

文章编号: 1009-3443(2007)04-0381-06

# 城市住宅小区屋顶并网光伏发电系统的实现

王春明<sup>1</sup>, 王金全<sup>1</sup>, 徐 晔<sup>1</sup>, 龚 贺<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 慈溪市住房发展投资有限公司, 浙江 慈溪 315300)

**摘 要:** 为了促进光伏发电技术的商业应用, 针对城市住宅小区的特点, 提出了一种屋顶太阳能并网光伏发电系统方案。对屋顶太阳能电池组件的布置和分组串接技术、光伏系统外置设备的防雷保护技术、并网逆变器控制保护技术以及光伏系统负荷选择等问题进行了研究。结合浙江省慈溪市天和家园住宅小区屋顶太阳能并网光伏发电系统的应用, 具体介绍了该系统所采用的技术措施及做法。实践表明, 这些方法与措施能够满足要求。

**关键词:** 住宅小区; 并网; 光伏发电; 逆变器; 公用负荷

**中图分类号:** TM615      **文献标识码:** A

## Realization on rooftop grid-connected photovoltaic generating system in city housing district

WANG Chun-ming<sup>1</sup>, WANG Jin-quan<sup>1</sup>, XU Ye<sup>1</sup>, GONG He<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China;

2. The Housing Development and Investment Co., Ltd in Gxi, Cixi 221005, China)

**Abstract:** In light of the characteristics in city housing district, a scheme of the rooftop grid-connected photovoltaic generating system was put forward, to promote the commercial application of solar photovoltaic power generation technology. The technologies such as the disposal and grouping in series of rooftop photovoltaic plants, lightning protection of the outer equipment of the photovoltaic system, control and protection of the grid-connected inverter and the load choice of photovoltaic system were studied further. The technical measures and ways adopted by this system were illustrated by application of the rooftop grid-connected photovoltaic generating system at Tianhe housing district in Gxi city of Zhejiang province. Practice indicates that these measures and ways can satisfy the demands.

**Key words:** housing district; grid-connected; photovoltaic generating system; inverter; public load

太阳能光伏发电系统的运行方式分独立运行和并网运行两种。独立运行的光伏发电系统需要有蓄电池作为储能装置, 其主要用于无电网的边远地区。在有公共电网的地区, 光伏发电系统一般与电网连接, 即采用并网运行方式。近几年来, 许多发达国家主要开拓的市场及目标为屋顶式并网光伏发电。其

原因是并网技术日益成熟, 规模化设置对城市电网起到调峰作用, 绿色能源享有国家优惠政策, 电力公司高价收购, 使光伏发电的成本已接近于商业化。将太阳能光伏发电技术应用于城市住宅小区建设项目, 国内目前尚无先例<sup>[1-4]</sup>。针对我国城市住宅小区及电网的特点, 提出了一种屋顶太阳能并网光伏发电系统方案, 并对该系统进行了研究。该方案在浙江省慈溪市天和家园住宅小区峰值功率为 43 kW 屋顶太阳能并网光伏电站的应用中取得良好的效果。目前, 天和家园住宅小区已被国家住宅与居住环境

收稿日期: 2006-11-16

作者简介: 王春明 (1966- ), 男, 讲师; 研究方向: 电力系统自动化及新能源技术; E-mail: wchm821542@sina.com.

工程技术研究中心授予太阳能建筑示范工程

1 住宅小区并网光伏发电系统

1.1 系统模式

如图 1 所示,城市住宅小区并网光伏发电系统主要包括以下几个方面:屋顶太阳能电池组件的布置和分组串接技术、光伏系统外置设备的防雷保护技术、并网逆变器控制保护技术以及光伏系统负荷选择

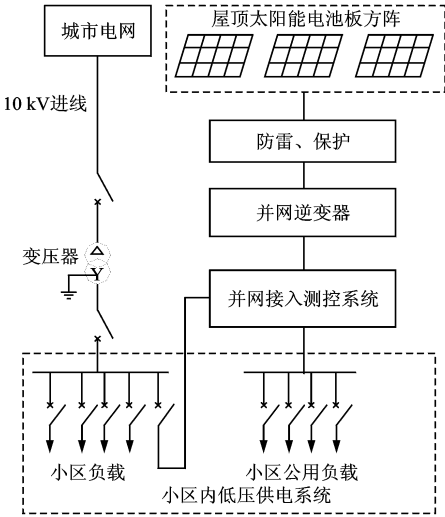


图 1 住宅小区太阳能并网光伏发电系统模式  
Fig. 1 Mode of the grid-connected photovoltaic generating system in city housing district

