

文章编号: 0254-0096(2006)02-0146-06

50kW_p 并网光伏示范电站系统设计与运行数据分析

刘莉敏, 曹志峰, 许洪华

(中国科学院电工研究所, 北京 100080)

摘 要: 介绍了“十五”国家科技攻关项目“50kW_p 大型屋顶光伏并网示范电站”的系统构成和工程设计研究, 并对其典型的实际运行数据进行了分析讨论。50kW_p 并网光伏示范电站充分考虑了光伏技术与建筑物结合的特点, 研究开发出兼顾光伏发电和采光性能的玻璃幕墙, 实现了光伏组件与建筑的一体化; 采用了 9 种不同材质和封装工艺的光伏组件, 设计了 6 种不同的安装角度; 采用具有最大功率跟踪控制的多支路式并网逆变器; 开发出一套数据采集系统。

关键词: 并网; 光伏; 监测系统; BIPV

中图分类号: TK514 **文献标识码:** A

0 引 言

太阳电池与建筑结合的并网光伏发电技术^[1]是近十多年发展起来的在城市中推广应用太阳能发电的一个重要方向。建筑物能为光伏系统提供足够的面积, 不需另占土地; 光伏阵列可代替常规建筑材料, 能省去光伏系统的支撑结构, 节省材料费用; 安装与建筑施工结合, 节省安装成本; 分散发电, 就地使用, 避免了输电和配电损失, 降低了输电和配电投资和维修成本^[2]; 并网型光伏发电系统与电网互为补充为本地负载提供电能, 使供电可靠性大为提高; 太阳电池与建筑结合的集成设计使建筑更加洁净、完美, 更易被专业建筑师、用户和公众接受, 应用前景光明。50kW_p 并网光伏示范电站是科技部“十五”攻关课题, 是我国第一座已通过国家验收的光伏建筑一体化系统。本文介绍该示范电站的系统构成和工程设计研究, 并对其典型的实际运行数据进行了分析讨论。

1 并网光伏电站的设计

50kW_p 并网光伏示范电站的安装地点为天普新能源示范楼, 位于北京市大兴芦城工业园区北京天普太阳能工业有限公司厂区内, 建筑面积 8000m²。该楼是北京奥运会新能源示范项目之一, 不仅包括

太阳能并网光伏示范电站与建筑一体化研究, 还有大型太阳能空调系统、蓄能型太阳能地源热泵空调系统以及多种高技术建筑节能保温材料和地板采暖等新技术的使用。

天普集团厂区所在地的供电电网为农村供电电网, 单路 11kV 接入, 变压器容量为 500kVA。天普新能源示范楼的供电为三相五线制, 主配电柜刀闸容量为 380V500A, 接入线主电缆为 $\Phi 120\text{mm}^2 \times 3 + \Phi 60\text{mm}^2 \times 1$, 大楼内部独立地线。并网光伏示范电站的控制设备间位于一楼大厅的后方, 交直流配电柜、逆变器、电站监控系统均在此安装。交流配电柜与大楼主配电柜相距约 25m, 由一根 $\Phi 70\text{mm}^2 \times 3 + \Phi 35\text{mm}^2 \times 2$ 的电缆连接, 连接方式为三相五线制。

1.1 光伏阵列设计

天普新能源示范楼安装有大型太阳能空调系统, 其坡面屋顶和部分朝南立面已经预埋了大量太阳能真空集热管, 这使得在该建筑上可以安装太阳能光伏组件的位置极为有限。经过现场考察测量和协商沟通, 采用在建筑物的多个部位, 结合建筑需要, 多角度多方法地安装了总容量为 50365W_p 的 6 种类型的光伏组件, 展示各种不同的光伏发电技术。安装光伏组件的具体位置如下:

1) 屋顶钢结构网架。具有 140m² 左右的安装面积, 以其钢球节点为受力支撑点, 按网架的原有倾角

铺装光伏组件支架,安装 216 块 80W 多晶硅铝边框光伏组件,安装倾角为 30°,共计 17.28kW_p;

