

文章编号:0253 – 4339(2016) 05 – 0001 – 09  
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2016. 05. 001

# 太阳能光伏空调研究及进展

陈雪梅 王如竹 李 勇

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

**摘 要** 本文从目前传统空调技术的能量利用效率和光伏发电的光电转换效率的提升说明了太阳能光伏空调广泛应用的主要技术条件已经成熟;从光伏组件价格下降、光伏系统投资回收期缩短和光伏安装占地面积减小说明光伏空调的经济成本已经下降到可与传统空调竞争的范围。文中介绍了四种光伏空调的结构,描述了其实际运行测试的实验过程、各评价指标及运行效果,提出太阳能光伏空调需要深入研究的方向,即高效率的光伏直驱空调、光伏空调与补贴政策、控制策略、行为与节能的关系,以及光伏空调设计软件。

**关键词** 太阳能;光伏;空调系统

**中图分类号:**TK511.3; TU831.3 **文献标识码:** A

## Study and Development of Photovoltaic Air Conditioning System

Chen Xuemei Wang Ruzhu Li Yong

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai,200240, China)

**Abstract** The photovoltaic (PV) air conditioning system is introduced in this paper as well as its classification. Both the high efficiency of the traditional air conditioning system and the improvement of photoelectric conversion efficiency indicate that the main technologies for the extensive applications of PV air conditioning system are available. On the other hand, the investments of PV air conditioning system have been decreased significantly due to the price drop of the PV modules, the shortening of PV system pay-back time and the reduction of total necessary PV module areas. The structures of four kinds of PV air conditioning systems and their test conditions are described in detail here, and the testing results show their satisfying performance. Finally, this paper discusses five issues for our future work, namely, high-efficiency PV direct-driven air conditioning system, subsidy supports for PV air conditioning system, control strategies, the interactions between human behaviors and energy saving of air conditioning system and developing software for designing PV air conditioning system.

**Keywords** solar; photovoltaic; air conditioning system

太阳能光伏空调的概念很早就被提出了,但由于光伏组件效率低和价格高的限制,它在各种太阳能空调中一直处于被忽视的状态<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着光伏组件价格的大幅度下降,光伏空调的初始投资也相应下降,在各种太阳能空调中显示出了价格优势<sup>[4-5]</sup>,其应用价值逐渐得到重视,对它的研究也多了起来,许多实际应用案例证明了它运行稳定、节约市电和性能较高的特点。光伏空调作为庞大的制冷空调市场和潜力巨大的光伏发电市场的结合点,其巨大的市场潜力越来越受到人们的关注。

据统计显示<sup>[6]</sup>,我国建筑能耗占社会总能耗的

27.6%,尤其以建筑空调能耗较大,一般宾馆、写字楼空调能耗约占建筑总能耗的30%~40%,大中型商场空调能耗高达50%。建筑空调的节能已成为国家节能减排的重要内容之一。光伏空调利用储量丰富、分布广泛和清洁的太阳能获得舒适的室内环境,自发自用,不需要或者很少需要电能,其设备简单,运行可靠。另一方面,在没有空调或采暖需求时,并网光伏空调的光伏系统就是一个光伏电站,所发的电量能以显著高于常规电源的上网电价卖出<sup>[7]</sup>,安装光伏系统也能够享受政府的补贴<sup>[8]</sup>。

未来空调的选择必将会越来越多地强调其环

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(5151101162)资助。(The project was supported by the Key Project of the Natural Science Foundation of China for International Academic Exchanges under the Contract(No. 5151101162).)

收稿日期:2015 年 12 月 14 日

— 1 —

境影响,比如二氧化碳的排放。Wang C G 等<sup>[9]</sup>分析了安装于长沙的光伏空调,考虑施工过程的碳排放,与传统空调相比,一台额定制冷量为 7.12 kW 的光伏空调,光伏组件安装容量为 1700 W 时,仅在每年的制冷和供暖季节就能够减少约 0.427 t 碳排放。Otanicar T 等<sup>[4]</sup>比较了多种太阳能空调(光伏空调、吸收式空调、吸附式空调和除湿空调)在其生命周期内(此处均假设为 20 年)的碳排放,研究过程中将集热器或光伏组件、储能装置和制冷剂三部分引起的温室效应也换算成碳排放量,结果发现光伏空调的二氧化碳总排放量最少。可见,光伏空调是环境友好的,能在一定程度上有助于实现节能减排的目标。

中国许多城市面临夏季用电高峰问题,造成过多的电力设备投资,因城市电力紧张出现的“拉闸限电”情况也时有发生,给人们带来诸多不便<sup>[10]</sup>。峰值一般出现在炎热的午后,此时空调负荷最大。而夏季空调负荷最高的时段也对应于光照最强和光伏发电量最大的时段,因此,光伏空调利用阳光做“免费”的热量搬运工,能起到很好的“削峰”作用,从而缓解用电高峰问题。

本文回顾了国内外光伏空调的研究进展,首先介绍了光伏空调的系统及分类,其次从技术成熟和经济成本两个方面说明了光伏空调能够得到推广应用,然后列举了独立光伏空调和并网光伏空调的实际运行案例,各项测试指标显示了其良好的运行效果,最后总结了光伏空调在未来可深入研究的问题。

