

# 小型分布式光伏发电系统设计

韩学栋,王海华,李剑锋  
(江苏省电力设计院,南京市 211102)

**摘要:**国内对于小型分布式光伏电站的开发研究还不成熟,为此提出了一种针对小型分布式光伏发电系统的设计方法。介绍了充放电控制器、逆变器的选择依据及储能电池的设计公式。根据光伏组件的电气特性阐述了其串并联设计公式、光伏电缆选型方法。根据光伏组件的不同布置情况推导出了光伏阵列间距计算公式,确定了光伏组件前后排的布置间距。通过上述方法辅以具体设备参数,实现了整个发电系统的参数化设计。

**关键词:**分布式发电;光伏发电;家用小型分布式发电;储能电池

## Design of Small Distributed Photovoltaic Generation System

HAN Xuedong, WANG Haihua, LI Jianfeng

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

**ABSTRACT:** At present, the research and development of small distributed photovoltaic (PV) power plants is not mature in China. So this paper proposed a centralized design method for small distributed PV generation system. This paper introduced the selection basis of charging controller and inverter, as well as the design formulas of energy storage battery; described the series-parallel design formula of PV module and the selection method of PV cable according to the electrical characteristics of PV modules; deduced the formula of PV array spacing according to the different layout of PV modules, and determined the layout spacing between each row. Finally, the parametric design of the entire power system was achieved based on the above methods and the specific device parameters.

**KEYWORDS:** distributed generation; photovoltaic generation; household small distributed generation; energy storage battery

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2014)01-0104-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2014.01.020

## 0 引言

2013年初,我国出现大范围的雾霾天气,对环境以及人体造成诸多损害,而大力发展绿色、无污染的可再生能源是人类可持续发展的必由之路。太阳能光伏发电是一种新型的可再生能源发电方式,现有针对分布式光伏发电的文献多为国内分布式发电现状的综述和对整个发电系统拓扑结构的介绍,以及太阳能与其他能源的一体化应用<sup>[1-6]</sup>。文献[2-3]介绍了分布式光伏发电的发展趋势以及在国内的应用,但未能提供对该分布式系统实现的支撑。文献[4-6]中介绍了光伏发电系统的设计方法,但在设备选型、组件串并联、组件间距、储能配置等环节未能提出理论的计算方法以及操作实例。我国首个家庭光伏电站于2012年12月在青岛实现并网,装机容量2 kW。国家电网公司于2013年2月发布了《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》,在此背景下,本文提出一

种小型分布式光伏发电系统的设计方法,并对该系统中的各关键问题进行研究分析。

## 1 小型分布式光伏发电系统结构

家用分布式光伏发电系统主要包括太阳能光伏电池组件、并网逆变器、储能电池、用于蓄电池充放电的双向换流器、电能表计等部分<sup>[7]</sup>。光伏发电系统具有诸多优点,如:安装方便、维护少、发电过程中不会排放污染物质等。本文针对一典型的分布式光伏发电系统拓扑结构展开分析和设计,拓扑结构如图1所示。其工作模式为:

