

16kW “全额上网” 屋顶光伏发电站设计及经济分析

连麒飞

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司中南电力试验研究院 河南省郑州市 450047

摘要: 本文主要致力于小规模分布式屋顶光伏发电站的设计及其经济分析。为使结果更加真实可靠, 本设计过程充分的结合我国实际光伏发展现状, 市场需求及市场条件, 并结合现有条件选取河南许昌某学校作为光伏系统设计地点。本文从具体地点的选择、光伏组件的选择、摆放方式、组件放置倾角和逆变器的选择等几个方面来设计 16kW “全额上网” 屋顶光伏发电站。本设计考虑经济效益的问题, 进行效益的计算和可行性分析, 从投资回收期 and 净现值的计算结果分析光伏系统设计的可行性。

关键词: 屋顶; 光伏发电站; 经济分析; 效益

前言

如今化石能源年开采量随着人们的需求迅速增加, 能源面临的枯竭问题是不可避免的, 还需面对环境污染和全球变暖的生态压力, 这些问题使得人们认识到需要加大可再生能源开发和利用。20 世纪 90 年代后半期, 世界光伏发电产业不断进步。在实际的生产过程中, 生产投入的 1 度电可以在其整个生产周期内收回 30-50 度电 (在不同的地区有一定的差别), 是投入回报较高的一种生产方式^[1]。在 1997—2002 年间, 太阳能光伏电池产量年均增长达 33.1%; 2003—2007 年, 其年平均增长率可达到 49.5%^[2]。2008 年全球产量达到 6791Mw。随后全球装机容量逐年上升, 2016 年达 304300Mw, 2023 年全球光伏新增装机 390GW, 同比增长 69.6%, 累计装机容量约 1546GW, 发展速度仍呈上升势头。

我国对光伏发电产业的发展逐渐重视起来, 相继提出了许多的惠民政策来加快光伏产业的发展, 并给以足够的生长空间。本文致力于探索小规模发电站的设计, 本设计从太阳能光伏电池组件的选择, 组件之间的排列方式, 及组件的最佳倾角的计算, 分析所选地区的地貌和气候以及逆变器的选择等几个方面设计屋顶光伏发电站, 另外本设计是全额上网, 故不再讨论蓄电池的选择以及安装。本文还分析该小规模屋顶发电站的经济效益, 在计算建设成本与收益时, 按市面实际组件价格, 加强设计系统的可信性。

1. 光伏发电系统组成

光伏系统的组成根据实际需求有所不同。太阳能光伏

发电系统是运用太阳能电池组件和其它辅助设备将太阳能转换成电能的系统^[3]。光伏系统可分为三种: 独立光伏系统、混合型光伏发电系统、并网光伏发电系统。本文研究主要针对对于“全额上网”屋顶光伏发电站即并网光伏发电系统。

并网光伏发电系统由光伏电池方阵、并网逆变器、控制器等组成, 有的还有蓄电池, 在没有额外要求下不用添加蓄电池。其工作原理示意图如下所示。

光伏电池产生电能, 流经配电箱进入并网逆变器 (如有需求可另配蓄电池)。并网逆变器有充放电控制、功率调节、交流逆变、并网保护切换等部分组成^[4]。

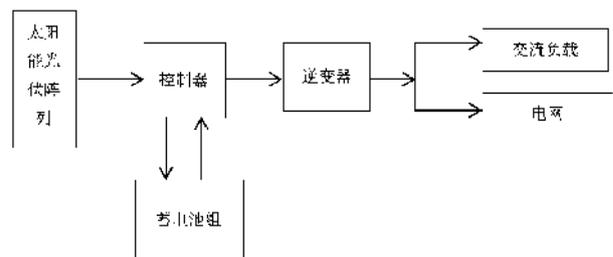


图 1 并网型太阳能光伏发电系统结构原理

2. 16kW “全额上网” 屋顶光伏发电站的设计

本文设计的是全额上网型光伏发电系统, 即光伏系统发电经过逆变器调整与电网电力相同的相位、频率等然后直接并网不再供家庭使用, 从而获取卖电利润。“全额上网”光伏系统结构如下图。