1.2 屋顶太阳能电池组件的布置和分组串接技术

1.2.1 太阳能电池组件布置

(1)太阳能电池组件的布置应与住宅小区环境完美结合。将太阳能光伏发电应用于城市住宅小区时,与建在边远地区、荒漠地区的独立光伏电站有很多不同点,不能简单地将太阳能电池方阵按最佳倾角的要求布置,必须要充分考虑与周围环境的协调和美观。在小区住宅设计初期就要进行综合考虑,充分利用日照方向和太阳光的照射角度。如将光伏电池组件设于朝南向的坡屋顶上;采用光伏电池板替代外墙壁上的玻璃幕墙;采用透光型的光伏电池板替代外窗、屋顶采光窗和玻璃走廊等。

(2)屋顶太阳能电池组件阵列应采取抗风压措施。设计初期应向建筑结构专业提出要求,按抗风力等级要求对电池板方阵载荷进行力学计算。设计中应采用多点结合方式,即:增加钢支架与屋面结构和相关承重结构的连接点,将受力点均匀分布于各承

重结构上,各连接点选用特制型钢或不锈钢螺栓连接等。

1.2.2 分组串接技术

安装组件时,原则上要在同一日照条件下使用串联的组件,否则,其他组件会受输出量最低的组件影响导致整体输出严重下降<sup>[2]</sup>。为了将组件串接后的热斑效应损耗降到最低,应将受到不同方向建筑物影响的组件进行分组。将受到相同方向建筑物影响的组件归为一组,由逆变器的最大功率跟踪 MPPT(maximum power point tracking)电路对每路组件进行最大功率点跟踪,从而使因挡光引起的组件功率损失降低到最低限度。

1.3 光伏系统外置设备的防雷保护

1.3.1 防直击雷措施

直击雷是指直接落到太阳能电池阵列、低压配电线路、电气设备以及在其旁的雷击。防直击雷的基本措施是安装避雷针。光伏系统中的外置设备防雷设计应符合文献[5]中有关规定。

1.3.2 防感应雷措施

太阳能光伏发电系统的雷电浪涌入侵途径,除了太阳能电池阵列外,还有配电线路、接地线以及它们的组合。从接地线侵入是由于近旁的雷击使大地电位上升,相对比电源高,从而产生从接地线向电源侧反向电流引起的。

对感应雷的防护可采取以下措施:

- (1)在每路直流输入主回路内装设浪涌保护装置,并分散安装在防雷接线箱内。
- (2)在并网接入控制柜中安装避雷元件,以防从低压配电线侵入的雷电波及浪涌。

1.4 并网逆变器控制保护技术

并网逆变器是并网光伏系统的重要电力电子设备,其主要功能是把来自太阳能电池方阵输出的直流电转换成与电网电力相同电压和频率的交流电,并把电力输送给与交流系统连接的负载,同时还具有最大限度地发挥太阳能电池方阵性能的功能和异常或故障时的保护功能<sup>[2]</sup>。

1.4.1 孤岛效应的防护

孤岛效应是指电网失电情况下,发电设备仍作为孤立电源对负载供电的一种现象。孤岛效应对设备和人员的安全存在重大隐患,体现在以下两方面:一方面是当检修人员停止电网的供电,并对电力线路和电力设备进行检修时,若并网光伏电站的逆变器仍继续供电,会造成检修人员伤亡事故。另一方

面,当因电网故障造成停电时,若并网逆变器仍继续工作,一旦电网恢复供电,电网电压和并网逆变器的输出电压在相位上可能存在较大差异,会在这一瞬间产生很大的冲击电流,导致设备损坏。孤岛效应的防护措施主要有被动式和主动式两种检测方式。被动式检测方式是通过实时检测电网电压的幅值、频率和相位。当电网失电时,会在电网电压的幅值、频率和相位参数上产生跳变信号,通过检测这种跳变信号来判断电网是否失电。被动式主要有电压相位突变检测方式和频率变化检测方式,其中电压相位突变检测方式最为常用。主动式检测方式则是先把电网变动因素提供给逆变器,并让变动因素在并网运行时不出现在输出中,而只在单独运行中出现,这样即可检测出电网异常。主动式主要有频率变动方式、有功功率变动方式、无功功率变动方式和负载变动方式。其中,频率变动方式最为常用。