(1) 白天通过太阳能光伏电池发电,所发电能首先通过充放电控制器向蓄电池组充电,当电池充满电之后,所发电量上送至公共电网。

(2) 白天用电时将首先选用就地的光伏系统所发电能,在不足以支撑用电负荷时切换到公共电网,从公共电网取电;晚上用电时首先通过充放电控制器

从蓄电池组获取电能,当蓄电池组蓄能不足时从公共电网获取电能。

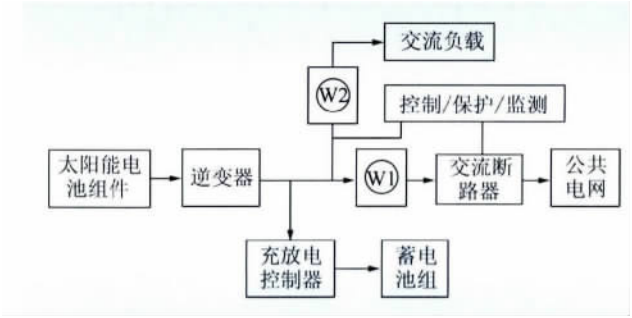


图 1 分布式光伏发电系统拓扑结构  
Fig. 1 Topology structure of distributed PV system

图 1 中: W1 为发电系统与公共电网相连的关口计量表,该表应具备双向计量的功能,一方面用以计量由发电系统输向公共电网的电量  $w_{1a}$ ,另一方面用以计量从电网获取的电量  $w_{1b}$ ; W2 为与就地负载母线相连的计量表,用以计算家用负载的用电量  $w_2$ 。家庭从电网获取的电量为  $w_{1b}$ ,家庭自用的光伏发电量为  $w_2 - w_{1b}$ ,光伏发电系统输入电网的电量为  $w_{1a}$ ,由此即可根据相应的电量计费标准进行电费的结算。

2 电气系统设计

设计太阳能光伏发电系统需根据装机容量以及应用类型选择合适的控制器、光伏组件等,同时,阵列间的距离对电站的输出功率和转换效率有较大的影响,如安装不妥,后排的电池阵列将被前排阵列的阴影遮挡,从而造成组件的热斑效应并影响发电量。因此,还需对光伏组件进行合理的串、并联以及空间布置设计。家用分布式光伏发电系统还应具有储能设备,因此,需要对储能蓄电池以及相应的充放电控制器进行设计选型。

2.1 普通家用电负荷

家庭负荷可概括为:5 个 20 W 节能灯,日均工作 5 h;1 台 150 W 的 29 寸彩电,日均工作 4 h;1 台电功率为 200 W 的电冰箱,日耗电量约为 1 kW·h;1 台 300 W 的洗衣机,日均工作约 0.5 h;2 台 70 W 左右的笔记本电脑,日均工作 3 h;2 台制冷功率约为 1 200 W 的空调,日耗电量每台约为 2 kW·h,1 台制冷功率约为 1 600 W 的空调,日耗电量约为 3 kW·h。

通过以上统计,家庭内的一般用电负荷最大约为 4.9 kW,日最大用电量约为 9.67 kW·h。但考虑到用电设备的同时系数,3 kW 左右的负荷即可满足一般使用,日均用电量 6 kW·h 左右,故本文将以 3 kW 负荷、日均用电量 6 kW·h 作为分布式系统基础

数据。

2.2 充放电控制器选择

充放电控制器,即为双向换流器,即可实现太阳能光伏电池所发出的能量存储到蓄电池,也可实现蓄电池向家用交流负载或电网释放,是蓄电池充放电以及实现相应保护功能的自动控制设备。

本文考虑将充放电控制器置于交流母线侧,故该控制器的交流侧电压需为 220 V(AC),为便于选择现有的充电控制器以及方便电池单体串并联,蓄电池直流侧电压设计为 48 V,本文选择了型号为 BEG3000-E 的双向换流器,具体参数如表 1 所示。

表 1 BEG3000-E 双向换流器技术参数  
Tab. 1 Technical parameters of BEG3000-E bidirectional inverter

技术参数	数值
连续额定功率(25℃)/VA	3 000
交流电压/V	230
频率/Hz	50
连续交流均方根值输出(25℃)/A	13
最高效率/%	>92
最大交流输出电流/A	25
交流输入电压/V	207~253
交流输入频率/Hz	49.5~50.5
直流输入电压/V	42.0~68.0
电池充电连续输出电流/A	45

2.3 逆变器选择

本文选用了 3 kW 的家庭负荷,故选用型号为 SG3KTL、容量为 3 kW 的逆变器,其技术参数如表 2 所示。

2.4 蓄电池组容量计算

对于海岛或者架设送电线路造价太高的地区,分

表 2 SG3KTL 逆变器技术参数  
Tab. 2 Technical parameters of SG3KTL inverter

技术参数	数值
最大直流电压/V	550
最大功率点的工作电压/V	150~450
最大直流功率/W	3 300
最大输入电流/A	18
额定输出功率/kW	3
额定电网电压/V	230
允许电网电压/V	180~260
额定电网频率/Hz	50/60
功率因数	≥0.99(额定功率)
最大效率/%	97.3

