

文章编号:0254-0096(2018)10-2821-10

# 分布式光伏空调系统部件匹配及运行特性分析

罗 熙<sup>1</sup>, 苏坤焯<sup>1</sup>, 徐永锋<sup>1,2</sup>, 李 明<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650500; 2. 浙江省太阳能产品质量检验中心, 海宁 314416)

**摘 要:** 构建分布式光伏能源驱动空调系统, 建立数学模型分析光伏能源系统与空调制冷采暖性能的匹配耦合特性, 并开展实验研究工作。研究表明, 作为分布式光伏空调系统主要特性参数的制冷效率及制热效率分别为 0.37 和 0.35, 采用分布式光伏驱动空调运行的保障率最高为 1.41。通过模拟计算优化系统各部件参数的优化匹配, 系统性能可提升 17.14%。结合中国暖通空调标准, 采用典型气象条件, 模拟分析北京、昆明和曼谷 3 个地区的分布式光伏空调的运行特性及关联部件参数配比优化关系, 还对分布式光伏空调系统在不同地区的经济性能进行对比分析。研究结果可为分布式光伏空调系统的设计及应用提供理论分析基础及选择依据。

**关键词:** 光伏; 空调; 模拟; 特性参数; 性能

**中图分类号:** TK519; TB61\*6 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着经济快速发展, 建筑能耗日益增大, 导致空调能耗已占到建筑总能耗的 50%~60%<sup>[1]</sup>; 因此空调节能是降低建筑总能耗的重点之一<sup>[2]</sup>。近年来光伏发电技术日益成熟, 随着光电转换效率不断提升、系统部件制造工艺日益成熟及光伏组件成本持续降低, 光伏空调的研究及应用备受关注<sup>[3-6]</sup>。

国外, Castellanos 等<sup>[7]</sup>设计优化了一种可再生能源系统 (IRES) 离网系统用于满足农村电力需求; Kamel 等<sup>[8]</sup>提出新型除湿太阳能空调系统; Balaji 等<sup>[9]</sup>提出在空调外机工质管道处加纳米流体的板式换热器的高效空调系统, 能将系统空调部件效率提升 31%; 新型光伏并网<sup>[10,11]</sup>、可调速度不对称两相感应电动机驱动光伏供电的空调系统<sup>[12]</sup>的研究结果解决了光伏能源驱动空调系统的技术难题。国内, 上海交通大学制冷与低温工程研究所对光伏空调系统冬季采暖性能进行了分析<sup>[13]</sup>; 合肥工业大学提出光伏空调系统各参量的优化配置方法<sup>[14]</sup>; 国网宁夏电力公司电力科学研究院提出基于宁夏地区光伏并网系统暂态功率特性及电压控制的新型控制方法<sup>[15]</sup>; 安徽建筑工业学院就光伏/光热一体

化空调整体运行性能进行数值模拟, 并给出系统运行控制的策略<sup>[16]</sup>。国内外的研究集中在系统整体性能优化方面。对于部件匹配耦合对系统性能影响及对分布式光伏空调系统在不同地区的使用性能、配比参数尚缺乏深入研究。

为解决上述问题, 本文建立数学模型分析计算系统部件匹配性及系统在不同地区典型气候条件下运行的特性及经济性能, 为分布式独立光伏空调系统的应用提供参考。

## 1 系统构建及系统特性测试

如图 1 所示, 所构建的分布式光伏空调系统, 主要由光伏组件、控制器、逆变器、蓄电池、空调机组等部件组成。光伏组件接收到太阳辐射能通过光生伏特效应产生的电能通过控制器和逆变器转化为 220 V 交流电为空调主机供电, 剩余的电能可通过控制器存储进蓄电池, 以备太阳辐射较低或无辐照情况下供给空调运行。系统结构及原理如图 1 所示, 系统构建流程如图 2 所示。

分布式光伏空调系统为一间占地 23.3 m<sup>2</sup>, 体积 88.3 m<sup>3</sup> 的办公室供能。该办公室的东面由隔断木墙和玻璃以及砼墙组成, 西面为砼墙, 南面由一扇

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金(2018JS147)

通信作者: 罗 熙(1982—), 男, 硕士、讲师, 主要从事太阳能利用方面的研究。luoxi303@126.com

木门和一扇玻璃和砼墙组成,北面由一扇玻璃窗和砼墙组成,光伏组件架设在室外平台。

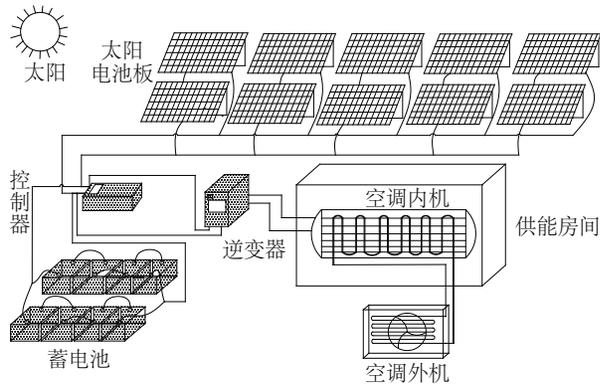


图1 户用分布式光伏空调系统结构及工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of household distributed photovoltaic air conditioning system