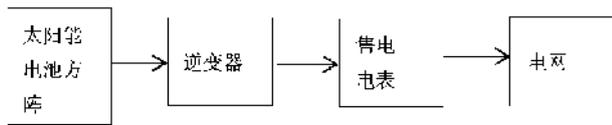


图2 “全额上网”屋顶光伏发电系统图

2.1 屋顶光伏电站系统场地的选择

结合现有条件，本设计地点选定许昌市某学校，选取设计地点原因如下：

(1) 从地貌地形来讲，许昌市地势比较平缓，易进行光伏组件的大面积铺设。

(2) 从天气气候来讲，许昌市四季分明，极端天气较少，且近年来雾霾天气逐渐减少。

(3) 从当地辐照量来看，光伏系统设计地点选取时应慎重考虑该因素，许昌市地区全年日照时数平均为 2150-2391 小时，太阳辐照总量为 1304kwh/m²。根据《太阳能资源等级 总辐射》，可知学校所在地水平面总辐射等级为 C(丰富)，稳定度等级为 B(稳定)，直射比等级为 C(中)，散射辐射较多。从太阳能资源利用角度来说，在屋顶建设光伏电站可行。

(4) 从可选具体地点来看，许昌市学校较多，具有大量的学校屋顶未铺设光伏组件，可供选择的地方较多。

综上，选取设计地点为许昌市某学校屋顶，经测量该校教学楼长为 106 米，宽为 32 米，即楼顶平面面积为 3392 平方米。另外教学楼楼顶有一障碍物，占地面积约为 121 平方米，则教学楼顶实际可用面积约为 3271 平方米。

2.2 屋顶光伏发电系统元件设计

2.2.1 太阳能电池组件的选择

现阶段较为普遍的是单晶硅太阳能电池和多晶硅电池，下面来分析一下二者的区别，确定本设计方案的最佳选择。就理论效率而言，单晶硅较高。单晶硅电池转换效率大于 20%，多晶硅电池仅 18% 左右。但单晶电池组件的价格比多晶略高，则相同的投入成本，采取单晶硅发电量会小于多晶组件光伏系统。而组件的衰减和发电量不仅仅是电池种类，封装、材质和环境等因素也有很大的影响。综上所述，在目前的条件和市价下，结合本设计选择单晶硅组件，并结合本设计额定功率为 16kW，经市场分析和考察决定选取天合光能出品的型号为 TSM-DEG19C.20 的单晶硅组件。该单晶硅组件详细参数如下。

表 1 天合光能 TSM-DEG19C.20 单晶硅太阳能组件结构及电性能参数

型号	TSM-DEG19C.20
电池片类型	2384*1096*35mm
产品功率	540w
开路电压	37.7V
短路电流	18.30A
工作电压	31.4V
工作电流	17.21A
价格	1100 元

2.2.2 太阳能电池板数量确定

太阳能电池是核心的部件，电池组件的数量决定了系统的功率。根据表 2 数据计算太阳能电池板实际数量。

本光伏电站额定功率为 16kW，故所需 TSM-DEG19C.20 单晶硅太阳能组件个数，根据公式 (3-1) 给出：

$$N = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (3-1)$$

式中，N——所需电池组件个数；

P——系统设计额定功率；

P_{max}——单个电池组件额定功率。

$$\text{即 } N = 16000 / 540 = 29.63 \approx 30$$

故取该型号太阳能组件个数为 30 个。

2.2.3 分析组件串并联

将 30 个太阳能电池组件串联计算电压得，

$$U = U_{MAX} \times N \quad (3-2)$$

式中，U——路端电压；

U_{MAX}——单个组件路端电压；

N——串联电池组件个数。

$$\text{即 } U = U_{max} \times N = 31.4V \times 30 = 942V$$

2.2.4 逆变器的选择

逆变器也称逆变电源，能把直流电转换成交流电，是光伏系统中的重要部件。逆变器主要组成部分有输入、输出、主逆变开关、控制、辅助和保护电路等^[6]。本研究由于只选择设计为全额上网型光伏系统所以对与所选联网逆变器要求如下：逆变器在不同的光照下能够高效对电站的直流电进行转换和调节；逆变器能够对最大功率点进行跟踪，保持光伏系统的最大效率；逆变器输出为正弦波电流；逆变器的大小适应场地需求。