此外,在并网逆变器检测到电网失电后,应能够立即停止工作;而当电网恢复供电时,并网逆变器不应立即投入运行,而是应持续检测到电网信号在一段时间(如90 s)内完全正常,再重新投入运行。

#### 1.4.2 最大功率跟踪(MPPT)

太阳能电池方阵的输出随太阳辐照度和太阳能电池方阵表面温度而变动。因此需要跟踪太阳能电池的工作点并进行控制,使其始终处于最大输出,并获取最大输出。MPPT控制就起到了这种作用。它每隔一定时间将并网逆变器的直流工作电压变动一下,测定此时的太阳能电池方阵输出功率并同前次做比较,始终使并网逆变器的直流电压沿功率变大的方向变化。这样,最大功率点跟踪控制通过监视输出功率的增减来控制工作点,使其始终处于最大工作点<sup>[6]</sup>。

对于不同朝向和不同型号的光伏组件,分组串联后,应对每路组件进行最大功率点跟踪,才能使因建(构)筑物挡光引起的组件功率损失降低到最低限度。

#### 1.4.3 并网保护措施

(1)并网运行的光伏系统在电网或并网逆变器发生异常时,必须检测故障并迅速停下逆变器保护电网安全。为此并网逆变器需要设置并网保护装置或具有同等功能的回路。一般需设置:过欠电压保护、过欠频率保护和短路故障保护等<sup>[7]</sup>。

(2)对电网频率变压器绝缘方式的并网逆变器,逆变器的直流输入和交流输出之间具有电气隔离功能,直流侧接地故障不会直接影响到电网。对高频变压器绝缘方式或无变压器方式的并网逆变器,应设

置直流接地检测功能,且直流侧的光伏组件阵列应采用“浮地”方式。这样,正负极与地之间都没有电气连接,逆变器在运行过程中实时检测直流正负极的对地阻抗,从而保证逆变器直流侧的短路故障不会影响到电网。

### 1.5 光伏系统负荷选择

从严格意义上讲,并网光伏发电系统是将整个城市电网作为自己的储能单元,因而,光伏系统所带负荷是任意的,不存在选择问题。但由于我国《可再生能源法》刚刚于2006年1月1日实施,《可再生能源法》的“上网电价法”和“全网平摊”法规尚未实施,这就带来了住宅小区移交物业管理后电费管理上的困难。为了更好地保证上级城市电网的安全,方便管理,太阳能并网光伏系统负载的选择应遵循如下原则:

(1)屋顶并网光伏系统的发电功率小于所带负载的用电功率。事实上,在建筑密度很大的城市住宅小区中,能够安装太阳能电池板的面积通常有限,住宅小区屋顶光伏发电系统的容量往往远远小于其公共接入点相连变压器的容量,即光伏系统的发电功率始终小于小区负载的功率,没有剩余电能送入上级城市电网。因而,住宅小区光伏发电系统可设置为小区内局部并网运行方式,所带负荷优先选择小区共用负荷,以方便物业管理。

(2)负载的用电时间应与光伏系统的发电时间相匹配。选择太阳能发电所带用电负荷应该充分利用太阳能的特性,选择负荷曲线与太阳光日照曲线接近的用电负荷。并应充分利用光伏电源独立性的特点,选择住宅小区中的一级负荷,如小区智能化系统用电、地下车库中的日常照明和应急照明等。

## 2 屋顶并网光伏发电系统应用实例

结合浙江省慈溪市天和家园住宅小区峰值功率为43 kW屋顶并网光伏电站的建设进行研制。该小区占地面积64 788 m<sup>2</sup>,总建筑面积134 000 m<sup>2</sup>。小区住宅整体布置方式为南北朝向,南北均无高大建筑物,日照充分。小区建筑住宅以多层为主,屋顶呈人字形。在天和家园20号楼屋顶装设太阳能电池板,建住宅小区太阳能光伏电站,20号楼屋顶外观如图2所示。