由图2系统流程及部件参数的计算与设备选型匹配,得到各组成部件的特性参数如表1所示。图2中  $Q_L$  为空调日耗电量, Ah;  $P_L$  为空调的平均运

行功率, W;  $U_L$  为空调运行电压, V;  $\eta_e$  为光伏阵列的光电转换效率;  $t_L$  为空调每天运行的时间, h;  $C$  为逆变器容量, W;  $P$  为逆变器的负载功率, W;  $PF$  为逆变器功率因数;  $\eta_{inv}$  为逆变器逆变效率;  $Q_B$  为蓄电池容量, Ah;  $N_s$  为蓄电池单独供电运行时间;  $DOD$  为蓄电池放电深度;  $f_c$  为蓄电池充放电效率。

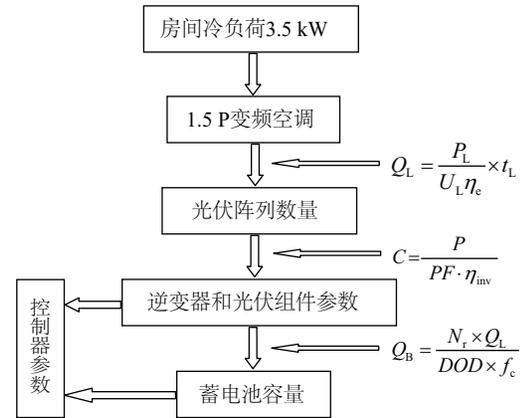


图2 部件选型流程

Fig. 2 Selection process of system components

表1 户用分布式光伏空调系统部件参数

Table 1 Parameters of household distributed photovoltaic air conditioning system

部件名称	部件型号	参数	数值
电池板阵列	JN-DJB-245	额定功率/kW	2.45(2个串,5组并)
控制器	PHOCOS-PL-60	额定电压/V	48
		最大电流/A	60
逆变器	科方电源 KFN48-3000C	额定电压/V	48
		额定容量/kW	2
蓄电池	华富 6-GFMJ-65	额定电压/V	48(4只串,2组并)
		额定容量/Ah	130
1.5 P变频空调	格力Q系列 KFR-32G/(32580)FNX-A3	制冷输入功率/kW	0.1~1.4
		制热输入功率/kW	0.19~1.57

2014年9月~2015年8月对所构建的系统运行1a的光伏组件月平均发电量、平均气温及太阳辐照度、空调运行模式、系统效率、保障率等进行实验测试。

系统效率主要为采用分布式光伏驱动空调制冷或制热过程的效率,其中制冷/制热系数为房间内供给的冷量/热量总和与当天累积辐照量的比值。通常情况下,户用空调系统每天运行时间约

为10h,白天的上班时段,光伏发电量储存在蓄电池内,19:30采用蓄电池供电驱动空调运行至次日05:30,因此当分布式光伏能源当天蓄存的能量正好满足空调运行10h,此时太阳能保障率为1。

实验结果发现该户用独立光伏空调系统稳定性较好,各组成部件选型匹配得当。系统运行测试数据如表2所示。

表2 分布式光伏空调系统测试结果

Table 2 Test results for distributed photovoltaic air conditioning system

参数	2014-09	2014-10	2014-11	2014-12	2015-01	2015-02	2015-03	2015-04	2015-05	2015-06	2015-07	2015-08
月平均辐照/ kWh·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>	4.13	3.75	3.79	3.78	4.34	5.09	5.63	6.19	5.50	5.00	4.51	4.52
月平均发电量/ kWh·d <sup>-1</sup>	8.67	7.88	7.96	7.94	9.11	10.69	11.82	13.00	11.55	10.50	9.47	9.49
月平均温度/℃	18.12	15.33	11.34	8.29	7.85	9.94	14.27	18.35	19.92	20.47	20.35	13.12
空调运行模式	自动	自动	制热	制热	制热	制热	自动	制冷	制冷	制冷	制冷	自动
平均系统效率	0.07	0.18	0.23	0.33	0.34	0.33	0.07	0.35	0.34	0.37	0.36	0.08
平均保障率	0.85	1.24	1.12	1.08	1.19	1.13	1.41	1.25	1.18	1.09	0.93	0.71