综上所述原因以及市场调查最终挑选了固德威 GW20K-SDT-31 逆变器。固德威 GW20K-SDT-31 逆变器电性参数如下表。

表 2 GW20K-SDT-31 电性参数

型号	GW20K-SDT-31
额定输出功率	20kW
最大输入电压	1100V
MPPT 路数	2
并网启动输入电压	160
额定输入电压	600V
每路 MPPT 最大输入电流	40A
每路 MPPT 最大短路电流	50A
电网频率范围	44-55Hz/54-56Hz(根据当地标准)
效率	98.7%
输出波形	纯正弦波
重量	16.6kG
单价	6000 元 / 台

2.2.5 太阳能电池方阵支架的选择

太阳能电池方阵的支架有两种，一种倾角可调节的，一种安装在一个固定的角度，以使太阳能电池方阵在设计月份中（即平均日辐射量最差的月份）能够获得最大的发电量^[7]。其中追踪式支架初期投入和后期维修成本都比较大，一般适用于大规模的发电站。根据市价考虑成本，较为安全、合适的选择固定式支架。

2.3 太阳能电池组件倾斜角计算

光伏组件的倾斜角影响发电效率，为增大年发电量，本设计地点位于北半球北回归线以北位置，电池板应该朝南放置。即选择光伏组件放置为北高南低，与地平面保持一定夹角，得出太阳能组件的最佳倾斜角^[5]。

(1) 计算许昌地区中午时分太阳高度角 α 和方位角 γ ^[5]。

$$\sin \alpha = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \omega \quad (3-3)$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (3-4)$$

式中， Φ ——纬度，取纬度为 $34^{\circ} 02' 12.77''$ ；

δ ——太阳赤纬角，冬至日为 -23.5° ；

ω ——时角，9:00 时角为 45° 。

计算可知：

$$\sin \alpha = \sin 34^{\circ} 02' 12.77'' \times \sin(-23.5^{\circ}) + \cos 34^{\circ} 02' 12.77'' \times \cos(-23.5^{\circ}) \times \cos 45^{\circ} = 0.315$$

故许昌地区太阳高度 α 为 $18^{\circ} 21'$

$$\sin \gamma = \cos(-23.5^{\circ}) \times \sin 45^{\circ} \div \cos 18^{\circ} 21' = 0.68$$

故许昌地区太阳方位角 γ 为 43°

(2) 倾角确定

倾斜面方阵表面的太阳辐射量^[5]：

日辐射量的公式：

$$R_{\beta} = S[\sin(\alpha + \beta) \div \sin \alpha] + D \quad (3-5)$$

式中， R_{β} ——倾斜方阵面上的太阳总辐射量；

D ——散射辐射量；

S ——水平面上的太阳直接辐射量；

β ——光伏阵列倾角；

α ——许昌地区中午时分的太阳高度角。

查询气象局太阳能辐射数据，计算出光伏矩阵倾角为 28° 时，接收辐射量最大。所以本设计倾角采用 28° 。

2.4 辅助设备的选择

(1) 电缆的选择

因为系统安装在教学楼楼顶，需要充分考虑不同天气下系统能否有正常工作的能力，例如暴雨，大风，暴雪等条件下系统的安全性。考虑许昌地区恶劣天气较少，降雪、雨量以及风力并不大，选用 4mm^2 的常用电缆即可。

(2) 电表的选择

本系统是全额上网型，只用来输入当地电网即卖电，而不用用于校园的负载消耗。这就要电表将输送给电网的电量数据记录下来。则本系统配备单项电表进行输出电量的统计即可。

(3) 接地方式和避雷设施的选择

本文设计系统属于三级防雷建筑物，由 GB50057-2010《建筑防雷设计规范》，该太阳能光伏电站必须进行一定的接地和防雷设计^[8]。则采取电焊直接接地，加装避雷针。