## 1 光伏空调系统及分类

传统的蒸气压缩式空调利用电网提供的电能驱动压缩机工作,而光伏空调的能量主要来源于光伏阵列,不用或者少用电网的电能。常见的空调种类繁多,家用小型空调有窗式、分体挂壁式、分体柜式等,小型集中空调有风管式系统、冷/热水机组、变制冷剂流量系统等,商用大型集中空调有离心式冷水机组、螺杆式冷水机组等,这些空调形式均可以与光伏阵列结合,设计满足不同制冷量需求的光伏空调。

光伏空调按照是否接入电网可以分为独立型和并网型两种。独立光伏空调不与电网连接,一般配备蓄电池或者缓冲电池以保证能量的持续供应,非常适用于偏远无电地区,主要由光伏阵列、空调设备、蓄电池组或缓冲电池和充放电控制器等组成。其中交流型独立光伏空调应包含逆变器。图 1 所示为交流型独立光伏空调的结构及能量流动的方向。并网光伏空调以电网作为能量缓冲、储存和补给的媒介,主要

由光伏阵列、空调设备和逆变器(直流无逆流系统不需要逆变器)等组成。按照光伏所发的剩余电量是否反馈给电网,并网光伏空调又可以细分为有逆流系统 and 无逆流系统<sup>[11]</sup>。有逆流系统的能量可以在电网与光伏空调之间双向流动,光伏所发的电能优先供空调使用,超出空调需求的电量反馈给电网,不足的电量由电网补充;无逆流系统的能量只在电网与光伏空调之间单向流动,超出空调需求的电量不反馈给电网从而不能被利用,不足的电量由电网补充。图 2 所示为交流型并网有逆流光伏空调的结构及其能量流动的方向。

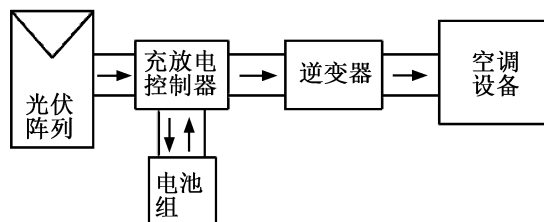


图 1 交流型独立光伏空调结构及能量流动示意图

Fig. 1 AC stand-alone PV air conditioning system and its energy flows

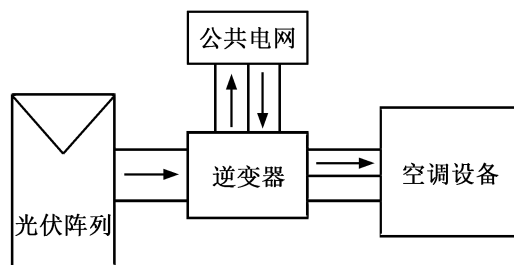


图 2 交流型并网有逆流光伏空调结构及能量流动示意图

Fig. 2 AC grid-connected round-way PV air conditioning system and its energy flows

按照空调设备使用交流电还是直流电,光伏空调可以划分为交流型和全直流型两种。交流型光伏空调可以在传统空调的基础上改造而成,由逆变器将光伏所发的直流电转换为交流电供空调使用。目前处于光伏空调发展的初期,研究者多针对这种光伏空调进行研究。全直流型光伏空调(或称光伏直驱空调)中的空调设备能够不经过逆变器的转换直接利用光伏所发的直流电。在目前的空调设备中,压缩机电机和室内外风机多使用永磁同步电机和直流无刷电机<sup>[12-13]</sup>,电机工作过程中需要将电网的工频交流电转换为直流电,而全直流型光伏空调减少了“直流-交流-直流”的转换,能够提升能量的利用效率<sup>[14]</sup>。最近几年,全直流光伏空调已有生产和应用<sup>[15-16]</sup>。

## 2 技术进展与经济分析

### 2.1 技术成熟

光伏空调是基于光伏发电技术与空调技术发展而来的。空调技术的应用已有近百年历史,传统蒸气压缩式空调一般都有较高的能量利用效率,即能效比(EER)和性能系数(COP)较高,意味着获得单位制冷量或供热量仅需要使用少量电能,使光伏空调需要的光伏电池板安装面积降低,从而经济成本也降低。近年来,采用永磁同步电机驱动的变频空调的应用和普及<sup>[12]</sup>也为利用光伏所发的直流电提供了便利。利用光伏所发的直流电直接驱动空调设备,不经过“直流-交流-直流”的转换,能在一定程度上提高能量的利用效率。

光伏空调的应用也得益于晶硅电池光电转换效率的提高,因为这使得光伏组件的成本与所需的安装面积均大幅度下降。光伏空调一般由安装于屋顶的单晶硅或者多晶硅光伏组件提供电能。目前,多晶硅电池量产效率为 18% ~ 18.5%,单晶硅电池量产效率为 19.8% ~ 21%<sup>[17]</sup>。多晶硅电池的效率普遍较单晶硅的低,但由于多晶硅太阳能电池的生产成本相对较低,发展十分迅速,截至 2011 年,多晶硅太阳能电池的市场份额已经占各类太阳能电池的 57.8%<sup>[18]</sup>。

光伏空调在国内外已经有了实际应用案例,测试结果显示光伏发电和空调耗电有较好的匹配关系,光伏空调有较高的太阳能利用效率,运行中只需要很少或者不需要电网提供的电能,可以起到很好的节电和削峰效果。以下将详细分析几类光伏空调实际的运行情况。