2)一楼前厅立面玻璃幕墙。安装面积 50m²,使用无边框的光伏组件替代原设计的玻璃,安装 56 块 50W 多晶硅无边框半透明光伏组件,安装倾角 90°,共计 2.8kW_p;

3)6 个弧形窗玻璃幕墙。安装面积 180m²,使用无边框的光伏组件替代原设计的玻璃,按朝向的差异每个弧形窗分为正南、偏东、偏西 3 组,安装 288 块 55W_p 单晶硅无边框半透明光伏组件,安装倾角 90°,共计 15.84kW_p;

4)东西两个楼顶平台太阳房屋顶。每个太阳房的安装面积为 80m²,使用无边框的光伏组件替代屋顶玻璃,各安装 96 块 BP850 Power View 半透明和 MST-45MV 不透明的无边框多结薄膜光伏组件,安装倾角为 15°,共计 9.12kW_p;

5)东西两个楼顶平台立柱(外部结构屋梁)下方。每边各长约 24m,使用铝合金框架各悬挂安装 2 排,共 60 块 ST40 硒钢铜(CIS)光伏组件,安装倾角为 90°,共计 2.4kW_p;

6)作为附属建筑的后花园温室屋顶。安装面积为 100m²,使用光伏组件替代部分屋顶玻璃,安装 36 块 55W_p 单晶硅半透明光伏组件和 27 块 35W_p 硅带(Ribbon Silicon)半透明光伏组件,安装倾角为 25°,共计 2.925kW_p。

1.2 并网逆变器配置

50kW_p 并网光伏示范电站选用了 6 种不同类型的光伏组件,并且有多种安装倾角。由于电压等级的不统一和不同倾角的光伏组件并联产生的不匹配损耗,故不可能只用 1 台逆变器实现并网。经过了大量的产品调研和考虑到展示当前先进电力电子技术的需要^[3,4],我们采用了单相逆变器分别并入三相电网 A、B、C 各相的设计思想,不仅选用了 1 台结合国外技术自主研发 20kW IGBT 单相全桥并网逆变器,还选用了 6 台特别适合于光伏组件多类型多角度安装特点,可以对不同类型的光伏组件或不同安装角度的光伏组件分别连接输入、分别进行最大功率跟踪的德国 SMA 公司 SB-5000TL 型 5kW 支路式并网逆变器,采用这种并网逆变器可以使我们的系统设计更加简洁、高效、优化。该并网逆变器具有如下特点:

- 1)3 路具有独立 MPPT 功能的光伏组件输入端子;
- 2)无变压器设计,效率高达 95%;
- 3)额定输出功率 4600W,最大输出功率 5100W;
- 4)具有通信功能,可以进行数据采集和远程控制。

