

# Analysis on Investment Benefit of Roof and Grid Photovoltaic Power Generation System of Villa

Xingang Zhao, Jie Chen

School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing  
Email: 13263458663@163.com

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2017; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

PV building integration is one of the effective means to solve the high energy consumption of China's building, but it is not popular in the residential building of our country. The core problem is that the investment benefit of PV project is not high. Therefore, this paper takes the villa users as the research object, and studies the investment benefit of the roof grid-connected PV system under different influence on the Internet mode, electricity consumption and subsidy policy. It is suggested that the government implements different subsidy policies based on electricity consumption, gradually cancels cross subsidies and carries out the peak-valley time-of-use tariff policy.

## Keywords

BAPV, Investment Benefit, Peak-Valley Time-of-Use Tariff

---

# 别墅屋顶并网光伏发电系统投资效益分析

赵新刚, 陈杰

华北电力大学经济与管理学院, 北京  
Email: 13263458663@163.com

收稿日期: 2017年10月29日; 录用日期: 2017年11月12日; 发布日期: 2017年11月20日

---

## 摘要

光伏建筑一体化是解决我国建筑高能耗的有效手段之一,但是在我国的居民建筑中并未普及,其核心问题就是光伏项目的投资效益不高。因此本文以别墅用户为研究对象,研究其屋顶并网光伏发电系统在不

同的上网模式、用电量以及补贴政策等影响下的投资效益, 建议政府根据用电量实行不同的补贴政策, 逐渐取消交叉补贴, 实行峰谷分时电价政策。

## 关键词

BAPV, 投资效益, 峰谷分时电价

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

世界能源消耗基本分布在三大领域, 一是工业能耗, 二是交通能耗, 三是建筑能耗。建筑节能是节能减排的重要领域之一, 因此各个国家都在制定建筑零能耗的发展目标。长期以来, 我国建筑节能的观念较为淡薄, 据统计, 我国现有建筑的 99% 以上都属于高能耗建筑[1], 因此减少建筑能耗显得尤为迫切。我国太阳能资源丰富, 将光伏发电巧妙地融入到建筑中, 不仅为光伏技术开辟了新的应用领域, 而且可以真正地减少建筑能耗, 达到建筑节能的目的。

光伏建筑的经济效益是决定其发展状况的重要因素。在有关光伏建筑的经济性方面, 国内学者张鸣、蔡亮、虞维平以南京浦口区一栋商用楼楼顶为研究对象, 计算出动态平直供电成本为 3.49 元/千瓦时, 已经远远超过南京市居民用电价格, 认为光伏发电成本过高是制约发展 BIPV (Building Integrated PV) 系统的主要原因, 建议通过完善光伏产业链和发展光伏技术来降低成本[2]; 吕双辉, 蔡声霞, 王守相研究天津市不同负荷类型用户所适合的光伏应用方式, 以及不同的电价模式对用户经济性的影响, 通过计算净收益和成本利润率, 得出储能成本对用户经济性影响较大, 建议政府制定适当的储能补贴政策[3]; 邵汉桥, 张籍, 张维选取全国 6 个地区的居民和工商业光伏发电进行经济性分析, 通过对不同地区的太阳能资源、内部收益率、年发电量等进行对比分析和敏感性分析, 发现不同地区太阳能年辐射量和年日照时间影响光伏系统的内部收益率和静态投资回收期, 已经出台地方补贴政策的地区, 光伏系统经济性要更好, 建议各省市尽快完善地方补贴政策[4]。

