文章编号：1008－8857(2021)04－0201－06　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2021.04.003

家用并网光伏系统仿真与运行性能计算

张嘉澍，金　满，徐洪涛
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘　要：设计了一个家用并网光伏系统并计算其年发电量以研究其运行性能。在设定指定地点地理位置并导入气象数据，并根据屋顶可用面积决定光伏阵列的排布和逆变器参数后，利用 PVsyst 软件对光伏系统进行模拟，并计算发电量。结果表明：所设计的光伏系统年发电量约为 7 114 kW·h，发电效率为 75.1%。结合调查数据发现，该光伏系统发电量超过了当地用户年平均用电量；光伏系统一年中日输出电量的变化趋势显示，光伏系统发电量高峰时的日发电量均值可达 35 kW·h 以上；而光伏系统发电量低谷时的日发电量均值不足 20 kW·h；光伏系统各项损失在理论发电量中的占比变化趋势显示，每年 6、7、8 月系统的光伏阵列损失最大，其原因是夏季气温升高使得光伏阵列运行性能受到影响。该光伏系统发电量可以满足一般家庭的用电需求，且用户可以参考光伏系统发电量的变化趋势选择合理的用电方式。

关键词：光伏系统；PVsyst 软件；家用；并网
中图分类号：TK519　　**文献标志码**：A

Simulation and calculation of the operation performance of adomestic grid-connected photovoltaic system

ZHANG Jiashu，JIN Man，XU Hongtao
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A household grid-connected photovoltaic (PV) system was designed, and its annual power generation was calculated to evaluate its operation performance. Initially, the parameters of PV arrays and inverters were selected by the available area on the roof. And then the software PVsyst was used to simulate and calculate the power generation of the designed system at setting location with the associated meteorological data. The results indicated that the annual power generation of this system was 7 114 kW·h, and the operation efficiency was 75%. Combining with the survey data, the power generation of this system exceeded the average annual power consumption of the households in local area. The daily power output of the PV system indicated that average daily power generation of the system maximized at 35 kW·h, while average daily

收稿日期：2019－07－11
第一作者：张嘉澍(1997—)，男，本科。研究方向：动力机械及光伏系统。E-mail：1219351037@qq.com
通信作者：徐洪涛(1976—)，男，博士，副教授。研究方向：工程热物理及光伏系统。E-mail：htxu@usst.edu.cn

power generation could minimize at 20 kW·h. The fraction of available power generation of this system indicated that the greatest power loss of PV arrays was achieved in June, July, and August due to the influence of high temperature in summer on their performance. In a word, the designed system could meet the demand of electricity consumption in a normal household, and the users could choose the power supply according to the power generation of the PV system.

Keywords: photovoltaic system; PVsyst software; household; grid-connection

近年来，随着能源需求的持续增长、全球气候的日益恶化，人们开始寻求“绿色”可再生能源。而太阳能因其清洁环保、可再生性、安全可靠的特点，在可再生能源中扮演着重要角色，光伏发电成为继水力和风力发电之后的第三大可再生能源发电技术，在节能减排中发挥着重要作用[1–2]。近年来，我国光伏产业发展迅速，2017 年全国光伏发电量达 1 182 亿 kW·h，对比 2016 年增长了 78.6%[3]。在我国光伏装机容量迅速增加的同时，光伏电站并网的速度却跟不上装机容量的发展[4]。鼓励家庭安装并网光伏系统成为了一种解决方案，但目前由于组装光伏系统对于普通家庭来说成本较高，因此评估一个家用光伏系统的发电量及运行效率等实际性能对于家庭是否适合安装光伏系统至关重要。利用传统方式进行计算不仅公式繁琐，计算量庞大，且难以实现发电量的精确计算，因此需要利用专业的计算机软件。PVsyst 软件是光伏系统设计的专业软件，包括广泛的气象数据库、光伏系统组件数据库，以及一般的太阳能工具等[5]。该软件可以大大减少使用者的工作量，并得到更为直观、精确的结果。因此，为评估在普通家庭安装并使用光伏系统的可行性，并为用户如何合理利用该系统提供参考，本文以上海虹桥地区某独栋楼房为研究对象，设计并建立了一个家用并网光伏系统的模型，并利用 PVsyst 软件对该系统模型进行仿真以及运行性能的计算。