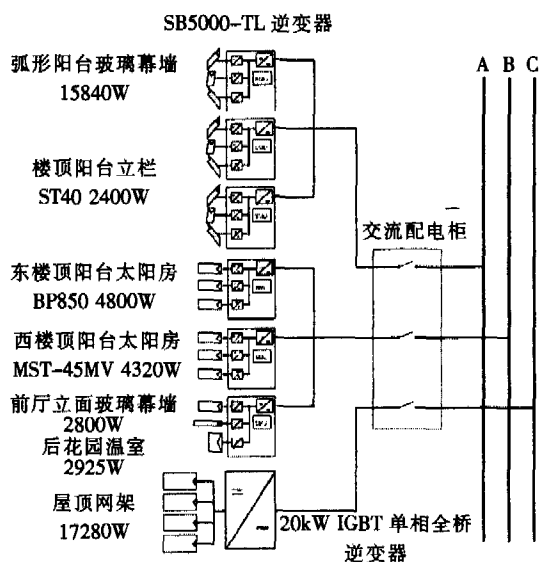


图 1 50kW_p 光伏并网示范电站系统结构图

Fig. 1 50kW_p grid-connected PV station system structure

50kW_p 光伏并网示范电站的系统组成如图 1 所示。垂直安装弧形阳台玻璃幕墙上的 15840W_p 单晶硅半透明光伏组件和在楼顶阳台立柱下的 2400W_p 硒钢铜组件。经计算其总输出功率在北京的气象条件下全年均不会超过 15kW。分为 9 组接入 3 台 SB-5000TL 逆变器并入电网 A 相。分别安装在东、西楼顶阳台太阳房的 4800W_p 半透明多结薄膜电池和 4320W_p 不透明多结薄膜电池各分为 3 组接入 2 台 SB-5000TL 逆变器;安装在前厅立面玻璃幕墙上的 2800W_p 多晶半透明光伏组件同样由于垂直安装角度的原因无法达到其额定功率输出,同安装在后花园温室屋顶的共 2925W_p 单晶硅和硅带(Ribbon Silicon)的光伏组件按组件类型分为 3 组一起接入 1 台 SB-5000TL 逆变器;此 3 台逆变器的输出并联后接入电网 B 相。安装在屋顶网架上的 17280W_p 多晶硅光伏组件接入 1 台 20kW IGBT 单相全桥并网逆变器,其输出并入电网 C 相。

1.3 数据监控系统设计

电站数据采集监控系统的组成结构如图 2 所示。其总体设计思想是利用工业控制模块和数字仪表等设备就近分散采集现场数据,使用串行数据总线技术远程传送到监控计算机进行集中的数据监控和记录^[5]。该系统不仅能够监测和记录电站运行的多个电力参数,保障电站的运行,而且可以监测太阳能电池阵列的电压、电流、结温度等光伏组件运行参数以及太阳辐射、风速、室内外温度等环境参数,除了为今后的科研分析工作提供大量数据,还可以为光伏系统的检测和评价以及分布式能源并网的相关研究提供依据。

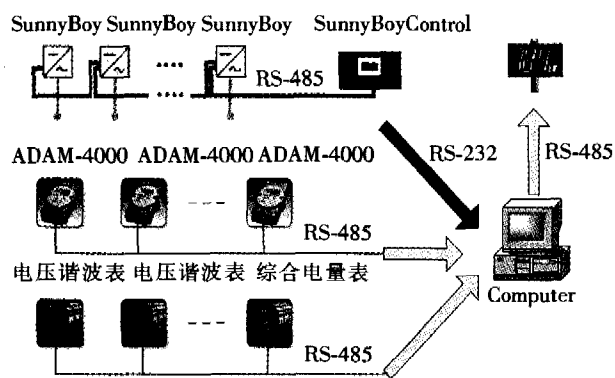


图 2 电站数据采集监控系统结构图

Fig.2 Monitoring system of PV station

SB-5000TL 逆变器本身带有数据采集和通讯功能。将 6 台 SB-5000TL 用 RS-485 串行数据总线连接,通过配套 SB-Control + 控制器存储转发,与监控计算机的 RS-232 串行接口连接,可以采集其 18 路直流输入的电压、电流数值,6 路交流输出的电压、电流、频率、功率因数等数值以及运行状态等数据。20kW IGBT 单相全桥并网逆变器本身不具备通讯功能,它的运行数据由外置的电压电流传感器采集,由 ADAM-4000 系列工控模块变换为数字信号,由 RS-485 串行总线直接送入监控计算机(监控计算机内部加装一块 4 口 RS-485 串行通讯卡)。通过 ADAM-4000 系列工控模块采集传送的信号还包括安装在两路温度传感器测量的环境温度信号、粘贴于不同类型光伏组件背面的温度传感器测量的光伏组件结温度信号、由太阳总辐射表测量的太阳辐照强度信号、风杯测量的风速信号等环境参数。在逆变器接入电网前,由 3 块电压谐波表和 3 块电流谐波表以及 1 块三相综合电量表采集各相的电压电流谐波、电压电流数值,计算三相的总功率、功率因数、累计电度数等数据也是通过 RS-485 串行总线送入监控计算

机的。为了向公众展示的需要,我们还订制了 1 块大型 LED 数码显示屏,可以显示并网光伏电站的一些介绍文字和电站的主要运行参数,数据也通过 RS-485 串行总线传送。