国外学者 Lim Yun Seng, G.Lalchand, Gladys Mak Sow Lin 对马来西亚光伏建筑进行经济、技术和环境分析, 认为在现有商业模式和监管制度下, 政府的高补贴政策对于光伏系统的经济性影响很小。另外, 硅原料的缺失和空气污染物导致太阳辐射的减少也是马来西亚光伏行业面临的挑战[5]; Jose L. Bernal-Agustin, Rodolfo Dufo-Lopez 以西班牙并网型光伏系统为研究对象, 利用净现值和投资回收期评价其经济性, 资源可再生的时间成本、污染物的减排量和外部成本评价其环境效益, 认为光伏建筑虽然有利可图, 但是投资效益并不明显, 建议利用光伏产生的环境效益奖励光伏系统的所有者[6]; Hongbo Ren, Weijun Gao, Yingjun Ruan 针对住宅并网型光伏系统进行经济优化和敏感性分析, 利用线性规划模型, 规划如何使得客户的年度能源成本最低, 并对不同条件的典型住宅进行平均成本和投资回收期敏感性分析, 得出资本成本对光伏容量和投资回收期影响较大, 平均成本主要受资本成本、光伏系统效率和利率影响的结论[7]。

别墅建筑具有可安装光伏系统面积大、产权明确等优点, 同时也具有建筑能耗大等缺点, 因此本文将针对别墅用户的特点, 分析不同因素对其并网屋顶光伏发电系统投资效益的影响, 为推广我国别墅用

户光伏系统的发展提出建议。

## 2. 别墅用户光伏建筑投资效益分析模型

### 2.1. 成本分析

由于 BIPV 光伏建筑设计、施工情况比较复杂, BIPV 成本与工程总承包商、关键设备供应商以及装机容量等有直接关系, 因此只有确定了具体的项目之后, 才能够根据实际情况对 BIPV 项目的发电成本进行核算。而 BAPV (Building Attached PV) 安装方式简单, 影响成本的不确定因素较少, 投资效益分析的结果更具有借鉴价值, 因此本文主要考虑别墅在 BAPV 系统时的情况, 其成本主要考虑以下三部分:

- 1) 初始投资成本, 即太阳能电池组件、支架、逆变器、电缆以及系统安装成本等的总和;
- 2) 经常性运营成本, 即光伏发电系统的定期清洁维护成本, 与系统的装机规模有关, 一般为 50 元/(KW·年) [4];
- 3) 财务费用, 主要是借款的利息费用, 采取分期偿还、等额本息的方式还款, 可以用下式表示:

$$C_n = C_0 X_1 R$$

式中,  $C_i$ : 第  $i$  年的财务费用;  $C_0$ : 初始投资成本;  $X_1$ : 贷款比例;  $R$ : 贷款利率;  $i$ : 还款年限, 取  $1, 2, \dots, M$  ( $M$  为还款期限)。

### 2.2. 收益分析

别墅的业主一般有经济实力自建光伏发电系统, 在这种情况下, 业主是屋顶的使用者和光伏初始投资者, 拥有光伏发电系统所有权和所发电量收益权, 可以选择不同售电方式:

- 1) 全额上网

$$I_d^n = E_d^n P_{C1}$$

式中,  $I_d^n$ : 光伏发电系统第  $n$  年第  $d$  日收益;  $E_d^n$ : 光伏发电系统第  $n$  年第  $d$  日发电量;  $P_{C1}$ : 国家规定的光伏电站上网标杆电价;  $n$ : 系统运行年限, 取  $1, 2, \dots, N$  ( $N$  为系统运行年限, 一般为 25 年)。

- 2) 自发自用, 余电上网

这种模式下, 业主的收益包括政府补贴、卖电所得以及电费的减少。其中, 由于现在实行居民阶梯电价, 所以下式的  $P_{C3}$  可能不一定都相同。

- 1) 日发电量大于白天用电量时, 业主收益:

$$I_d^n = E_d^n (G_{p1} + G_{p2}) + (E_d^n - Q_d^n X_3) P_{C2} + Q_d^n P_{C3} - Q_d^n (1 - X_3) P_{C3}$$

式中,  $G_{p1}$ : 国家补贴;  $G_{p2}$ : 地方补贴;  $Q_d^n$ : 别墅用户第  $n$  年第  $d$  日用电量;  $X_3$ : 典型别墅白天用电量占全天用电量的比例;  $P_{C2}$ : 当地燃煤机组标杆上网电价;  $P_{C3}$ : 用户目录电价。