### 2.2 经济成本

初始投资在某种程度上决定了技术的推广。在过去的几十年,光伏电池的价格居高不下,使得光伏发电少人问津。而最近几年,光电转换效率提高,光伏组件价格大幅下降,光伏发电得到越来越多的关注。国际光伏技术路线图(ITRPV-2015)<sup>[19]</sup>给出了光伏组件的价格随光伏产业累计出货量(即光伏生产厂家卖出的光伏组件功率总和)的变化关系以及未来几年的预测结果,如图 3 所示。图中的黑点表示从 1976 年到 2014 年 12 月的光伏组件平均价格与累计出货量的关系。可以看出,尽管在 100 MW<sub>p</sub> 处出现波动,但出货量小于 3.1 GW<sub>p</sub>(截至 2003 年底)时,每个点基本呈线性分布,这表明每次光伏组件的累计出货量翻倍时,平均的卖出价格就会下降 21%。图中有较大差异的黑点是由 2003—2013 年之间的巨

大市场波动造成的。空心圆点表示 ITRPV 对未来几年光伏组件的价格与出货量的预测结果。光伏组件价格的下降扭转了光伏空调的不利局面,初始投资已与其他各种太阳能空调相差不大或者更低<sup>[5]</sup>。据预测,在未来一段时间,光伏空调的初始投资将继续下降,下降幅度将大于其他太阳能空调<sup>[4]</sup>。

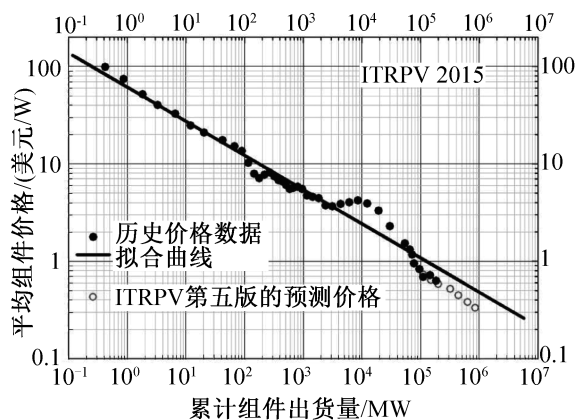


图 3 光伏组件价格与累计出货量的变化关系以及未来的变化趋势<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Learning curve of module price as a function of cumulative PV module shipments with historic price data and the ITRPV 5 th edition cost trend<sup>[19]</sup>

从初始投资的角度来看,光伏空调远高于传统空调,这主要是因为光伏组件的初始投资较高,几乎占整个系统的一半<sup>[4]</sup>。但从整个生命周期来看,光伏空调与传统空调相比的经济效益问题归结于光伏发电部分的回收期问题。考虑政府对光伏发电的补贴政策<sup>[8]</sup>,如果光伏空调所发的电量能得到与光伏电站同样的补贴,经济效益可以比传统空调更好。屋顶光伏发电系统根据不同的运营模式和补贴政策,回收期差异较大。邵汉桥等<sup>[20]</sup>详细分析了居民和工商业分布式光伏电站在我国 I、II 和 III 类太阳能资源地区的经济效益,结果显示光伏系统的静态投资回收期通常为 5 ~ 11 年。按照最近 2 年光伏电池的出货价格以及光伏电站的补贴政策估算,光伏空调的投资回收期有可能降至 3 ~ 5 年。光伏空调的光伏发电部分能在生命周期内收回成本并盈利,使得光伏空调与传统空调相比有更好的经济效益,甚至可以在生命周期内实现全部免费使用的空调。

随着光伏发电的大范围应用,光伏发电的政府补贴必将会越来越少。如果不考虑补贴政策,光伏空调相比于传统空调是否还具有优势呢? 本文首先考虑居民用光伏空调中光伏部分的回收期。利用邵汉桥等<sup>[20]</sup>介绍的武汉某居民用 3 kW 分布式光伏电站为例,总造价为 27 000 元,年发电量为 3 219 kW·h,假



设光伏发电 100% 被空调自用,则平均每个月空调使用光伏电 268.25 kW·h。按照文中调研的阶梯电价计算,年光伏电收益为 1 897 元,扣除 150 元的维护费用后得到 1 747 元,则静态投资回收期为 15.5 年。工商业电价比民用电价高,因此供工商业用户使用的光伏空调会更具吸引力。以邵汉桥等<sup>[20]</sup>研究的武汉某工商业厂房的 200 kW 光伏电站为例,总造价为 180 万元,年发电量为 214 500 kW·h,假设光伏发电 100% 被空调自用。按照文中的工商业电价计算,年光伏电收益为 21.1 万元,扣除 1 万元的维护费用后得到 20.1 万元,则静态投资回收期为 9 年。可以看出,即使完全不考虑光伏的补贴政策,光伏空调相比于传统空调仍然有较明显的优势,尤其是对于工商业用户来说。

光伏空调初始投资的降低,除了由于光伏组件本身价格的降低,也由于较高的空调能量利用效率和光电转换效率使得所需的光伏阵列面积降低。Otanicar T 等<sup>[4]</sup>比较了适于家庭使用(制冷量为 17.58 kW)的多种太阳能空调系统需要的光伏组件或者集热器面积,结果发现光伏空调与其他太阳能空调相比,需要的安装面积最少。Hartmann N 等<sup>[21]</sup>以办公建筑为例,模拟了并网光伏空调和单效 LiBr 吸收式空调相比于传统空调的节能与经济情况,结果显示:节约等量的一次能源,吸收式空调需要的平板集热器面积比光伏空调需要的光伏组件面积约多出六倍。而在均节约 36% 的一次能源的情况下,光伏空调与传统空调相比,投资相当于吸收式空调的 73%。从节约一次能源和经济成本两个方面分析,光伏空调均优于吸收式空调。对于屋顶资源有限的城市居民来说,光伏空调比其他太阳能空调更有吸引力。