2 运行数据分析

2.1 示范电站发电量分析

光伏电站输出电能的大小跟照射到光伏组件表面的太阳辐射强度成正比。由于太阳辐射强度的变化,光伏电站的输出电量也不恒定^[6]。除太阳辐射强度外,影响光伏电站电能输出的因素还有光伏组件结温、光伏组件表面灰尘累积、各光伏组件的不匹配性、板间连线损耗和传输线损耗等因素^[7,8]。

50kW_p 并网光伏示范电站自 2003 年 11 月投入运行,截至 2005 年 2 月,已累计并网发电 38435kWh。运行期间各部分光伏组件的发电量比较见图 3。

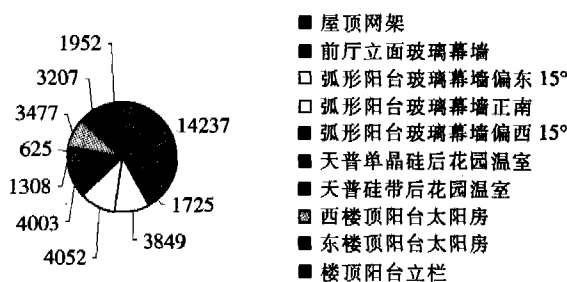


图 3 电站各部分光伏组件发电量比较(kWh)

Fig.3 Comparison with power generation of each part of PV station

2.2 逆变器效率分析

2.2.1 20kW IGBT 单相全桥并网逆变器效率分析

20kW IGBT 单相全桥并网逆变器的额定功率为 20kW,最大工作功率 22kW(时间限制为 1min),直流侧额定输入电压为 390V,最大输入电压为 550V,电网侧为 220V,50Hz。图 4 和图 5 是输入功率和输入电压变化时系统的效率曲线图。

上图可以看出,20kW IGBT 单相全桥并网逆变器的整体效率可以达到 93% 以上,当输出功率在 10kW 左右时效率最高,当系统输出功率低于额定功率 15% 时,效率急剧下降在 85% 左右,效率随输入电压变化的曲线大体类似于效率随功率变化的曲线,电压大于 320V 时效率能保持在 93% 以上,低于 320V 效率就会明显地降低。建议逆变器最好工作在 350V 电压以上,这时输出的功率因素也比较好,为 0.96,接近于 1。

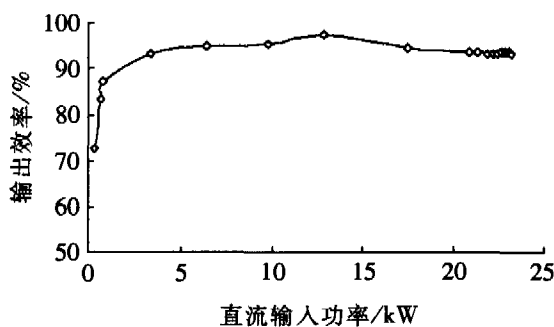


图4 不同输入功率逆变器效率曲线

Fig.4 Output efficiency curve of 20kW

IGBT inverter with different input DC power

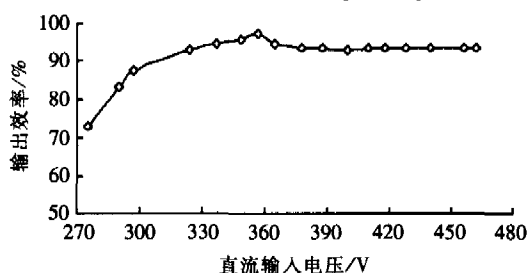


图5 不同输入电压逆变器效率曲线

Fig.5 Output efficiency curve of 20kW

IGBT inverter with different input DC voltage

2.2.2 SB-5000TL 效率分析

SB-5000TL 型并网逆变器是正弦波输出逆变器,输出效率最高达 95.5%,待机损耗只有 0.25W。运行安全可靠,可根据太阳光辐射强度自动投入并网运行和停止并网运行。根据实际运行数据,它的最高输出效率达到 95.72%。

