光伏电站的日常运营费用很小，每个电站的成本电价主要取决于固定资产折旧，也就是与预期的投资回收期密切相关<sup>[3]</sup>。

成本电价计算公式：

$$T_{cost}=C_p(1/P_{ei}+R_{op}+R_{loan} \times R_{intr}-i_{sub})/H_{fp}$$

用  $C_p$  代表单位装机容量的装机成本，即  $C_p=C_{i_{as}}/P$ ， $i_{sub}=I_{sub}/C_{i_{as}}$ ，作为单位装机成本的其他补贴收入，称为电站的其他补贴收入系数。

$$C_p=1.6 \text{ 万元} ; P_{ei}=20 \text{ 年} ; R_{op}=2\% ; R_{loan}=70\% ; R_{intr}=6.55\% ; H_{fp}=1048 \text{ kW} \cdot \text{h} ; i_{sub}=0\%.$$

$$T_{cost}=16000(1/20+2\%+70\% \times 6.55\%)/1048=1.77 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$$

在未考虑光伏电力输送成本及其他电网服务成本的前提下，测算出并网光伏度电成本为 1.77 元/kW·h 左右。

### 2.2.2 投资回收期计算

表5 投资回收年限对比

贷款条件	投资回收期(年)				
	5	10	15	20	25
全部自有资金	3.36	1.83	1.32	1.07	0.92
70% 贷款比例，6.55% 的年息	4.06	2.53	2.02	1.77	1.62

按照上文对该光伏系统所设置的条件，对投资回收期(年)进行计算。

由表5可见，如果全部采用自有资金投入，投资回收期设定在25年，目前的光伏发电成本电价仅为0.92元/kW·h。而如果设定投资回收期为5年，则成本电价高达3~4元/kW·h。因此，投资回收期的设定对于光伏发电成本电价的影响是巨大的。在我国，火力发电厂的投资回收期通常为15~30年，而核电的投资回收期为50年。因此，对于光伏发电的可行性分析计算时，按照20年或者25年的投资回收期计算比较合理。

从表5可看出，在70%贷款的条件下，如果电价定为1.77元/kW·h，则20年可回收投资，如果电价定为1.62元/kW·h，则25年可回收投资。

## 3 太阳能光伏发电与常规发电技术对比

我国现阶段火力发电所采用的能源主要是煤，火力发电所造成的环境污染严重。在目前，我国的电力还是以火电为主，火电装机容量仍占电力总装机容量的73%左右，火力发电量占总发电量的比例超过80%<sup>[4]</sup>。水资源是可再利用资源，水力发

电成本也相对较少。小型水电的发电成本与火电相当,大型水电的发电成本为火力发电的50%左右。风力发电是一种环保洁净的绿色能源。风力发电厂初投资较高,投资的供应成本还不具备与常规能源产品进行竞争的能力,这也是阻碍风力发电发展的原因之一。

不同发电方式的成本价格对比见表6。

表6 发电成本价格对比

类型	单价
火力发电	0.4~0.5元/kW·h <sup>5</sup>
水力发电	0.4元/kW·h <sup>6</sup>
风力发电	0.5~0.6元/kW·h <sup>6</sup>
光伏发电	1.0~1.3元/kW·h <sup>7</sup>

太阳能是可再生清洁能源,相对水力发电和风力发电没有地域的限制,相对于火力发电和水力发电不会对生态环境产生影响。太阳能发电不需要燃料,机械维修的必要性也低,成本几乎都是初期投资。产生的电量取决于日照强度和转化效率,日照强度取决于装置设置的场所。

表6中所示的现太阳能发电电价比常规电价约高一倍,而上文计算出重庆地区的发电电价是常规电价的3倍左右。除了太阳能大量普及能带来成本下降的效果以外,还必须从根本上提高太阳能发电装置的经济性。

重庆地区冬季太阳辐射量小,夏季辐射量大,模拟太阳能电池组月发电量最大差值如表7所示。

表7 不同太阳能电池月发电量比较

类型	月发电量最大值 (kW·h)	月发电量最小值 (kW·h)	差值 (kW·h)
单晶硅	10182	1901	8281
多晶硅	9546	1782	7716
非晶硅	13482	2517	10965

三种类型电池组发电量月最大差值的平均值为8987kW·h。重庆地区太阳能电池组冬季发电量远远低于夏季发电量。重庆地区夏季由于大量制冷设备的使用,电网处于高峰期。可将太阳能光伏发电与建筑空调制冷结合起来。光伏系统在建筑上的应用,除了保证建筑自身用电外,还可向电网供电,舒缓高峰电力需求,解决电网峰谷供应矛盾,具有极大的社会效益。

## 4 结语

根据前文假设条件,计算出重庆地区的单晶硅的比功率发电量为2.60 kW·h,多晶硅为2.44 kW·h,非晶硅为3.50 kW·h。非晶硅太阳能电池的比功率发电量为单晶硅的1.35倍,为多晶硅的1.43倍。

通过前文对不同太阳能电池在重庆地区的发电量模拟计算及对比,综合发电比功率、成本、安装各方面,非晶硅太阳能电池板在重庆地区的应用效果优于单、多晶硅。

在未考虑政策补贴的情况下,贷款占总投资比例为70%,投资回收期定为20年时,测算出重庆地区光伏发电成本为1.77元/kW·h左右,为常规发电技术成本的3倍左右。当投资全部为自有资金,投资回收期定为25年时,测算出发电成本为0.92元/kW·h左右,此时的发电成本仍为常规发电技术成本的2倍左右。光伏发电成本平均值为1.0~1.3元/kW·h,重庆地区光伏发电成本高于光伏发电成本平均水平,重庆地区为太阳能资源IV地区对此有较大影响。

通过比较,重庆地区夏季光伏发电效果远优于冬季,且发电量差值较大。不建议建设大规模的太阳能电站,建议将太阳能发电与建筑结合,采用并网发电的方式,满足公建、住宅部分用电。

### 参考文献:

- [1] 马胜红,李斌,陈东兵,等.中国光伏发电成本、价格及技术进步作用的分析[J].太阳,2010(04).
- [2] 李振全,徐云亮,Shyshenq P Liou.几种太阳能电池组件比功率发电量的模拟与比较[J].电工电气,2010(04).
- [3] 史珺.光伏发电成本的数学模型分析 [J].太阳能,2012(02).
- [4] 杨勇平,杨志平,徐钢.中国火力发电能耗状况及展望[J].中国电机工程学报,2013,33(23).
- [5] 胡仁芳.四大发电方式大比拼,解决电力紧缺靠煤不够 [EB/OL]. [2014-07-17].[http://zqrb.ccstock.cn/html/2011-05/09/content\\_243787.htm](http://zqrb.ccstock.cn/html/2011-05/09/content_243787.htm).
- [6] 汤鑫华.论水力发电的比较优势[J].中国科技论坛,2011(10).
- [7] 张雯,刘瑞丰,刘静,等.基于多影响因素分析的光伏发电成本及走势预测模型[J].陕西电力,2013(11).