### 3 光伏空调典型案例分析

#### 3.1 小型独立光伏空调

小型独立光伏空调系统用蓄电池作为能量存储和缓冲单元,不需要接入电网,通过调节蓄电池和光伏系统的容量比例,便可满足大部分情况的能量需求。该类空调尤其适用于偏远缺电地区单个房间的冷暖需求。其主要缺点是蓄电池的寿命短、投资高,并且如遇到连续的阴雨天气,空调可能因为供电不足而无法使用。

上海交通大学 Li Y 等<sup>[22]</sup>实验研究了独立光伏空调在以上海为代表的夏热冬冷地区的运行情况。实验将一台家用变频空调增加光伏组件、控制器、逆变器和电池组后改造为光伏空调。所增加的光伏组

件的相关参数见表 1,被改造的变频空调的相关参数见表 2,该光伏空调的连接电路与测试点分布如图 4。光伏组件的安装容量为 1.92 kWp,系统安装于面积为 23.5 m<sup>2</sup> 的房间内,空调在白天的运行时间设置为 9:00 ~ 17:00,用以模拟办公建筑的空调使用情况。该系统在夏季某晴朗白天的制冷模式下和冬季某晴朗白天的供暖模式下的实验结果说明:光伏阵列在夏日和冬日实测的光电转换效率分别为 11.9% 和 12.4%,逆变器的实际转换效率为 70% ~ 80%;系统的太阳保证率(solar fraction,即光伏电池板供给的总电量与空调实际耗电量之比)在夏日和冬日分别约为 80% 和 85%,即光伏发电量可以满足建筑物白天的大部分冷热负荷需求,而夏日较高的制冷负荷使得系统的太阳保证率比冬日低;该系统有较高的太阳能利用效率,其COP<sub>solar</sub>(即空调制冷量或供热量与太阳辐射量之比)在夏季制冷时为 0.32,在冬季供暖时为 0.37;太阳能直接利用率(solar direct consumed ratio,即光伏发电量中直接经逆变器被空调利用的部分与光伏总发电量的比值)在夏日和冬日分别为 78% 和 70%,可见夏日的光伏发电与空调耗电有更好的匹配性。

表 1 光伏组件参数<sup>[22]</sup>  
Tab. 1 The parameters of PV module<sup>[22]</sup>

| 参数名称                   | 单位   | 数值    |
|------------------------|------|-------|
| 最大输出功率 $P_{\max}$      | Wp   | 120   |
| 最佳工作电压 $V_{\text{mp}}$ | V    | 17.5  |
| 最佳工作电流 $I_{\text{mp}}$ | A    | 6.86  |
| 开路电压 $V_{\text{oc}}$   | V    | 21.5  |
| 短路电流 $I_{\text{sc}}$   | A    | 7.5   |
| 功率温度系数                 | %/°C | -0.47 |
| 电压温度系数                 | %/°C | -0.38 |
| 电流温度系数                 | %/°C | +0.10 |

表 2 变频空调参数<sup>[22]</sup>  
Tab. 2 The parameters of inverter air conditioner<sup>[22]</sup>

| 参数          | 单位 | 制冷             | 供暖             |
|-------------|----|----------------|----------------|
| 制冷量/制热量(范围) | kW | 2.8(0.8/3.6)   | 3.6(0.8/5.2)   |
| 额定输入功率(范围)  | kW | 0.62(0.17/1.1) | 0.85(0.17/1.4) |
| 最大输入功率      | kW | 1.6            | 1.85           |

#### 3.2 小型并网家用光伏空调

小型并网光伏空调系统用电网作为能量存储和缓冲单元,主要满足单个房间的冷暖需求,根据用户

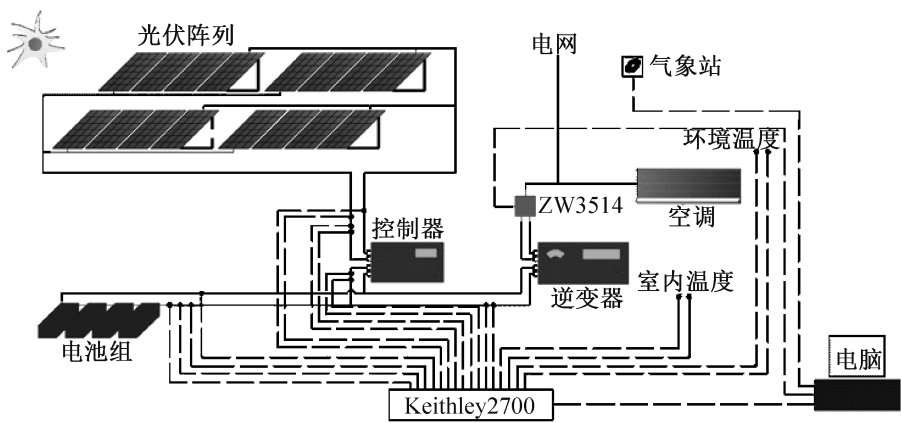


图 4 独立光伏空调连接电路与测试点示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 4 The circuit and test points of stand-alone PV air conditioning system<sup>[22]</sup>