1 并网光伏系统简介

并网光伏系统简图如图 1 所示。太阳能并网光伏系统主要的工作特点是，由光伏阵列产生的直流电经并网逆变器转换成符合电网要求的交流电之后直接进入公共电网。光伏阵列所产生的电力除了供给交流负载外，多余的电力可反馈给电网[6]。并网光伏发电系统由太阳能光伏阵列将光能转变成电能，之后直流电进入并网逆变器，有的并网光伏发电系统中会选择加入储能装置如蓄电池组。

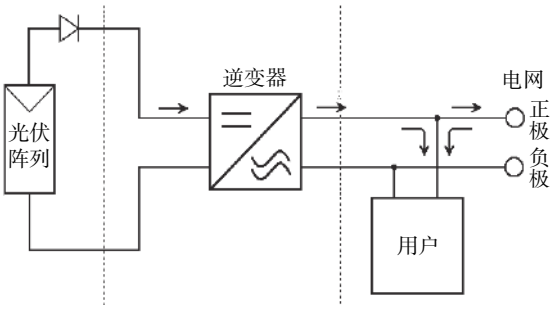

图 1 并网光伏系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of grid-connected photovoltaic system

为简化计算，本文研究的系统中不设置储能设备。光伏系统中的并网逆变器由交流逆变、功率调节、充放电控制、并网保护切换等构成。经逆变器输出的交流电供用户使用，过多的电能通过电力变压器等设备送入电网（称为卖电），而当并网光伏系统能量不足时，则电网将向交流负载供电（称为买电），以此构成完善的并网光伏系统[7]。本设计为尽可能减少阴影遮挡，选择在屋顶布置光伏阵列。由于住户屋顶面积的限制，只靠光伏阵列的发电量可能无法支持整户用电量的需求，因此选择并网系统，在阴雨天或夜晚等发电量不足以满足用户需求的情况下，用户的日常用电仍可依靠电网。

2　家用并网光伏系统设计

2.1　PVsyst 软件中地址气象数据的导入

本设计中地址选择的是上海虹桥，并利用 PVsyst 软件自带的 Meteonorm7.2 数据库中的气象数据。该数据库包含从 1991—2010 年近二十年间的气象数据。上海虹桥气象数据如表 1 所示。由表 1 中可以得到，上海虹桥一年中各月的总辐射量总和为 1 274.5 kW·h·m^{-2}，一年中各月的散射量总和为 822.4 kW·h·m^{-2}，各月平均温度为 17.4 ℃，各月平均风速为 3.5 m·s^{-1}。

表 1　上海虹桥气象数据

Tab. 1　Meteorological data at Hongqiao, Shanghai

月份	总辐射量/（kW·h·m^{-2}）	散射量/（kW·h·m^{-2}）	温度/℃	风速/（m·s^{-1}）
1月	68.4	40.7	4.8	3.4
2月	75.6	52.3	7.4	3.4
3月	95.5	64.3	11.3	3.8
4月	127.5	83.7	16.5	3.8
5月	141.6	92.1	21.6	3.8
6月	124.0	91.9	25.0	3.4
7月	147.4	92.7	29.3	3.6
8月	138.1	87.9	28.5	3.8
9月	118.7	67.1	24.6	3.6
10月	100.1	59.1	20.1	3.2
11月	74.8	49.0	13.0	3.0
12月	62.8	41.6	7.1	3.2

2.2　房屋模型与光伏场区域

本设计中房屋长 1 200 cm，宽 800 cm，高 500 cm（不包括屋顶高度），屋顶倾角为 30°，光伏场区域总面积为 54 m^2。房屋模型及光伏场区域如图 2 所示。