3. 屋顶光伏电站的经济分析

3.1 年平均发电量

本光伏发电系统额定功率设计为 16kw，系统在实际的运行中发电量会受当地气候、光照条件、实际运行工况，组件实际效率等影响。首先计算理论上的平均年发电量。

$$Q_c = Q \times S \times \eta \quad (4-1)$$

式中， Q_c ——系统的理论年发电量；

Q ——每年的平均太阳辐照量；

S ——太阳能电组件的总面积；

η ——光电转换效率，取 20%。

单个太阳能电池板的面积为 2.6m^2 ，30 个组件总面积为 78.39m^2 。许昌市的太阳辐照总量为 $1304\text{kWh}/\text{m}^2$ ，计算理论年发电量为 $20444.11\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由于系统中各个组件不可能同时达到最大功率，以及环境因素、气候条件的影响，光伏发电的实际发电量要远远低于理论量^[9]。

根据公式 (4-2) 计算实际平均年发电量如下。

$$Q_M = Q_C \times \eta \quad (4-2)$$

式中, Q_M ——实际年发电量;

Q_C ——理论年发电量;

η ——系统实际总效率 (这里取 80%)。

综合上述分析和计算可以得出, 在规律性清洁光伏发电

池组件及其他设备的情况下考虑逆变器损失, 实际发电效率可达到 80%, 实际发电量为 16355.29kW·h。

3.2 系统可行性分析

3.2.1 装机成本

统计建设成本如下表所示, 由表知, 装机成本为 51820

元。

表 3 光伏发电系统装机费用统计

序号	名称	型号	数量	单价	合计
1	电池板	天合光能 TSM-DEG19C.20	30 组	1000	30000
2	并网逆变器	固德威 GW20K-SDT-31	1 台	6000	6000
3	电表	10A	1 个	120	120
4	人工费		整套设备安装	3000	3000
5	配电柜		1 台	500	500
6	太阳能支架	铝合金	1 套	5000	5000
7	电缆	4mm ²	100 米	8	800
8	避雷设施		1 个	400	400
9	运输费			1000	1000
10	土建	混凝土	1 套	3000	3000
11	设计费		1 套	2000	2000
12	合计				51820

3.2.2 净现值和投资回收期

(1) 净现值的计算

由公式 (4-3) 计算:

$$NPV = (G - CM)Pr - G_0 + L \quad (4-3)$$

式中, G ——系统年平均收益;

CM ——系统年维修费用;

G_0 ——光伏系统初期投资总成本;

L ——系统的残值折现;

Pr ——现值系数。

本系统年发电量为 16355.29kW·h, 由于本系统为全额上网, 全额上网电价取 0.3779 元/kWh。则每年收益为 6180.66 元。系统可运营 25 年, 总收益 154516.60 元。在本设计计算中估计本系统年运行管理费用为 500 元。

假设系统的净残值折现为 5000 元。基准折现率为 5%, 计算净现值为:

$$NPV = (G - CM)Pr - G_0 + L = -51820 + (6180.66 - 500) \times 14.0939 + 5000 \approx 3.32 \text{ 万元} > 0$$

则本设计在经济上是可行的。

(2) 静态投资回收期的计算

投资回收期指投资成本回收的期限, 也就是用投资方案所产生的净现金收入回收初始全部成本所需的时间^[10]。

本处采取静态回收期计算, 忽略资金的时间价值。根据公式 (4-3) 给出:

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (4-4)$$

式中, PBP ——静态投资回收期;

P ——系统初期总投资;

R ——系统等额年净收益。

由上文计算 $P=51820$ 元, $R=6180.66-500=5680.66$ 元/年。

该系统的静态投资回收期为:

$$PBP = P/R = 51820/5680.66 \approx 9 \text{ 年}$$

则本设计系统静态投资回收期为 9 年, 在不考虑资金的时间价值的情况下, 系统运营的第十年开始获取收益。本设计系统根据购买组件厂家保证和现阶段光伏电站运营普遍年限可推测, 系统可正常运作年限约为 25 年, 收回成本后, 可持续获利年限为 16 年。