布式光伏发电系统需安装相应的储能设备;对于具有送电线路的家用小型分布式光伏发电系统,考虑到很多家庭白天用电负荷较小,用电高峰集中在晚上,而太阳能恰恰又是与日照密切相关的,晚上是不发电的,本着自发自用余电上网的原则,故该系统中需配备蓄电池组进行能量的存储以便晚间使用<sup>[8-10]</sup>。同时,考虑到蓄电池体积较大,家庭分布式光伏发电系统,在自发电量不足以供给用电负荷时,也可从公共电网取市电来使用。故本文仅从探索的角度出发,将蓄能容量满足每天 6 kW·h 的用电为标准,在实际操作中可根据实际情况进行具体调整。

储能蓄电池的容量应按下式计算:

$$C_c = PDF / (UK_a) \tag{1}$$

式中:  $C_c$  为储能电池容量, kW·h;  $P$  为日均用电量, kW·h;  $D$  为蓄能天数, d;  $F$  为储能电池放电效率的修正系数,通常为 1.05;  $U$  为储能电池的放电深度,其数值为 0.5~0.8;  $K_a$  为包括逆变器等交流回路的损耗率,通常为 0.7~0.8。

本文中,放电深度取 80%,损耗率取 0.8,根据上述用电负荷以及储能时长,可算得蓄电池容量  $C_c = 9.84 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

由于蓄电池充放电控制器直流输入电压为 42~68 V,充电电流恒定,为了使蓄电池尽快充满电,本文选择蓄电池侧电压为 60 V,则蓄电池安时数为 164 A·h。选用单体标称电压为 12 V,容量为 170 A·h 的蓄电池 5 块,全部串联,蓄电池型号为 12SP170,其单体电池参数如表 3 所示。

表 3 蓄电池技术参数

Tab. 3 Technical parameters of batteries

电气参数	数值
额定电压/V	12
充电截止电压/V	13.6
放电截止电压/V	10
额定容量/(A·h)	170
尺寸(长、宽、高)/mm	500、192、235
质量/kg	54.7

2.5 光伏组件设计及选型

2.5.1 光伏组件串并联设计

由逆变器参数可知,其最大功率跟踪电压为 150~450 V,且光伏电池组件的最大装机容量需小于 3 300 W。同时,考虑到光伏组件型号的普遍应用性,以便安装以及后期维护,使光伏电池方阵的电气特性与逆变器匹配,本文选择了型号为 TSM-240 的组件,其技术参数如表 4 所示。

表 4 光伏组件技术参数

Tab. 4 Technical parameters of PV modules

电气参数	数值
最大功率/W	240
最大功率点的工作电压/V	30.4
最大功率点的工作电流/A	7.89
开路电压/V	37.2
短路电流/A	8.37
组件效率/%	14.7
太阳能电池片	125 mm × 125 mm 单晶硅
组件尺寸(长、宽、高)/mm	1 650、992、40
开路电压温度系数/(%·℃ <sup>-1</sup> )	-0.32

光伏组件的串联数可如下式计算

$$\begin{cases} N \leq \frac{V_{dcmax}}{V_{oc} [1 + (t - 25)K_v]} \\ \frac{V_{mpptmin}}{V_{pm} [1 + (t' - 25)K'_v]} \leq N \leq \frac{V_{mpptmax}}{V_{pm} [1 + (t - 25)K'_v]} \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $K_v$  为光伏组件的开路电压温度系数;  $K'_v$  为光伏组件的工作电压温度系数;  $N$  为光伏组件的串联数( $N$  取整数);  $t$  为光伏组件工作条件下的极限低温,℃;  $t'$  为光伏组件工作条件下的极限高温,℃;  $V_{dcmax}$  为逆变器允许的最大输入电压, V;  $V_{mpptmax}$  为逆变器最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)电压最大值, V;  $V_{mpptmin}$  为逆变器 MPPT 电压最小值, V;  $V_{oc}$  为光伏组件的开路电压, V;  $V_{pm}$  为光伏组件的工作电压, V<sup>[11]</sup>。