能够提供的光伏安装面积,光伏部分的安装容量可大可小。该类空调与小型独立光伏空调相比造价更低,而且不受连续阴雨天气的限制。

Aguilar F J 等<sup>[23]</sup>将一台家用变频空调器改造为光伏空调,用来研究并网无逆流光伏空调对位于西班牙的某办公建筑的制冷和供热情况,该光伏空调的连接电路及测试点分布见图 5。该光伏空调的光伏系统容量为 0.69 kWp。实验研究了该系统的太阳能贡献率(solar contribution,即光伏空调使用的光伏电量与总耗电量之比),空调设备的制冷能效比 $EER_{EQ}$ 和

供暖性能系数 $COP_{EQ}$ (即制冷量或供暖量与空调设备耗电量之比),以及系统的制冷能效比 $EER_{SYST}$ 和供暖性能系数 $COP_{SYST}$ (即制冷量或供暖量与系统消耗的电网电量之比),制冷季节和供暖季节在不同时间段的各月平均结果列于表 3。该系统在夏季和冬季都能稳定运行,夏季的节能效果明显优于冬季,一方面是因为夏季的制冷能效比较高,即每单位电能可以得到更多制冷量,另一方面是因为夏季太阳能贡献率较高,使得光伏空调比传统空调节约更多电能。

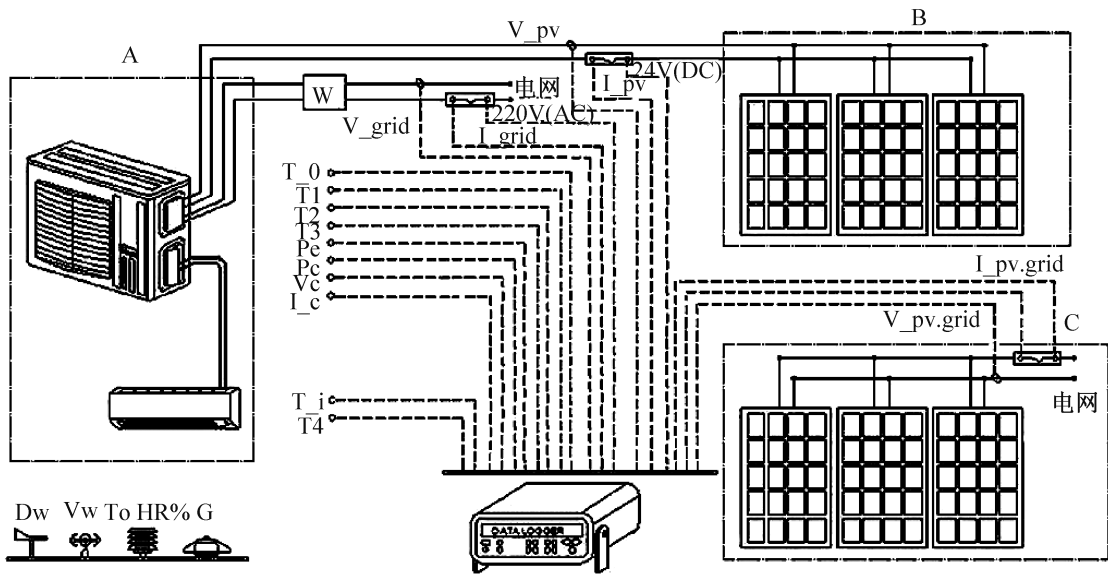


图 5 并网光伏空调连接电路及测试点示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 5 The setup and test points of grid-connected PV air conditioning system<sup>[23]</sup>

### 3.3 小型并网多联机系统

小型并网光伏空调系统非常适合于满足别墅的需求,如屋顶光伏系统设计得当,便可能提供所有的空调用能,余电还能供给其他电器,有望实现家庭

“零耗电”。

光伏直驱变频多联机系统于 2015 年 4 月中旬在上海交通大学中意绿色能源楼(经纬度:31.02°N, 121.44°E)安装和调试完成,实现并网发电。该系统

属于小型并网有逆流空调系统,包含两台制冷量和制热量分别为 33.5 kW 和 37.5 kW 的光伏直驱变频多联机组,该多联机组由格力电器股份有限公司提供,型号为 GMV-Y335WM/A。光伏系统由晶科能源控股有限公司提供的 38 块组件构成,组件型号为 JKM265P-60,总安装容量为 10.07 kW<sub>p</sub>,预计光伏系

统年发电量约为 11 000 kW·h。光伏直驱变频多联机组可以直接利用光伏阵列所发的直流电,避免了“直流-交流-直流”的转换,仅将大于空调负荷的光伏电量进行逆变上网,可以提高能源利用效率。该系统还能够通过“好 e 控”实现能量的侦测、显示和管理,方便用户做出适当的能源决策选择。

表 3 并网光伏空调实验测量结果<sup>[23]</sup>  
Tab. 3 The testing results of grid-connected PV air conditioning system<sup>[23]</sup>

| 项目                                       | 制冷季节(7~10月) |            | 供暖季节(12月&1~3月) |            |
|------------------------------------------|-------------|------------|----------------|------------|
| 工作时间段                                    | 8:00~20:00  | 9:00~17:00 | 8:00~20:00     | 9:00~17:00 |
| 太阳能贡献率                                   | 49.24%      | 62.25%     | 37.60%         | 52.76%     |
| EER <sub>EQ</sub> /EER <sub>EQ</sub>     | 4.75        | 4.48       | 4.11           | 4.01       |
| EER <sub>SYST</sub> /COP <sub>SYST</sub> | 10.97       | 14.15      | 6.75           | 8.78       |