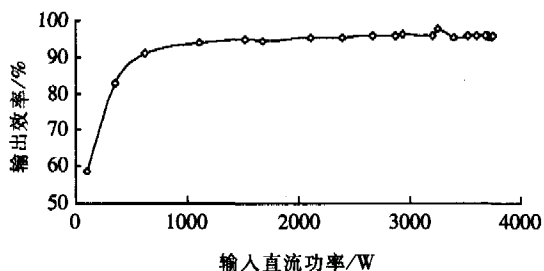


图6 SB-5000TL型并网逆变器输出功率—效率曲线

Fig.6 Output efficiency curve of SB-5000TL

inverter with different input DC power

从图中可以看出,当输入功率较小时输出效率比较低。当输入功率为 184W 时,逆变器的效率仅为 57%;随着输入功率的增加,逆变器的效率增大。当输入功率大于 1000W 时,逆变器的效率超过

90%。

2.3 光伏组件发电分析

2.3.1 不同安装倾角光伏组件发电量分析

如前所述,弧形阳台玻璃幕墙光伏组件的安装倾角是正南 90°,太阳房屋顶光伏组件的安装倾角是正南 15°。由于两种安装倾角的光伏组件容量不同,因此将两组数据进行归一化处理,两种光伏组件平均每千瓦光伏组件月发电量见图 7,图中引用的数据是根据 2004 年电站记录的数据整理。

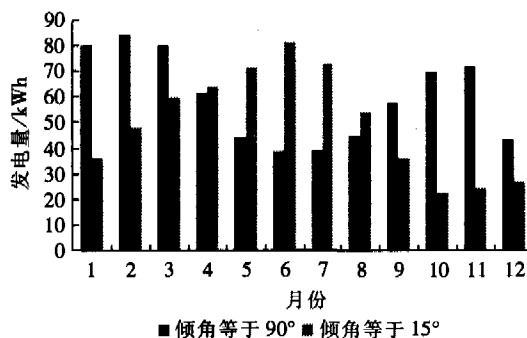


图7 不同倾角光伏组件发电量比较

Fig.7 Comparison of power generation

between PV modules with different tilt angle

从上图可以看出,正南垂直安装的光伏组件电量输出最大值出现在 1~3 月份和 10、11 月份,安装倾角正南 15°的光伏组件电量输出的最大值出现在 5~7 月份。出现这种现象的原因是由于太阳高度角的周期性变化,安装倾角正南 15°的光伏组件夏季吸收的太阳辐射量大于正南垂直安装的光伏组件,而当太阳位于北回归线和南回归线附近时,正南垂直安装的光伏组件吸收的太阳辐射量大于安装倾角正南 15°的光伏组件。

50kW_p 并网光伏示范电站中正南垂直安装的光伏组件平均每千瓦 2004 年累计发电量为 715kWh,正南 15°安装的光伏组件平均每千瓦 2004 年累计发电量为 597 kWh。出现这种差异一方面是因安装倾角不同吸收太阳辐射量不同,另一个主要原因是灰尘累积的影响。垂直安装的光伏组件比正南 15°安装的光伏组件自洁性较好。实际运行表明,垂直安装的光伏组件几乎没有灰尘累积,而正南 15°安装的光伏组件灰尘累积严重。因此,在建设光伏电站时选择合适的光伏组件安装倾角是重要的。

2.3.2 弧形阳台光伏玻璃幕墙发电分析

在弧形阳台的玻璃幕墙处,安装的是采用半透

封装技术的单晶硅太阳能电池组件,它们安装的方位角分别是南偏东 15° 、正南方向、南偏西 15° ,3 个安装方向光伏组件的设计容量均是 $5280W_p$ 。图 8 是 3 个安装方向的光伏组件的输出功率的曲线。