2.3　光伏组件的选取

光伏组件（电池阵列）是发电的核心元件，其作用是将太阳的辐射能转化为电能，供家庭用电使用，或输送到蓄电池中[8]。本设计中选择 Risen Energy 公司型号为 SYP190S−M 的单晶硅光伏组件，在光伏场区域共可搭建 6 组，每组 7 个光伏组件，所占面积为 54 m^2。光伏组件发电的功率计算式为[9]

$$P = N_s N_p P_{max} \tag{1}$$

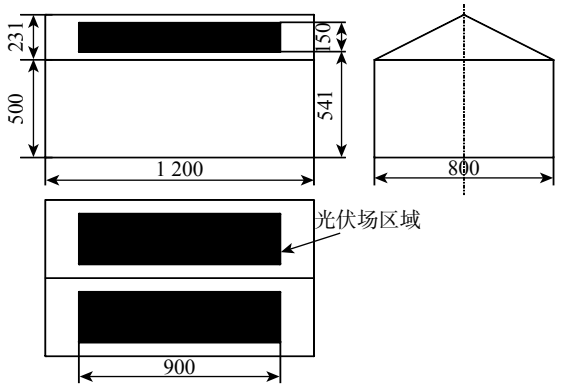

图 2　房屋模型及光伏场区域（单位：cm）

Fig. 2　House model and PV zone

式中：P 为光伏组件发电功率；N_s 为光伏组件的串数；N_p 为每串中光伏组件的个数；P_{max} 为单个光伏组件的最大功率。

经计算，本设计中光伏组件的发电功率 P 为 8 kW。

2.4　逆变器的选取

太阳能光伏系统由于受外部环境条件影响，其发电具有间歇性与波动性等不确定性的特点。因此光伏系统在接入输配电网前，必须经过逆变器严格的参数控制，才能保证系统的安全稳定运行。逆变器是一种将直流电变换成交流电的电能转换设备[8]。

逆变器的功率容量计算式为[9]

$$C_n = K_m L P \tag{2}$$

式中：C_n 为逆变器功率容量；K_m 为安全系数，L 为考虑感性或容性负载启动引起冲击电流而附加的因子。

光伏发电系统的相关研究数据显示[8]，一般情况下，K_m 取 1.2，L 取 1.2，P 取由式（1）计算到得到的值 8 kW。经计算，本设计中逆变器的功率容量 C_n 为 11.5 kW。

综合考虑逆变器的电压适用范围，选用 2 个 5 kW 的逆变器，每侧屋顶各分配一个。逆变器型号为 SG5KTL−D，由 Sungrow 生产，电压适用范围为 125～560 V。

2.5　软件模型简介

利用 PVsyst 软件计算发电量时，需要计算倾斜面上的太阳辐射总量。对此选用的是 Hay 模型。该模型是计算太阳辐射的经典模型。根

据 Hay 模型，倾斜面上的太阳辐射总量 H_T 由直接辐射量 H_{bT}、天空散射辐射量 H_{dT}、地面反射辐射量 H_{rT} 三部分组成，即

$$H_T = H_{bT} + H_{dT} + H_{rT} \quad (3)$$

$$H_{bT} = H_b R_b \quad (4)$$

式中：R_b 为辐射因子；H_b 为水平面上直接辐射量。

对于朝向赤道的倾斜面，R_b 由式(5)确定，即

$$R_b = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos\delta\sin\omega_{st} + \omega_{st}\sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \omega_s\sin\phi\sin\delta} \quad (5)$$

式中：ϕ、β、δ 分别为当地的纬度、太阳能电池的倾角、太阳的赤纬角；ω_s、ω_{st} 分别为水平面上的日落时角、倾斜面上的日落时角。

太阳的赤纬角

$$\delta = 23.45\sin\left[\frac{360(284+n)}{365}\right] \quad (6)$$

式中，n 为一年中从元旦算起至当天的天数。

水平面上日落时角

$$\omega_s = \arccos(-\tan\phi\sin\delta) \quad (7)$$

倾斜面上日落时角

$$\omega_{st} = \min\{\omega_s, \arccos[-\tan(\phi-\beta)\sin\delta]\} \quad (8)$$