该光伏直驱变频多联机系统自安装以来,运行效果较好。表 4 所示为系统分别在 4 月 12 日和 5 月 20 日的运行情况,表中当天的气温和当天水平面总辐射量由安装于中意绿色能源楼楼顶的气象站提供,其余数据由光伏空调系统的能源管理中心“好 e 控”提供,数据记录时间均为下午 16:40 左右。这两日的最高气温均出现在午后 14:00 左右,由于气候并不炎热,空调的当天耗电量较小,光伏发电满足空调的负荷之后,仍然有较多的电量经室外机的逆变单元逆变之后输入电网。

表 4 光伏直驱变频多联机系统在 2015 年 4 月 12 日和 5 月 20 日的运行情况  
Tab. 4 Running conditions of the PV direct-driven inverter multi VRF system on April 12th and May 20th, 2009

| 项目                             | 2015 年 4 月 | 2015 年 5 月 |
|--------------------------------|------------|------------|
|                                | 12 日 16:46 | 20 日 16:39 |
| 当天最高气温/℃                       | 20.5       | 28.2       |
| 光伏发电功率/kW                      | 1.91       | 1.24       |
| 空调耗电功率/kW                      | 0.06       | 0.03       |
| 向电网供电功率/kW                     | 1.85       | 1.21       |
| 当天水平面总辐射量/(MJ/m <sup>2</sup> ) | 21.649     | 20.205     |
| 光伏当天发电量/(kW·h)                 | 15.294     | 12.612     |
| 空调当天耗电量/(kW·h)                 | 6.704      | 5.754      |
| 向电网当天供电量/(kW·h)                | 8.590      | 6.858      |

3.4 大型并网光伏空调

大型并网光伏空调系统对工业建筑的用户吸引力最大。因为工业建筑内部对空调的需求量很大,加

上工业用电的电费比居民用电的高,导致每年的电费很高。而工业建筑常常有很大的屋顶空间,如果能铺上光伏阵列,光伏空调自发自用,便能节省很大的电费开支。

珠海某办公楼工程总面积约 8 000 m<sup>2</sup>,建筑冷负荷为 2 790 kW。该办公楼安装的 400 kW 光伏直驱变频离心机系统<sup>[14]</sup>截至 2015 年 10 月已稳定运行了两年,该系统属于并网有逆流系统,系统结构见图 6。其光伏安装容量为 390.5 kW<sub>p</sub>,年发电量约 40 万 kW·h。图 7 所示为该系统在空调使用季节(5~10 月)的发用电情况,仅在空调使用季节光伏发电量总计为 17.9 万 kW·h,空调耗电量为 14.1 万 kW·h,实现了能量的自给自足。在非空调使用季节,该系统的光伏阵列相当于光伏电站,所发的电能可全部供给电网或者供给办公楼的其他电器,能够获得较好的经济效益。该系统使用了无 DC/DC 的光伏直驱控制技术和三元换流控制策略,与光伏发电加空调系统的模式相比,能量利用效率提高了 6%~8%。

4 需要深入研究的问题

光伏空调在未来将有助于有效解决能源和环境等相关问题,但目前对光伏空调的研究才刚刚起步,大部分研究均局限于讨论光伏空调应用的可行性。光伏技术和空调技术均已较长的应用时间和较广的应用范围,两者的结合(即光伏空调)也有许多实际的应用案例。光伏组件的价格下降以后,光伏空调的经济成本大幅度下降,在未来还有很大的降价空间。



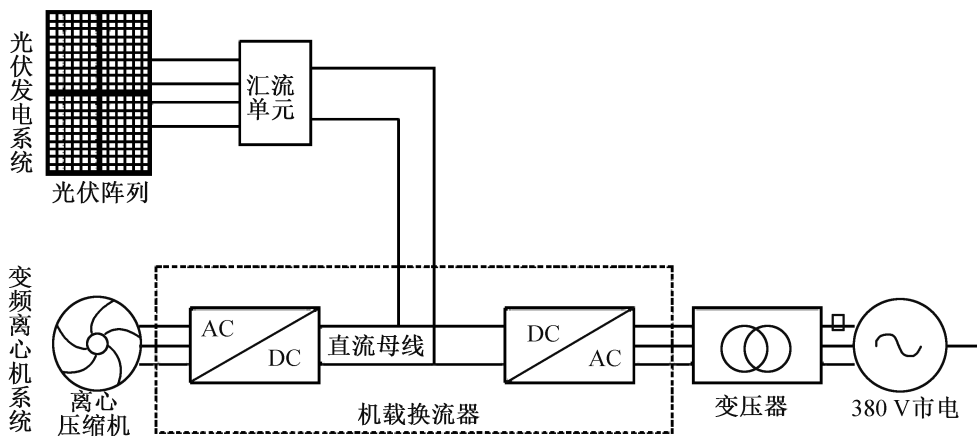


图 6 光伏直驱变频离心机系统结构图<sup>[14]</sup>

Fig. 6 The structure of PV direct-driven inverter centrifugal system<sup>[14]</sup>

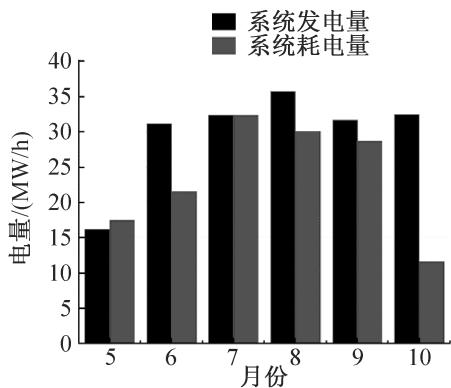


图 7 光伏直驱变频离心机系统发用电统计图<sup>[14]</sup>

Fig. 7 The power generation and consumption of PV direct-driven inverter centrifugal system<sup>[14]</sup>