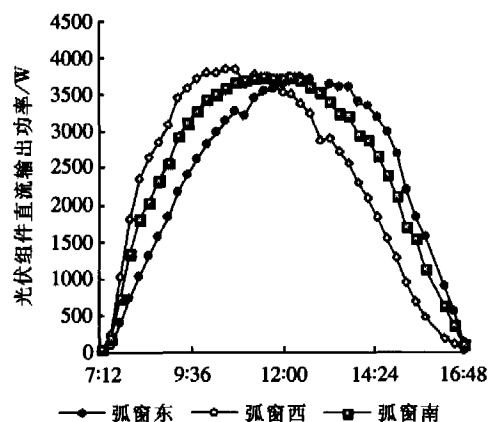


图 8 不同方位角光伏组件输出功率比较

Fig.8 Comparison of output power among PV modules with different azimuth angle

从图中可以看出,在安装方向彼此相差 15° 的条件下,3 个方向的单晶硅光伏组件输出的最大功率相差不大,南偏东 15° 的光伏组件的最大功率输出是 $3839W$,正南方向的光伏组件的最大功率输出是 $3738W$,南偏西 15° 的光伏组件的最大功率输出是 $3742W$ 。达到最大功率的时间各不相同,南偏东 15° 的光伏组件在上午 10:30 达到最大功率,正南方向的光伏组件在上午 11:30 达到最大功率,南偏西 15° 的光伏组件在中午 12:30 达到最大功率。3 个方向光伏组件达到最大功率输出的时间分别相差 1h,也证明我们按照方向分组连接光伏组件的设计方案是合理的。

从试运行期间的累计发电量看,正南方向的光伏组件发电量最多,是 $4052 kWh$;其次是南偏西 15° 的光伏组件, $4003 kWh$;南偏东 15° 的光伏组件的发电量最少, $3849 kWh$,这是因为北京地区清晨时空气中水汽较大,降低了到达地面的太阳辐照度,而傍晚时空气相对干燥空气透明度较高的缘故。因此,在北京设计光伏电站时应该考虑正南方向安装,也可

适当考虑南偏西,但是南偏东方向安装光伏组件的输出效果较差。

3 结 论

“ $50kW_p$ 大型屋顶光伏并网示范电站”在方案设计上选用了多种光伏组件和多种并网逆变器。通过分析可以得出不同的光伏组件由于安装倾角、安装方位角和组件材料的不同,光伏组件输出功率受到不同的影响。并网逆变器的多支路输入式方案设计便于不同参数的光伏组件的接入,并且具有高的转换效率。 $50kW_p$ 光伏并网示范电站的建成和投入运行对太阳能并网光伏发电技术在我国城市中的应用具有重大的推广示范意义。

[参考文献]

- [1] Randall Thomas. Photovoltaics and architecture[M]. London: Spon Press, 2001.
- [2] Roger Messenger, Jerry Ventre. Photovoltaic systems engineering[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000.
- [3] Hanaty, Adel A R. A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991.
- [4] Chowdhury B H. 50 kilowatt distributed grid-connected photovoltaic generation system for the university of wyoming[J]. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997, 1369—1372.
- [5] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2000, 6.
- [6] 李安定. 太阳能光伏发电系统工程[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2001.
- [7] Sidrach-de-Cardona M. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system [J]. Energy (Oxford) 1999, 24 (2):93—102.
- [8] Atmaran, Gobind. Seasonal performance of three grid-connected PV system[A]. Conference record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference v 2 May 1990 Sponsored by: IEEE[C], Electron Devices Soc Publ by IEEE, 1030—1037.

DESIGN AND ANALYSIS OF 50 kW_p GRID-CONNECTED PV STATION

Liu Limin, Cao Zhifeng, Xu Honghua

(*Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing 100080, China*)

Abstract: The '50kW_p Large Scale Grid-Connected PV Station' design and analyses some typical data of the station were presented. One characteristic of the PV station is applying the technology of BIPV (Building Integrated Photovoltaics). The glass wall not only can transit light, but also can give power. In the PV station there are nine PV modules with different materials and different encapsulation technology and there are six tilt angles. Multi-String inverters with MPPT are applied in the PV station. And a set of monitoring system has been put into use. It has taken positive effect to advance the use of BIPV.

Keywords: grid-connected; PV; monitoring system; BIPV

联系人 E-mail: liulimin@mail.iee.ac.cn