根据所选择的逆变器、光伏组件参数以及系统所在地,由式(1)(2)可得光伏组件的串联数满足:  $4.39 \leq N \leq 13.16$ 。

本文选择  $N = 13$ ,每串由 13 块 240 W 的光伏组件串联组成,每串组件功率为 3 120 W。

由于本文选择的光伏逆变器额定功率为 3 kW,则并联支路数为  $N' = 3\,000 / 3\,120 = 0.9615$ 。该逆变器的最大直流输入功率为 3 300 W,则此时并联支路数为  $N' = 3\,300 / 3\,120 = 1.058$ 。因此,并联支路数取 1,则装机容量为 3 120 W。

2.5.2 光伏专用电缆选择

连接光伏组件的直流专用电缆的截面大小应满足电缆长期允许载流量以及回路允许电压降,截面积  $S$  为

$$S = \frac{2\rho LI}{\delta V_{pm} N} \tag{3}$$

式中:  $\rho$  为电阻系数,对于铜导体  $\rho = 0.0184 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $L$  为电缆长度, m;  $I$  为计算电流(回路长期工



作电流)  $A$ ;  $\delta$  为电压降系数;  $V_{pm}$  为光伏组件的工作电压,  $V$ 。

由于家庭屋顶面积相对较小,光伏组件的组串数较少,则光伏组串可直接接至逆变器而无须经过汇流箱这一环节,这样既节约了成本又降低了电能传输过程中的损耗。屋顶布置的光伏组件至逆变器的距离一般不超过 30 m,本文即以 30 m 作为光伏组件至逆变器的距离。取电压降系数为 0.5%,综合前文光伏组件的相应参数,可得  $S=4.0 \text{ mm}^2$ ,故可选用型号为 PV1-F  $1 \times 4 \text{ mm}^2$  的光伏专用电缆。

## 2.6 光伏组件安装倾角及前后间距计算

### 2.6.1 光伏组件安装倾角计算

项目所在地地理位置为北纬  $32^\circ$ ,东经  $118^\circ 5'$ ,采用加拿大环境资源署和美国宇航局共同开发的光伏系统计算机辅助设计软件 RETScreen,计算出几种固定倾角下的组件表面总辐射量,如表 5 所示。由表 5 可知,在不考虑其他因素的情况下,该地区的电池组件最佳倾角理论值为  $25^\circ$ 。在工程实际中应综合考虑发电量、屋面情况、安装难度、稳定性等因素,选择最佳的安装角度<sup>[13-14]</sup>。

表 5 在不同倾角下(南京地区)光伏阵列表面的太阳能辐射值  
Tab. 5 Solar radiation values on PV array surface in Nanjing under different inclination

倾角/( $^\circ$ )	辐射值/[ $(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ]
0	3.156 602 740
23	3.353 783 214
24	3.354 711 559
25	3.354 984 452
26	3.354 601 811
27	3.353 563 750
28	3.351 870 588
29	3.349 522 839
30	3.346 521 218
31	3.342 866 641
32	3.338 560 219
33	3.333 603 266

### 2.6.2 水平屋面上光伏阵列间距计算

如果屋面为平顶,光伏组件的布置如图 2 所示。由图 2 可知:

$$Q = Y \cos n \quad (4)$$

$$Y = H / \tan m \quad (5)$$

$$H = A \sin \gamma \quad (6)$$

式中:  $Q$  为电池阵列间距;  $Y$  为太阳射线在地面上的影长;  $H$  为前排电池阵列最高点与后排阵列最低点的垂直高度;  $m$  为太阳高度角;  $n$  为太阳方位角;  $A$  为电