国内外研究者通过实验验证了光伏空调能够稳定运行,实验和模拟结果显示光伏空调有较高的能量利用效率。各方面均显示光伏空调的实际应用是可行的。迫于能源和环境的压力,光伏空调在未来必将得到更加广泛的应用,但仍然还有很多工作要做。

1) 对并网有逆流系统而言,交流型光伏空调的能量损失比全直流光伏空调大,原因在于:逆变器将直流电转换为交流电和空调内部再将交流电转换为直流电。逆变器的最大效率虽然能够达到 97% ~ 99%<sup>[24-25]</sup>,但在工程实例中,其实际效率通常偏低,特别是逆变器输入功率较小的情况<sup>[26-27]</sup>。此外,目前变频空调已经得到普及,其压缩机电机基本为永磁同步电机<sup>[12]</sup>,在工作时空调内部会经历一个将电网的工频交流电转换成直流电的过程,该过程对应一定的电能损失。用光伏所发的直流电直接驱动的全直流光伏空调(即光伏直驱空调)相比于交流型光伏空调,可以省去“直流-交流-直流”的转换过程。因此,根据光伏发电的特点,设计发电和用电高度匹配度高

的光伏直驱空调从而提高能量利用效率将是未来研究的一个重点。

2) 为了缩短光伏系统的投资回收期,研究设计电量管理策略时应该将光伏空调与补贴政策相结合。由于并网有逆流光伏空调的光伏电大部分没有反馈进入公共电网,而是直接被空调利用,该部分光伏电便不能享受到光伏并网发电的补贴政策,从而造成一定的经济损失。因此,针对光伏空调的特点制定相应的计量和补贴政策,从而鼓励其推广和应用,就变得十分必要。

3) 光伏空调的复杂功能和高能量利用率的实现依赖有效的控制策略,实现针对性强的控制策略将是未来的一个研究重点。以并网有逆流系统为例,首先光伏发电具有不稳定的特点,空调耗电也处于动态变化中,为了使能量达到平衡,电网在供电与受电之间动态转换,则要求控制策略实现能量的快速高效管理,并且不对电网造成较大冲击;其次,为了获得最大的经济效益,控制策略将有助于根据买进和卖出的电价政策实现光伏电的上网控制,以及空调优先使用光伏电还是市电;最后,光伏空调有可能成为建筑的能量管理中心,智能的控制策略将能够记录和分析建筑能量使用情况,从而改善能量管理方式实现建筑节能。

4) 空调节能的研究,不应该局限于对空调技术的研究,还应该研究人的行为习惯与空调节能的关系。有研究发现<sup>[28]</sup>,节能行为对降低空调能耗有较大作用,因此有必要通过研究行为习惯与空调的关系设计有效的节能运行模式以及引导人们的节能行为。

5) 太阳能光伏空调的推广应用必须充分考虑所在地点的经纬度、太阳能资源、建筑物朝向、建筑物热负荷等综合情况,结合全生命周期以及能源价格等,

通过模拟分析获得最优的太阳能光伏系统和空调系统的电力配置方案是应该重点考虑的实际问题。相关设计软件的开发和应用能够帮助设计人员做出最优化的配置方案,并通过模拟分析明确地告知用户太阳能光伏空调系统的发用电量、投资回报和系统效率等情况。

## 5 结论

随着光伏发电技术和空调技术日趋成熟,光伏组件价格的下降和效率的提高,以及光伏系统的补贴政策等因素,光伏空调相比于传统空调有很明显的优势,特别是针对工商业用户。通过几类常见光伏空调系统的实际运行案例和各项测试指标均显示了其良好的运行效果。未来尚需进一步研究光伏发电和空调耗电高度匹配的光伏直驱空调以提高能量的利用效率,针对光伏空调自发自用的特点制定合适的计量和补贴政策以鼓励光伏空调的推广应用,制定光伏空调的智能控制策略以实现其稳定运行、最大经济效益和建筑的能源管理,研究行为习惯与空调节能的关系,以及开发光伏空调的设计模拟软件。