天空散射辐射量为

$$H_{dT} = H_d\left[\frac{(H-H_d)R_b}{H_0} + \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\left(1-\frac{H-H_d}{H_0}\right)\right] \quad (9)$$

式中：H_d、H 分别为水平面上散射辐射量、水平面上总辐射量；H_0 为大气层外水平面上辐射量。

$$H_0 = \frac{24}{\pi}I_{sc}\left[1+0.33\cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right](\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \omega_s\sin\phi\sin\delta) \quad (10)$$

式中，I_{sc} 为太阳常数。

地面反射辐射量为

$$H_{rT} = \frac{\rho H(1-\cos\beta)}{2} \quad (11)$$

式中，ρ 为地面反射率，一般情况下 ρ=0.2。

将式(4)、(9)、(11)代入式(3)即可得到倾斜面上太阳辐射总量的表达式，即

$$H_T = H_b R_b + H_d\left[\frac{H_b R_b}{H_0} + \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\left(1-\frac{H_b}{H_0}\right)\right] + \frac{\rho H(1-\cos\beta)}{2} \quad (12)$$

由式(12)并结合当地的水平面太阳直接辐射和散射辐射数据，可计算出各地在不同倾角的倾斜面上的太阳辐射量。将各月太阳辐射量的值求和可得全年总辐射量[10]，进而计算出光伏系统一年的发电量。

基于上述模型，应用 PVsyst 软件可根据设计系统的地理位置、房屋朝向、屋顶倾角以及气象数据库的数据等进行模拟仿真计算。

2.6 运行结果与分析

经过软件的仿真运算，得到初步的运行结果，包括系统发电量及运行效率。

光伏系统中运行效率 P_r 的表达式为

$$P_r = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (13)$$

式中：Y_f 为系统实际输出电量；Y_r 为系统理论输出电量。

软件的初步运行结果为：系统发电量为 7 114 kW·h·a^{-1}；运行效率为 75.1%。

调查数据显示[11]，2005—2014 年近十年间，上海地区每年单位面积用电量平均为 31.1 kW·h·m^{-2}，因此，本设计中房屋(双层)的面积为 192 m^2，其每年的用电量约为 5 971.2 kW·h。可见，本系统发电量在满足一般家庭独栋房屋的用电需求后，仍有富余电量，可以反馈给电网。此外，本设计为并网系统，在阴雨天或夜晚等光伏无法发电的情况下，用户用电仍可依靠电网，不会出现无电可用的情况。因此，本设计中的光伏系统可以实现节约能耗、减轻电网负担的作用。越来越多的家用光伏系统投入使用后，将为国家电能的节约做出贡献。

通过仿真计算可得所设计的系统在一年中每日输出电量变化趋势，结果如图 3 所示。该图反映了一年中各时间段该光伏系统可输出电量的数据，可为用户如何合理利用该光伏系统从而实现家庭用电削峰填谷的作用提供参考。例如，由图 3 中可见，每年 4 月中旬为光伏系统发电量高峰，日发电量均值可达 35 kW·h 以上，足以满足日常用电需求，用户可选择减少依赖电网发电，并可将光伏系统产生的多余电力反馈给电网；而每年 12 月至次年 1 月为光伏发电量的低谷，日发电量均值不足 20 kW·h，且由于家用采暖设备的