- 2) 日发电量小于白天用电量时, 业主收益:

$$I_d^n = E_d^n (G_{p1} + G_{p2}) + Q_d^n P_{C3} - (Q_d^n - E_d^n) P_{C3}$$

### 2.3. 光伏建筑投资效益评估模型

#### 2.3.1. 平准化度电成本

平准化度电成本(简称 LCOE), 是对项目生命周期内的成本和发电量进行平准化后计算得到的发电成本, 能够使人清晰地看到光伏项目单位发电量的成本水平, 可以用下式表示:

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{(1+i_0)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+i_0)^n}}$$

式中,  $LCOE$ : 平准化度电成本;  $I_n$ : 第  $n$  年的运营总支出;  $i_0$ : 基准折现率。

### 2.3.2. 净现值

净现值指标是按一定的折现率将各年净现金流量折现到同一时点(通常是期初)的现值累加值, 可以用下式表示:

$$NPV = \sum_{n=0}^N (CI - CO)_n (1+i_0)^{-n}$$

式中,  $NPV$ : 净现值;  $CI_n$ : 第  $n$  年的现金流入额;  $CO_n$ : 第  $n$  年的现金流出额。

判别标准:

- 1) 若  $NPV \geq 0$ , 则项目应予接受;
- 2) 若  $NPV < 0$ , 则项目应拒绝。

### 2.3.3. 内部收益率

内部收益率是净现值为零时的折现率, 是反映资金利用效率的效率型指标, 可以用下式表示:

$$NPV(IRR) = \sum_{n=0}^N (CI - CO)_n (1+IRR)^{-n} = 0$$

式中,  $IRR$ : 内部收益率

判别标准:

- 1) 若  $IRR \geq i_0$ , 则项目在经济效果上可以接受;
- 2) 若  $IRR < i_0$ , 则项目在经济效果上不可接受。

### 2.3.4. 投资回收期

投资回收期是从项目投建之日起, 用项目各年的净收入将全部投资收回所需的期限, 可以用下式表示:

$$\sum_{n=0}^{T_p} (CI_n - CO_n) = K$$

式中,  $T_p$ : 投资回收期;  $K$ : 投资总额。

### 2.3.5. 净现值指数

净现值指数作为净现值的辅助指标, 反映了资金的利用效率, 即单位投资现值所能带来的净利润现值, 可以用下式表示:

$$NPVI = \frac{\sum_{n=0}^N (CI - CO)_n (1+i_0)^{-n}}{\sum_{n=0}^N K_n (1+i_0)^{-n}}$$

式中,  $NPVI$ : 净现值指标;  $K_n$ : 第  $n$  年的投资总额。

对于投资成本相同, 但是收益不同的项目,  $NPVI$  越大, 资金的利用效率越高。

### 3. 别墅案例分析

#### 3.1. 案例项目简介

上海闵行区的一栋别墅, 位于北纬 31.12°, 东经 121.24°, 屋顶上安装了装机容量为 2992 W<sub>p</sub> 的光伏发电系统, 由 22 块多晶硅光伏组件制成, 总面积 22 平方米, 朝南倾斜 25°, 周围没有建筑物遮挡。本项目以 25 年为经济分析周期。

#### 3.2. 项目的成本分析

- 1) 初始投资成本 12748.92 元/KW, 即总初始投资成本为 38144.76 元;
- 2) 经常性运营成本为 149.6 元/年。

#### 3.3. 项目的发电量分析

上海闵行区的太阳能全年辐射量为 1283.47 kWh/m<sup>2</sup>, 系统效率取 78%, 则别墅 25 年的发电量见表 1。

#### 3.4. 项目的用电量分析

建筑面积为 350 m<sup>2</sup>, 居住人口 4~6 人的别墅, 在考虑电器使用时间以及上海的气温等具体情况下, 得出上海别墅的年逐时耗电量总和为 36502.7 KWh [8], 则每日用电量为 100.01 KWh。