3.2.3 可行性分析

(1) 经济角度

对本系统进行可行性分析, 在相同年限下, 从投资前后收益的多少, 讨论系统的可行性。在不投资光伏电站建设的情况下, 可以预留出两部分资金, 第一部分为初期建设成本, 第二部分为年维修费 500 元。

首先将光伏电站的建设成本放入银行, 取定期存款年

利率稳定不变为 1.00%，25 年后可得收益终值约为 6.65 万元。

然后将第二部分资金即年维修费用 500 元，按基准折现率 5% 计算 25 年后净终值。计算如下。

$$NFV(i_0) = A \times \left(\frac{F}{A}, i_0, N \right) (4-5)$$

式中，NFV——净终值；

A——平均年等额维修管理费；

i_0 ——基准折现率；

N——系统可运行年限。

计算中取 $N=25$ ， $i_0=5\%$ ， $A=500$ ，查复利系数表，计算得 $NFV \approx 2.4$ 万元。

即 25 年后两部分成本资金相加终值为 9.05 万元。

将上文中的 NPV3.32 万元按基准折现率 5% 计算，25 年后净终值为 11.24 万元，显然建设光伏电站收益更高。

(2) 环境角度

化石能源燃烧产生 CO_2 ，加重温室效应，另外还会产生氮氧化物，与大气相结合，产生酸雨。雾霾的出现使得人们认识到清洁能源的重要性，光伏发电形式污染较少，对周围环境和人们正常生活造成负面影响较小。建设光伏电站，可缓解供电紧张，减少燃煤发电，有利于环境的保护。

4. 结论

面临一次能源的紧张和环境问题，我们越来越意识到可再生能源的利用和开发显的尤为重要。在今后，无论是军事、国防和生活这些方方面面都将离不开光伏产业。光伏产业将越来越贴近我们每个人的生活，建设环境友好型社会，贯彻可持续发展理念，发展光伏事业是不可或缺的。对于中东光伏电站规模，分布式屋顶光伏电站的技术和设计是极其重要的。本设计中对于可选地河南许昌某学校教学楼进行详细的分析，从当地气候以及光照强度加以讨论，致力于能够做出更加贴合实际的设计方案。在本文后边对于本设计系统做了可行性分析，并从投资回收期 and 净现值的角度来讨论本设计的收益情况。在这之后本文与把投资成本用于稳定

收益型方式进行比较，显然本设计的收益是可行的。希望可以通过对屋顶光伏发电站的设计及经济分析，让更多的人看到光伏产业的光明前景。

参考文献：

- [1] 赵丽娟. 软件行业现状及发展前景 [J]. 甘肃科技纵横, 2012,41(04):19-20.
- [2] 田吉孟. LN 光伏公司国际竞争战略研究 [D]. 山东大学, 2013:1-2.
- [3] 何道清. 太阳能光伏发电系统原理与应用技术 [M]. 化学工业出版社, 2012:6-9.
- [4] Yan Qing Li, Fu Ju Wang, Man Man Yang. A Simple Analysis of the Influence on Power Quality from Grid Photovoltaic Power Generation System [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1477(347).
- [5] 茆俊伟. 光伏电站优化设计研究 [D]. 合肥工业大学, 2022.
- [6] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术 [M]. 化学工业出版社, 2009:136-137.
- [7] 董梓童. 光伏支架掀起“跟踪热潮” [N]. 中国能源报, 2024-07-08(011).
- [8] GB50057-2010《建筑物防雷设计规范》[S]. 2010.
- [9] 刘振路. 基于 Vine Copula 多模式集合预报的光伏电站中长期发电量评估研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.
- [10] 陈忠杉, 徐盛儿, 陈锦韬. 基于运行能耗和投资回收期优化的夏热冬冷地区高层住宅外墙研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54(24):2974-2977.

作者简介：

连麒飞 (1994—)，男，河南鹤壁市人，硕士，毕业于郑州大学动力工程专业，工程师，从事光伏场站发电量提升、智慧光伏建设、组件清洁技术研究工作。