使用，可能导致所需电力消耗更大，仅靠光伏系统可能无法维持家庭正常用电，因此家庭用电需求在依靠光伏系统的同时，可更多地依靠电网。

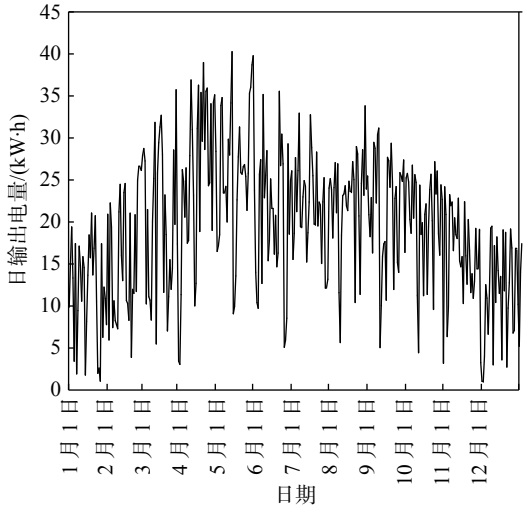

图 3　光伏系统一年中日输出电量

Fig. 3　Daily power output of the PV system

此外，通过模拟计算可得到一年中某天光伏系统发电功率随时间的变化。例如，图 4 为一年中某天(1 月 1 日)光伏系统在各时间段的发电功率，可为用户用电方式提供参考。由图 4 中可见，1 月 1 日在 06:00 之前光伏系统无法输出电能，而在中午 10:00～12:00 之间输出电能达到峰值，发电功率可达 2 500 W 左右，16:00 之后系统又停止发电。以此类推，用户可根据自身需要，参考该图来尽量选择光伏系统发电功率的峰值时间段作为用电高峰时间段，合理利用光伏系统的电能，实现节能减排的目的。

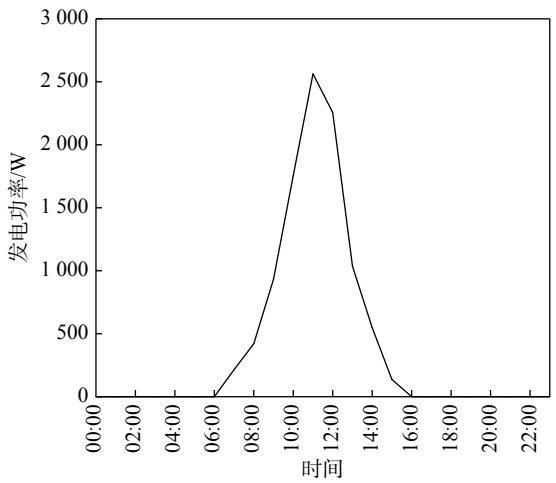

图 4　某天光伏系统发电功率随时间的变化

Fig. 4　Power of the PV system in one day

图 5 为一年中各月份光伏系统产生的有用发电量及各项损失在光伏系统的理论发电量中的占比的变化趋势。可见，每年 6、7、8 月系统的光伏阵列损失较同年其他月份大。其原因是夏日阳光直射导致光伏板温度过高，从而使其效率下降。这也为将来的研究方向提供了启示，即如何解决光伏板在太阳照射下温度过高的问题。