#### 3.5. 项目的投资效益分析

国家补贴和上网电价均需缴纳增值税, 一般取 17%; 基准折现率取 6.8%。

##### 1) “全额上网”模式

上海属于第Ⅲ类资源区, 光伏上网标杆电价为 0.85 元/千瓦时(含税), 则案例项目的投资效益见表 2。

“全额上网”方式下, 项目的净现值小于 0, 资金的利用率比较低, 因此项目不可行, 本项目的平准化度电成本为 1.16 元/KWh, 而光伏上网标杆电价为 0.85 元/KWh, 小于成本, 所以“全额上网”的经济效益并不理想。

##### 2) “自发自用, 余电上网”模式

由于日发电量远小于日用电量, 故“自发自用, 余电上网”模式下所发电量全部自用。上海市对个人投资的光伏项目, 给予 0.4 元/千瓦时的奖励, 奖励时间为 5 年, 且单个项目年度奖励金额不超过 5000 万元, 则案例项目的投资效益见表 3。

“自发自用, 余电上网”模式下净现值大于 0, 项目可行, 资金的利用效率比较高, 投资回收期也比较合理。

##### ① 不同地方补贴

目前我国大部分地区没有地方补贴, 而不同地区地方补贴的金额和期限也不尽相同, 例如同样为省级补贴, 北京市为 0.3 元/千瓦时(含税), 补贴 5 年; 江西省为 0.2 元/千瓦时(含税), 补贴 20 年; 河北省为 0.2 元/千瓦时(含税), 补贴 3 年; 吉林省为 0.15 元/千瓦时(含税); 浙江省为 0.1 元/千瓦时(含税)。为探究地方补贴的变化对案例项目经济性的影响, 本文以净现值为敏感性分析的指标, 以现有地方补贴为基点, 比较不同变动幅度对项目的投资效益的影响, 结果见表 4。

从表可以看出, 地方补贴对于项目净现值的影响不大, 即使全部取消, 项目仍具有可行性。这是由于别墅用电量比较大, 即使减去光伏发电量, 购电量仍处于阶梯电价的第三档, 相当于电力公司按照 0.917 元/KWh 购买光伏电量, 因此节省的电费收益更明显。

##### ② 不同用电量

**Table 1.** 25 years power generation of villa, KWh  
**表 1.** 别墅 25 年发电量, KWh

年份	年发电量
1	3151.11
2	3119.60
3	3088.09
4	3056.58
5	3025.07
6	2993.56
7	2962.05
8	2930.53
9	2899.02
10	2867.51
11	2836.00
12	2814.98
13	2793.97
14	2772.95
15	2751.93
16	2730.91
17	2709.89
18	2688.88
19	2667.86
20	2646.84
21	2625.82
22	2604.80
23	2583.79
24	2562.77
25	2541.75

资料来源: PV trade 光伏交易网。

**Table 2.** The investment efficiency of case project under full internet mode  
**表 2.** 全额上网模式下案例项目的投资效益

指标	全额上网
净现值, 元	-14913.24
内部收益率, %	1.83
投资回收期, 年	19.64
净现值指数, %	58.20

不同用电量的别墅用户在光伏系统安装前后,若购电都处于第三档,则投资效益都与上述情况相同;若别墅用户每年的用电量处于阶梯电价第三档,每年的用电量减去光伏发电量后处于阶梯电价第二档,即用户年用电量在 6272.11 KWh~7041.75 KWh 区间上时,项目的投资效益见表 5。

由上表可知,当安装光伏系统前后购电量处于不同档位时,年用电量越高的用户,光伏系统所带来的收益就越多,项目的经济性就越好;同时,安装光伏系统前后购电量都处于第三档的用户,比不同档的用户经济效益要高。阶梯电价有利于光伏建筑的推广,而且目前第二档用户是可行的。

### ③ 峰谷阶梯电价

目前上海市实行了峰谷阶梯电价政策,高峰时段为 6 时~22 时,低谷时段为 22 时~次日 6 时。本项目的峰时段耗电量总和为 26,465.8 kWh,谷时段耗电量总和为 10,036.9 kWh [8]。在不考虑光伏系统的情况下,按峰谷阶梯电价计算,别墅用户需每年交纳 29,340.94 元的电费;按阶梯电价计算,别墅用户需每年交纳 32,116.98 元的电费,可以看出峰谷阶梯更节约电费。