### 参考文献

- [1] 李戡洪,马伟斌,江晴.我国首座大型太阳能空调系统[J].制冷学报,1999,20(2):25-30. (LI Jianhong, MA Weibin, JIANG Qing. The first large solar air-conditioning system in China[J]. Journal of Refrigeration, 1999, 20(2): 25-30.)
- [2] 李欣,罗军.绿色建筑中的空调应用技术[J].制冷与空调(北京),2006,6(5):10-13. (LI Xin, LUO Jun. Application of air-conditioning technique to green architecture[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(5): 10-13.)
- [3] 杨坚,栗志,李芷昕.太阳能制冷技术的应用及发展趋势[J].能源科学进展,2007,3(2):7-11. (YANG Jian, LI Zhi, LI Zhixin. Application and developing trend of solar cooling technologies[J]. Advances in Energy Sciences, 2007, 3(2): 7-11.)
- [4] Otanicar T, Taylor R A, Phelan P E. Prospects for solar cooling-An economic and environmental assessment[J]. Solar Energy, 2012, 86(5): 1287-1299.
- [5] Lazzarin R M. Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 39: 38-47.
- [6] 温宇光.浅谈暖通空调系统节能的若干问题及措施[J].建材与装饰,2007(12X):3-5. (WEN Yuguang. Some issues and measures for the energy saving of HVAC system[J]. Construction Materials and Decoration, 2007 (12X): 3-5.)
- [7] 黄海涛,顾群音,曹伟.分布式光伏上网电价国际经验及其对我国的启示[J].价格月刊,2014(5):1-4. (HUANG Haitao, GU Qunyin, CAO Wei. International experiences of distributed photovoltaic feed-in tariff and its enlightenment to China[J]. Prices Monthly, 2014(5): 1-4.)
- [8] 中国8省15市光伏补贴政策一览[EB/OL]. (2015) [2015-10-10]. <http://www.jinkosolar-shop.com/page.php?m=jinko&id=27>.
- [9] Wang C G, Gong G C, Su H, et al. Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-south China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 1190-1197.
- [10] 邢碧云,梁静,卫婧菲.论夏季用电高峰分段配电的必要性[J].科技资讯,2014(6):131,136. (XING Biyun, LIANG Jing, WEI Jingfei. The necessity of time subsection during the summer peak of electricity consumption[J]. Science and Technology Information, 2014(6): 131, 136.)
- [11] 吕光昭,李勇,代彦军,等.独立光伏空调系统冬季采暖性能分析[J].太阳能学报,2013,34(7):1166-1171. (LYU Guangzhao, LI Yong, DAI Yanjun, et al. Analysis on the heating performance of photovoltaic air conditioning system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1166-1171.)
- [12] 张斯瑶.变频空调压缩机电机的参数辨识[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [13] 李善根.变频控制在空调中的应用现状与发展趋势(一)[J].电源世界,2015(4):49-53. (LI Shangen. Variable frequency control technology in the application status and development trend of air conditioning[J]. The World of Power Supply, 2015(4): 49-53.)
- [14] 张海波.光伏直驱变频离心机系统技术介绍[J].洁净与空调技术,2014(3):82-84. (ZHANG Haibo. Introduction to the technique of photo voltaically driven centrifuger system with frequency conversion[J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2014(3): 82-84.)
- [15] 吕光昭.独立光伏空调系统的研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [16] 能发电的用电大户格力光伏直驱变频中央空调盛夏热销[EB/OL]. (2015-07-30) [2015-10-10]. <http://www.qianhuaweb.com/2015/0730/2878503.shtml>.
- [17] 提升效率、降低衰减是提高光伏发电性价比的关键突破口(2)[EB/OL]. (2015-09-16) [2015-10-10]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20150916/664059-2.shtml>.
- [18] 沈文忠.太阳能光伏技术与应用[M].上海:上海交通大学出版社,2013:32.
- [19] Metz A, Demenik G, Richter A, et al. International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV)[EB/OL]. (2015-



- 04) [2015-10]. <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>.
- [20] 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(7): 51-57. (SHAO Hanqiao, ZHANG Ji, ZHANG Wei. Economy and policy analysis of distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 51-57.)
- [21] Hartmann N, Glueck C, Schmidt F P. Solar cooling for small office buildings: Comparison of solar thermal and photovoltaic options for two different European climates [J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1329-1338.
- [22] Li Y, Zhang G, Lv G Z, et al. Performance study of a solar photovoltaic air conditioner in the hot summer and cold winter zone [J]. Solar Energy, 2015, 117: 167-179.
- [23] Aguilar F J, Quiles P V, Aledo S. Operation and energy efficiency of a hybrid air conditioner simultaneously connected to the grid and to photovoltaic panels [J]. Energy Procedia, 2014, 48: 768-777.
- [24] 组串式光伏逆变器[EB/OL]. (2015) [2015-10-10]. <http://www.sungrowpower.com/product.php?page=1&menu=1&cate=12>.
- [25] 王亮. 组串式逆变器在大型并网电站中应用的经济可行性[J]. 有色冶金节能, 2014, 30(3): 56-58. (WANG Liang. The economic viability analysis of string inverter used in large-scale grid-connected PV power station [J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2014, 30(3): 56-58.)
- [26] 刘小平, 王丽娟, 王炳楠, 等. 光伏并网逆变器户外实证性测试技术初探[J]. 新能源进展, 2015, 3(1): 33-37. (LIU Xiaoping, WANG Lijuan, WANG Bingnan, et al. Preliminary study on outdoor testing technology of photovoltaic grid-connected inverter [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, 3(1): 33-37.)
- [27] 何志诚, 吕建, 杨洪兴. 50kWp 屋顶分布式光伏并网发电系统的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2014, 33(5): 71-73. (HE Zhicheng, LYU Jian, YANG Hongxing. The study of a 50 kWp residential rooftop distributed PV system [J]. Building Energy & Environment, 2014, 33(5): 71-73.)
- [28] 李兆坚, 江亿. 我国城镇住宅夏季空调能耗状况分析[J]. 暖通空调, 2009, 39(5): 82-88. (LI Zhaojian, JIANG Yi. Analysis on cooling energy consumption of residential buildings in China's urban areas [J]. Journal of HV&AC, 2009, 39(5): 82-88.)

#### 通信作者简介

王如竹, 男, 教授, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, (021)34206548, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn. 研究方向: 制冷空调中的能源利用; 低品位热能制冷技术; 太阳能与自然能源利用与建筑节能; 低温传热与低温系统。

#### About the corresponding author

Wang Ruzhu, male, professor in solar cooling, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 10-34206548, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn. Research fields: energy reuse in air conditioning system; thermally driven refrigeration technologies by low-grade heat; utilization of sustainable energy and energy saving in buildings; cryogenic heat transfer and cryogenic system.