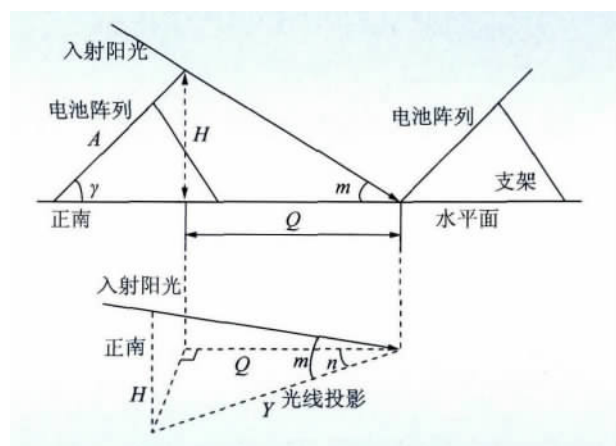


图 2 水平屋面上光伏阵列布置图  
Fig. 2 Layout of PV array on horizontal roof

池阵列斜面长度;  $\gamma$  为电池阵列与水平面的夹角。则

$$m = \arcsin(0.648 \cos \phi - 0.399 \sin \phi) \quad (7)$$

$$n = \arcsin(0.707 \times 0.917 / \cos m) \quad (8)$$

式中:  $\phi$  为当地纬度;  $\delta$  为冬至日时的赤纬角,为  $-23.45^\circ$ ;  $\omega$  为上午 9:00 的时角,为  $45^\circ$ 。

由以上公式可得:

$$R = \frac{Q}{H} = \cos n \cot m \quad (9)$$

式中  $R$  为影长比。

由式(9)可知,影长比  $R$  只与当地纬度有关。南京纬度为北纬  $32^\circ$ ,则可算得影长比为 2.008。故在平面屋顶进行光伏组件的安装时,应根据此影长比设置相应的前后间距。计算结果仅为理论值,现场布置时根据现场情况调整阵列的前后间距,但不能小于该值。

### 2.6.3 斜坡屋面上光伏阵列间距计算

图 3 为太阳能电池阵列在有一定坡度的屋面南坡上的布置示意图。图 3 中  $Q'$  为电池阵列间距在水平面上的投影。

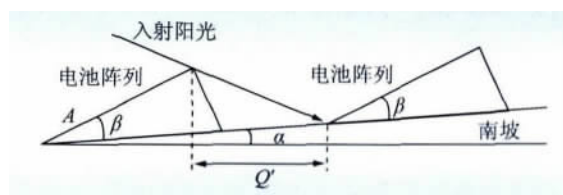


图 3 南坡屋顶电池阵列布置示意图  
Fig. 3 Layout of V array on southern slope of roof

由图 3 可得

$$[A \cos(\alpha + \beta) + D] \tan \alpha + \frac{Q'}{R} = A \sin(\alpha + \beta) \quad (10)$$

则

$$Q' = \frac{A \sin(\alpha + \beta) - A \cos(\alpha + \beta) \tan \alpha}{\tan \alpha + \frac{1}{R}} \quad (11)$$

图4为太阳能电池阵列在有一定坡度的屋面北坡上的布置示意图。图中 $\beta'$ 为北坡屋顶电池阵列支架倾角。

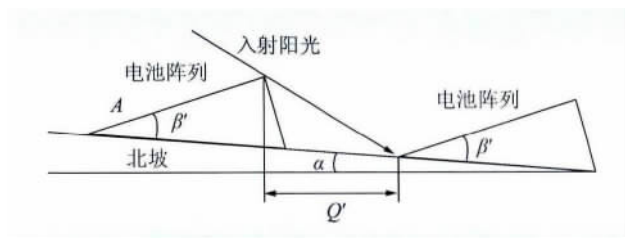


图4 北坡屋顶电池阵列布置示意图  
Fig. 4 Layout of PV array on north slope of roof

由图4可知

$$\frac{Q'}{R} - [Q' + A \cos(\beta' - \alpha)] \tan \alpha = A \sin(\beta' - \alpha) \quad (12)$$