当别墅用户采取峰谷阶梯电价时,光伏发电系统所发电量抵消高峰时段的耗电量,则投资效益见表 6。

由表可以看出,在实行峰谷阶梯电价时,安装光伏系统带来的效益要比阶梯电价时更高。因此,建议别墅用户采取峰谷阶梯电价的电费结算方式,这样既能节约电费,又能提高光伏系统的投资效益。

### ④ 售电侧开放

国务院于 2015 年 3 月 15 日颁布了《进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9 号),标志着新一轮电力市场改革正式开始。其中促进售电侧开放,逐步取消交叉补贴是我国新电改的重要目标之一。目前,我国电价存在的交叉补贴形式包括工商业用户长期补贴居民用户、城市用户补贴农村用户等。

**Table 3.** The investment benefit of case project under self-use mode  
**表 3.** 自发自用,余电上网模式下案例项目的投资效益

指标	自发自用,余电上网
净现值,元	8358.33
内部收益率,%	9.42
投资回收期,年	8.85
净现值指数,%	116.49

**Table 4.** The effect of the decline of local subsidy on net present value in self-use mode, yuan  
**表 4.** 自发自用,余电上网中地方补贴的下降对净现值的影响,元

变动率	-100%	-80%	-60%	-40%	-20%	0%
净现值	4000.405	4871.99	5743.576	6615.161	7486.746	8358.331

**Table 5.** Benefit of project investment under different electricity consumption  
**表 5.** 不同档位的用电量下项目投资效益

指标	年用电量为 6272.11 KWh	年用电量为 7041.75 KWh
净现值,元	4120.29	6403.55
内部收益率,%	8.11	8.81
投资回收期,年	9.94	9.37
净现值指数,%	105.87	111.59

**Table 6.** Investment benefit of project under the system of peak and valley  
**表 6.** 峰谷阶梯制度下项目的投资效益

指标	自发自用, 余电上网
净现值, 元	10,186.90
内部收益率, %	9.96
投资回收期, 年	8.47
净现值指数, %	121.07

**Table 7.** Investment benefit of different residents' electricity price  
**表 7.** 不同居民电价下的投资效益

指标	10%	20%	30%	40%
净现值, 元	11,514.74	14,671.16	17,827.57	20,983.98
内部收益率, %	10.36	11.27	12.17	13.06
投资回收期, 年	8.21	7.65	7.17	6.74
净现值指数, %	124.40	132.30	140.21	148.12

我国居民用电普遍低于合理水平 30% 以上, 若取消交叉补贴, 居民电价势必上涨, 对光伏系统的经济效益也会产生一定影响。假设居民电价上涨 10%、20%、30% 和 40% 情况下, 项目的投资效益见表 7。

由表可见, 当售电侧开放取消交叉补贴后, 随着居民电价的提高, 光伏系统的投资效益会越来越好, 投资回收期会缩短到 7 年左右。这样, 光伏发电系统对居民用户更具有吸引力, 有利于民用光伏建筑的推广。另外, 居民电价的上涨会缩小光伏电价和市电的价差, 再加上技术进步会降低光伏组件的成本以及提高光伏电池发电效率, 最终能够实现光伏的平价上网, 即光伏发电在没有补贴的支持下, 也可以直接和市电竞争。

#### 4. 政策建议

通过上述实证分析可以看出, 别墅用户光伏系统的投资效益与居民的用电特点以及政府的补贴政策等息息相关。根据上述分析, 对于如何促进我国别墅建筑光伏应用的发展, 提出以下几点建议:

##### 1) 尽早解决交叉补贴问题

长期以来, 工商业用户都在补贴居民用户, 居民电价始终处于较低水平, 容易造成浪费用电的习惯, 不利于资源节约和环境保护。因此政府应尽快解决电价交叉补贴问题, 这样既能避免价格信号的扭曲, 又能促进居民建筑光伏应用。