### 2.2 光伏系统太阳能电池组件的配置

#### 2.2.1 最佳方阵倾角的确定

慈溪市介于北纬30°02′~30°24′和东经121°02′~121°42′之间,平均年日照时数2 038 h,太阳年辐

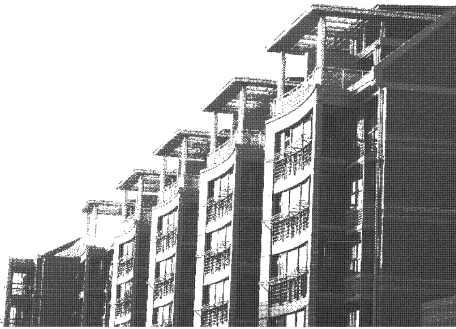


图 2 20# 楼屋面外观  
Fig. 2 Appearance of 20# house

射量 4.0~4.8 GJ/m<sup>2</sup>, 年日照百分率 47%。查阅相关资料可知, 太阳能电池组件方阵最佳倾角为 30°。

2.2.2 太阳能电池组件的选择与布置

(1) 太阳能电池组件的选择

该系统选用了常州某公司生产的 TSM-175D 型高效单晶硅电池组件。其技术参数如下, 峰值功率:  $P_m=175\text{ W}$ ; 开路电压:  $U_{oc}=43.58\text{ V}$ ; 最佳工作电压:  $U_m=36.2\text{ V}$ ; 短路电流:  $I_{sc}=4.97\text{ A}$ ; 最佳工作电流:  $I_m=4.85\text{ A}$ ; 重量:  $G=16\text{ kg}$ ; 尺寸: 长×宽×厚=1581 mm×809 mm×40 mm

(2) 太阳能电池组件的布置

根据建设方提供的 20# 楼屋面图, 如图 3 所示, 以及现场考察情况, 电池方阵布置方案如下:

① 西侧平台面积 87 m<sup>2</sup>, 采用锯齿型方阵, 共安装组件 36 块, 方阵倾角为 30°。峰值功率为:

$$175\text{ W} \times 36 = 6.3\text{ kW}$$

② 斜屋面  $W_1 \sim W_7$  共 7 块小屋面可安装太阳能组件, 总面积(斜面) 113.9 m<sup>2</sup>, 与斜屋面平行安装组件 87 块, 方阵倾角为斜屋面坡度 31°。峰值功率为:

$$175\text{ W} \times 87 = 15.225\text{ kW}$$

③ 顶层露台上方装饰性花架有  $L_1 \sim L_5$  共 5 个可安装太阳能组件, 面积 233.44 m<sup>2</sup>, 考虑露台的采光和建筑的整体布局 and 美观, 将露台上方装饰性花架前半部分空出一定面积, 保持装饰性花架的原貌, 后部约有 163 m<sup>2</sup> 安装组件, 共安装组件 126 块, 为减少风压及屋顶的美观, 方阵倾角为 7°。峰值功率为:

$$175\text{ W} \times 126 = 22.050\text{ kW}$$

该布置方案共安装了 TSM-175D 型高效单晶硅太阳能组件 249 块, 总的峰值功率为 43.575 kW, 设计按 43 kW 配置、计算

2.3 电池组件分组串接技术的应用

2.3.1 并网逆变器的选择

该系统并网逆变器选用德国某公司生产的 SMC6000TL 型无变压器集中式逆变器和 SB5000TL 型无变压器多组串逆变器。具有过压保护、对地故障保护、孤岛效应保护、过载保护和短路故障保护等完善的保护功能, 并具有内置逆变采集器和 RS485 RS232 通信接口, 可方便地获取逆变器的运行参数

2.3.2 太阳能电池组件分组串接

该方案屋面布置的太阳能电池组件在安装后的光照有 2 种情况:

- (1) 平台、露台上方装饰性花架安装的组件将不会受到建(构)筑物等的挡光影响;
- (2) 除正午外, 斜屋面安装的组件在每天的不同时间段, 其光照将会受到不同方向建筑的一定影响。