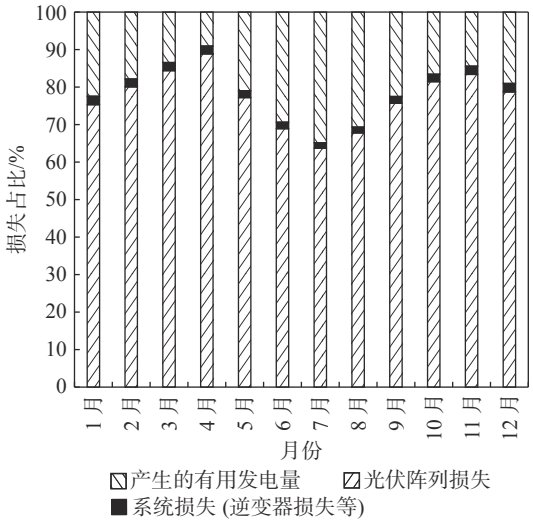

图 5　光伏系统产生的有用发电量及各项损失占比

Fig. 5　Fraction of usable power generation and loss of the PV system

3　结　论

本文利用商业软件 PVsyst，对所设计的上海虹桥地区某独栋楼房的家用并网光伏系统的运行性能进行了模拟计算。结果表明：

(1)本设计中的光伏系统年发电量为 7 114 kW·h，超过当地用户每年平均家庭用电量，因此可以满足一般家庭的用电需求。

(2)光伏系统一年中日输出电量的变化趋势表明，每年 4 月中旬为光伏系统发电量高峰，日发电量均值可达 35 kW·h 以上；而每年 12 月至次年 1 月为光伏系统发电量低谷，日发电量均值不足 20 kW·h。结合一年中某天光伏系统发电功率的变化趋势，可为用户合理用电提供参考。

（3）光伏系统产生的有用发电量及各项损失占比的变化趋势表明，每年 6、7、8 月系统中光伏阵列损失最大，其原因是夏日阳光直射导致光伏阵列温度升高，从而引起效率下降。

参考文献：

[1] 颜苏莉, 孙婧豪. 我国光伏产业的发展现状、存在问题及解决之道 [J]. 华北电力大学学报: 社会科学版, 2016(1): 9 – 12.

[2] 翁琳, 陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析 [J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 282 – 288.

[3] 王金朝. 我国光伏发电产业的发展现状研究 [J]. 技术与市场, 2018, 25(8): 172.

[4] 李雷, 杨春. 我国光伏产业现状与可持续发展策略研究 [J]. 中外能源, 2012, 17(4): 28 – 37.

[5] 黄旭峰. PVsyst 软件在光伏系统中的应用分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2019(5): 326 – 329.

[6] 袁晓, 赵敏荣, 胡希杰, 等. 太阳能光伏发电并网技术的应用 [J]. 上海电力, 2006, 19(4): 342 – 347.

[7] 黄鹤然, 丁浩, TRUCKENMUELLER F. 家用分布式光伏并网发电系统的设计与研究 [J]. 机械设计与制造, 2017(4): 206 – 209.

[8] 旦望云. 家用太阳能光伏发电并网技术研究 [J]. 电子制作, 2018(24): 14 – 15, 82.

[9] 林琳. 大连地区家用光伏发电系统研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

[10] 顾超, 崔容强. 独立光伏系统最佳倾角计算新方法 [J]. 电源技术, 2005, 29(1): 31 – 34.

[11] 杨霞. 上海地区居住建筑能耗调研分析 [J]. 住宅科技, 2016, 36(9): 58 – 61.

(上接第 192 页)

[3] 陈曦, 张华, 吴亦农, 等. 200 K/40 W 自由活塞斯特林制冷机的实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(4): 337 – 344.

[4] BRADSHAW C R, GROLL E A, GARIMELLA S V. A comprehensive model of a miniature-scale linear compressor for electronics cooling[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 63 – 73.

[5] 毕研强, 徐向华, 梁新刚. 动磁式直线压缩机对制冷量与 COP 影响分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(7): 884 – 890.

[6] OLIVEIRA M J, DINIZ M C, DESCHAMPS C J. Thermal modelling and analysis of an oil-free linear compressor[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Compressors and their Systems. London, UK: IOP, 2015: 012016.

[7] 唐明生, 邹慧明, 王敏, 等. 动力学参数在直线压缩机故障诊断中的应用 [J]. 压缩机技术, 2019(3): 21 – 25, 32.

[8] 谢洁飞, 金涛, 童水光. 直线压缩机的研究现状与发展趋势 [J]. 流体机械, 2004, 32(12): 31 – 35.

[9] 雷美珍, 王立强, 夏永明. 动磁式双定子直线压缩机动态特性仿真研究 [J]. 低温与超导, 2018, 46(1): 7 – 11, 35.

[10] 张博. 基于动磁式直线振荡电机的直线缩机技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[11] 邓伟峰. 大功率动磁式线性压缩机关键技术与实验研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院 (上海技术物理研究所), 2016.

[12] 谢洁飞. 动磁式直线压缩机理论与试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[13] 崔丽娜. 直线压缩机控制系统的开发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.