##### 2) 推广峰谷阶梯电价

居民阶梯电价主要是鼓励电力用户节约用电, 峰谷分时电价主要是鼓励电力用户在高峰时少用电, 在低谷时多用电, 削峰填谷, 提升电力系统运行效率。峰谷阶梯电价将两者结合起来, 在鼓励节约用电的同时起到减少系统峰谷差的作用, 而且峰谷阶梯电价比阶梯电价更能提高居民建筑光伏系统的投资效益。

##### 3) 鼓励别墅等有条件的用户率先安装光伏

别墅用户具有经济实力强, 屋顶可利用面积大, 安装方便等特点, 因此政府应该鼓励此类用户率先安装光伏, 简化此类用户并网申请、验收和调试等流程, 免费为其向政府能源主管部门备案、提供可再生能源补助等。

## 5. 结论与展望

光伏建筑是利用太阳能发电解决建筑耗能的一种新形式,如果把太阳能光伏发电在城市建筑中推广,可有效地减少城市建筑物的常规能源消耗。我国除供暖外的住宅用电能耗约占我国建筑总能耗的 20%,利用光伏发电解决居民的用电问题将有效减少常规能源的使用和环境污染。但是我国居民建筑光伏利用并不广泛,其核心原因在于我国光伏建筑的收益不明显。

本文以上海别墅为例,分析了其在不同上网模式、用电量等影响下的投资效益,发现对于别墅,“全额上网”模式在现行政策下不可行,应优先选用“自发自用,余电上网”模式。在“自发自用,余电上网”模式中,当安装光伏系统前后购电量处于不同档位时,年用电量越高的用户,光伏系统所带来的收益就越多;同时,安装光伏系统前后购电量都处于第三档的用户,比不同档的用户经济效益要高。因此,政府应该根据不同用电量,对用户实行不同的补贴政策。如果用户采用峰谷阶梯电价,光伏系统带来的效益要比阶梯电价更高,能够在平衡电网的用电负荷的同时,最大限度地减少资源的浪费。另外,随着交叉补贴的取消,居民电价会有所上涨,也会增加光伏系统的经济性。

本文就上海别墅的光伏发电系统进行了投资效益的研究,但是在“自发自用,余电上网”售电方式下,光伏所发电量全部自用,没有分析在有余电上网的情况下,居民建筑光伏系统的经济效益如何。另外,装机容量、光照条件和光伏建筑的结合形式不同,都可能影响光伏系统的经济性以及政策效果,还需要未来进一步地研究。

## 致 谢

对给予本人顺利完成论文而提供各类帮助、指导,以及协助完成该项研究工作的单位和个人表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] 马文生, 郝斌. 光伏建筑一体化相关问题的探讨[J]. 可再生能源, 2011(29): 94-97.
- [2] 张鸣, 蔡亮, 虞维平. BIPV 系统经济性分析[J]. 应用能源技术, 2007(11): 1-4.
- [3] 吕双辉, 蔡声霞, 王守相. 分布式光伏 - 储能系统的经济性评估及发展建议[J]. 中国电力, 2015(48): 139-144.
- [4] 邵汉桥, 张籍, 张维. 分布式光伏发电经济性 & 政策分析[J]. 电力建设, 2014(35): 51-57.
- [5] Seng, L.Y., Lalchand, G. and Lin, G.M.S. (2008) Economical, Environmental and Technical Analysis of Building Integrated Photovoltaic Systems in Malaysia. *Energy Policy*, **36**, 2130-2142. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.016>
- [6] Bernal-Agustín, J.L. and Dufo-López, R. (2006) Economical and Environmental Analysis of Grid Connected Photovoltaic Systems in Spain. *Renewable Energy*, **31**, 1107-1128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.004>
- [7] Ren, H., Gao, W. and Ruan, Y. (2009) Economic Optimization and Sensitivity Analysis of Photovoltaic System in Residential Buildings. *Renewable Energy*, **34**, 883-889. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.011>
- [8] 沙浩浩, 李永光, 杨天海. 结合别墅用户的分布式风力发电经济性评估[J]. 上海电力, 2009(1): 42-44.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-7924，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jlce@hanspub.org](mailto:jlce@hanspub.org)