则

$$Q' = \frac{[A \sin(\beta' - \alpha) + A \cos(\beta' - \alpha) \tan \alpha]}{\frac{1}{R} - \tan \alpha} \quad (13)$$

因电池阵列布置于屋面北坡,则有 $\beta' > \alpha$ 成立。当屋面坡度较大时,为了保证光伏组件安装的可靠性、抗风压性能等,屋面北坡将不宜布置组件。

## 2.7 防雷接地设计

因光伏组件置于屋顶之上,有可能遭受直击雷或感应雷电波的侵入,因此,光伏组件边框上的接地孔须用BVR-1×6铜绞线逐个跨接,直至两边缘与光伏组件固定支架的连接螺栓用线鼻可靠固定;光伏组件固定支架采用-50 mm×5 mm热镀锌扁钢与屋顶的避雷带相连,连接点不少于2处,连接处焊接的长度应不小于扁钢宽度的2倍。同时,逆变器直流输入以及交流输出等处应附带有避雷器,以防止雷电波的侵入。

## 3 结论

(1)在国内大力鼓励发展分布式光伏发电的背景下,本文提出了一种家用小型分布式光伏发电系统结构,并实现其系统设计。根据系统要求,合理地配置了系统中充放电控制器、额定功率3 kW的逆变器以及170 A·h的储能蓄电池等重要设备。通过相应

设备的具体参数佐证了选择的合理性,并设计了由13块太阳能光伏组件组成的一串光伏阵列以满足系统要求。

(2)根据光伏组件在不同屋面的布置情况,推导出了光伏阵列在平面上以及屋面的南坡和北坡布置时前后间距的理论公式,可为光伏组件的布置提供参考。

## 4 参考文献

- [1] 王长贵,王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社 2009: 1-30.
- [2] 孙李平,李琼慧,黄碧斌. 分布式光伏发电现状及走势[J]. 中国电力教育 2013(6): 90-91.
- [3] 孙燕. 分布式光伏并网系统在国内的应用[J]. 太阳能 2012(5): 23-26.
- [4] 陈刚,姬鸿,王勇. 太阳能光伏发电系统设计[J]. 太阳能光伏发电技术 2011, 5(2): 6-10.
- [5] 冯臻生. 太阳能发电原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社 2007.
- [6] 李少宁,徐而树,石磊. 太阳能辅助燃煤电站一体化发电技术[J]. 电力建设 2010, 31(1): 7-10.
- [7] 贾东梨,杨旭升,史常凯. 智能电网对用户用电的影响[J]. 电力建设 2011, 32(6): 13-17.
- [8] 刘胜永,孙兴. 新能源分布式发电系统储能电池综述[J]. 电源技术 2012, 36(4): 601-605.
- [9] 阮晓东. 分布式光伏发电关键问题: 储能技术[J]. 太阳能 2013(4): 42-46.
- [10] 谢志佳,马会萌,靳文涛. 大规模电池储能系统PCS拓扑结构分析[J]. 电力建设 2012, 33(8): 22-26.
- [11] GB 50797—2012 光伏发电站设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社 2012.
- [12] DL/T 5044—2004 电力工程直流系统设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社 2004.
- [13] 蒋华庆,田景奎,姜在骏,等. 采用自动跟踪系统对光伏电站电价的影响[J]. 电力建设 2009, 30(6): 76-78.
- [14] 朱丹丹,燕达. 太阳能板放置最佳倾角研究[J]. 建筑科学 2012(28): 277-281.

收稿日期: 2013-07-08 修回日期: 2013-09-09

作者简介:

韩学栋(1987)男,硕士,主要从事电力系统工程咨询规划设计工作 E-mail: hanxuedong@jspdi.com.cn;

王海华(1979)女,高级工程师,主要从事电力系统工程咨询规划设计工作;

李剑锋(1971)男,高级工程师,高级项目经理,主要从事电力工程总承包项目管理工作。

(编辑: 蒋毅恒)