为了将组件串接后的热斑效应损耗降到最低, 将受到不同方向建筑物影响的组件进行分组。将受到相同方向建筑物影响的组件归为一组, 并且在系

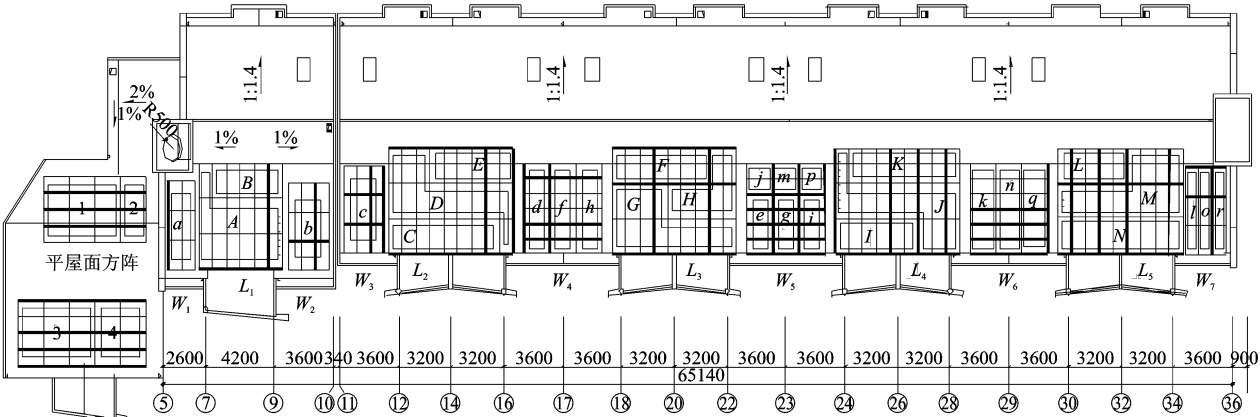


图 3 20# 楼屋顶光伏电池组件平面布置图

Fig. 3 Disposal ichnography of roof photovoltaic plants of 20# house

统中采用多组串逆变器。为了平衡逆变器的功率,每台多组串逆变器都接入了多组的组件,由多组串逆变器的每路 MPPT 电路对每路组件进行最大功率点跟踪,从而使因挡光引起的组件功率损失降低到最低限度。电池组件分组数,如图 3 所示(电池组件被圈住的为一组)。

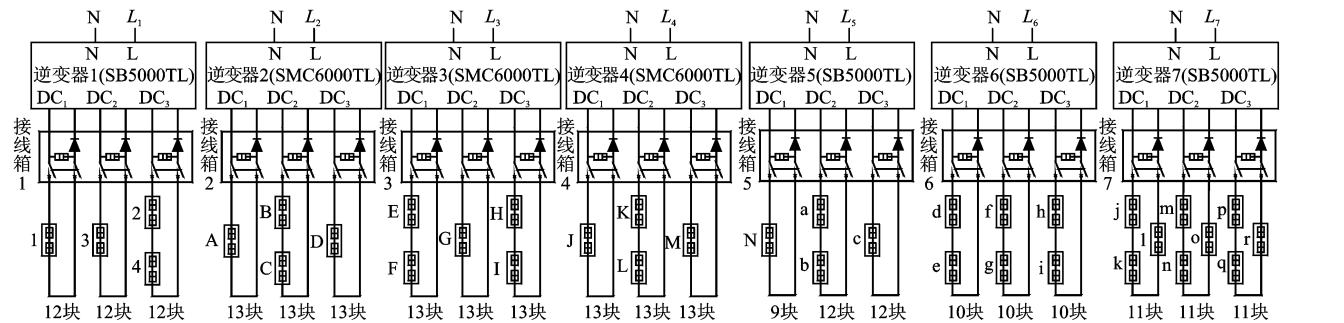


图 4 光优直流系统连接图

Fig. 4 Connection figure of photovoltaic direct current sytem

## 2.4 太阳能光伏发电系统负载的选择

天和家园设置了高压环网站 1 座,在小区各负荷点设置了 7 个箱式变压器。其中: 2 号箱式变压器容量为 800 kV·A; 6 号箱式变压器容量为 1 000 kV·A; 其他均为 630 kV·A; 与光伏系统公共接入点相连的 4 号箱式变压器容量为 630 kV·A; 主要供小区公用负荷用电。天和家园公用负载主要有: 地下车库西区照明灯 35.2 kW, 地下车库东区照明灯 21.4 kW, 智能化设备 2 kW, 以及小区景观灯和围墙灯等。其中, 地下车库照明和智能化系统负荷用电特性与太阳能光伏发电特性较为接近。因此, 选择地下车库照明和智能化用电为光伏系统的负荷。总负荷功率为 58.6 kW, 大于光伏系统的峰值功率 43 kW, 且所安装的光伏系统峰值功率 43 kW 不到所连 4 箱变容量的 10%, 保证了无电能输入上级城市电网。

## 2.5 防雷保护

### 2.5.1 防直击雷措施

该光伏系统中的外置设备在整个环境中不是最高建筑物, 充分利用原屋面防雷装置, 把所有屋顶电池组件的钢结构与屋顶建筑的防雷网相连, 可达到防直接雷击的目的, 并符合文献 [5] 中有关规定。

### 2.5.2 防感应雷措施

(1) 在每路直流输入主回路内装设浪涌保护装置, 并分散安装在防雷接线箱内。屋顶并网光伏发电系统在组件与逆变器之间加入防雷接线箱, 不仅对

多组串逆变器采用了每路独立的最大功率跟踪, 可以处理不同朝向和不同型号的光电组件, 也可以弥补不同连接串中的光电组件数量和部分阴影的影响, 因而可以有效地避免屋面安装的组件因阴影引起的功率损失。逆变器与电池组件的分组串接, 如图 4 所示。

屋顶太阳能电池组件起到防雷保护作用, 还为系统的检测、维修和维护提供了方便, 缩小了电池组件故障检修范围。该工程选用了具有 IP65 防护等级的 TRI-FL 型接线箱, 随组件方阵直接安装在室外, 其接入方式如图 4 所示。

(2) 在并网接入控制柜中安装避雷元件, 防护从低压配电线侵入的雷电波及浪涌。

## 3 测试结果

该光伏并网发电系统 2006 年 10 月 26 日并网调试一次性成功, 运行正常, 检测参数如表 1 所示, 符合文献 [8] 的要求。

表 1 光伏系统测试参数

Tab. 1 Test parameter of photovoltaic system			
单相交流电压波动	频率波动 / Hz	三相电压不平衡度 %	交流电流谐波 %
< 7%	49.8~50.2	< 2	< 4

## 4 结 语

(1) 将太阳能光伏发电技术应用于城市住宅小区建设项目, 国内目前尚无先例<sup>[1~4]</sup>。城市住宅小区屋顶太阳能并网光伏发电系统方案在浙江省慈溪市天和家园住宅小区峰值功率 43 kW 屋顶太阳能并网光伏电站项目的应用中取得了良好的效果, 有着较好的示范性和影响力。目前天和家园住宅小区已被国家住宅与居住环境工程技术研究中心授予太阳

能建筑示范工程

(2)多组串逆变器及太阳能电池组件的分组串接技术可以有效地减少屋面安装的电池组件因阴影引起的功率损失

(3)屋顶并网光伏发电系统在组件与逆变器之间加入防雷接线箱,不仅对屋顶太阳能电池组件起到防雷保护作用,且缩小了电池组件故障检修范围,为系统的检测、维修、维护提供了方便。

(4)太阳能是一种清洁、可再生能源,太阳能光伏发电实现了直接将太阳能转化为电能。我国新能源法已从 2006 年 1 月 1 日正式实施,随着“上网电价法”和“全网平摊”等法规的进一步实施,必将极大地推动我国光伏产业的发展,相信不久的将来,我国民用建筑物屋顶太阳能并网光伏发电系统将会得到广泛的应用<sup>[9~13]</sup>。

参考文献:

[1] 李逢元.太阳能光伏发电应用于公用建筑的探讨[J].建筑电气,2004,23(4):3-6.  
[2] 王长贵,崔容强,周 篁.新能源发电技术[M].北京:中国电力出版社,2003.  
[3] 李炳华,王玉卿,王振声,等.国家体育场太阳能光伏发电

电技术应用的研究[J].建筑电气,2006,25(4):20-25.  
[4] 赵玉文.太阳能利用的发展概况和未来任务[J].中国电力,2003 36(9):62-69.  
[5] SJ/T11127-97.光伏(PV)发电系统过电压保护—导则[S].北京:中国标准出版社,1997.  
[6] 刘 辉,吴麟章,江小涛,等.太阳能电池最大功率跟踪技术研究[J].武汉科技学院学报,2005,18(8):12-15.  
[7] 周 强,王金全,王春明.DC/AC在风光柴互补供电系统中应用的探讨[J].电气开关,2006,44(1):44-46.  
[8] GB/T19939-2005.光伏系统并网技术要求[S].北京:中国标准出版社,2005.  
[9] 王春明,王金全,周 强,等.风光柴互补供电系统[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2005,6(5):45-48.  
[10] 周 强,王春明,王金全.边防及偏远地区的基层连队供电方式的讨论[J].节能技术,2006,24(1):86-88.  
[11] 张粒子,李才华,罗 鑫.促进我国可再生能源电力发展的政策框架研究[J].中国电力,2006 39(4):86-90.  
[12] 尹春涛.绿色电力营销可再生能源发展的市场动力[J].中国能源,2004 26(1):8-15.  
[13] 茅靳丰,窦文平,韩 旭.高原严寒地区观察哨所连续式太阳能供暖系统[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2005,6(1):63-66.

(责任编辑:汤雪峰)