注:系统设计时规定,户用分布式光伏能源系统全天发电量驱动空调运行 10 h,保障率为 1.00。

实验结果表明,昆明地区月平均累计辐照量最大值为 4 月份的 6.19 kWh/(m<sup>2</sup>·d),同时 4 月份的月平均发电量 13.00 kWh/d,也为最大值;最小值为 10 月份的 3.75 kWh/(m<sup>2</sup>·d),相应的发电量为 7.88 kWh/d,为全年最小值。昆明地区月平均温度变化量不大,最大值为 6 月份的 20.47 ℃,最小值为 1 月份的 7.85 ℃。最大制冷系数为 6 月份的 0.37,相应的平均保障率为 1.09;最大制热系数为 1 月份的 0.34,相应的平均保障率为 1.19。实验结果还表明,当太阳辐照度达到 675 W/m<sup>2</sup>时,系统的发电量可满足空调用能需求,且辐照度超过 675 W/m<sup>2</sup>的时长达到 4 h 后,光伏组件 1 d 的发电量可驱动空调运行 24 h。

在峰值辐照时,每 m<sup>2</sup>光伏组件的板制冷量为 430 W,制热量为 400 W。

## 2 系统部件模型建立

为进一步分析系统性能及各组成部件匹配特性,建立分布式光伏空调系统各部件数学模型。

### 2.1 光伏组件输出特性模型

光伏组件主要作用是将太阳能转换为电能,为空调提供动力或为蓄电池充电。其输出性能对光伏空调整体性能影响较大,光伏组件输出电流为<sup>[17,18]</sup>:

$$I_s = N_n \cdot D \left\{ P_1 G \left[ 1 - P_2 (G - G_r) + P_3 (T_c + p(1 + vT_c)(1 - rV_w)G - T_r) \right] - B (T_c + p(1 + vT_c)(1 - rV_w)G)^3 \right. \\ \left. \left[ \exp \left( - \frac{E_{go}}{\kappa (T_c + p(1 + vT_c)(1 - rV_w)G)} \right) \right] \right\} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \left( N_p V_s + \frac{I_s R_s N_p}{N_n} \right)}{N_p A \kappa (T_c + p(1 + vT_c)(1 - rV_w)G)} \right) - 1 \right] - \left( \frac{N_p V_s + \frac{I_s R_s N_p}{N_n}}{\frac{N_p R_s}{N_n}} \right) \quad (1)$$

式中, $I_s$ ——光伏组件输出电流,A; $N_n$ 、 $N_p$ ——系统电池板串并联数量; $V_s$ ——光伏组件输出电压,V; $A$ ——二极管特性因子,取值 1.0~3.0; $D$ ——常数,取  $2.8 \times 10^{-7}$ ; $R_s$ ——光伏组件的串联电阻,取  $0.008 \Omega$ ; $p$ 、 $v$ 、 $r$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ——常数; $B$ ——材料参数; $E_{go}$ ——光伏组件基底材料的禁带宽度,取 1.16 eV; $T_c$ ——环境温度,℃; $V_w$ ——风速,m/s。

### 2.2 控制器数学模型

控制器是光伏发电系统的核心部件之一,具有

防蓄电池过充放电、防电池板反接、防短路、防雷击、控制电能的分配等功能;控制器控制逻辑如式(2)所示<sup>[4,17]</sup>。

$$I_b = [I_s(BO) + (1 - FOL)(1 - BO) - I_L(1 - LVD) - a + b] \times c \quad (2)$$

式中, $I_b$ ——蓄电池电流(充电为正,放电为负),A; $I_s$ ——电池板电流,A; $BO$ ——强制充电模式,取 0 或 1; $FOL$ ——浮充模式,取 0 或 1; $I_L$ ——负载电流,A; $LVD$ ——欠压保护模式,取 0 或 1; $a$ 、 $b$ 、 $c$ ——常数。

### 2.3 逆变器数学模型

逆变器是直流电能转变成交流电能的变流装置,逆变器模型<sup>[5,17]</sup>:

$$P_i = \frac{I_0^2 R_{load} + P_s + P_c + I_0^2 R_{copper}}{5} \quad (3)$$

式中,  $I_0$ ——输出电流, A;  $R_{load}$ ——负载电阻,  $\Omega$ ;  $R_{copper}$ ——变压器电阻,  $\Omega$ ;  $P_c$ ——铜损;  $P_s$ ——功率损失, W;  $P_i$ ——输入功率, W。

### 2.4 蓄电池数学模型

蓄电池具有存储多余能量、提供启动电流、缓冲等作用;蓄电池充放电特性参数计算公式为<sup>[17]</sup>:

$$V_B = (V_f - 2.2) + C \lg \left[ SOC_0 + \left( \frac{Q}{BC} \right) \right] + I_B [r_1 + r_2(SOC)] [r_3 + r_4(SOC)]^{-1} \quad (4)$$

式中,  $V_B$ ——放电电压, V;  $V_f$ ——浮充电压, V;  $R_B$ ——蓄电池内部电阻,  $\Omega$ ;  $Q$ ——电荷总量, C;  $SOC_0$ ——初始容量, Ah;  $V_{oc}$ ——开路电压, V;  $BC$ ——总容量, C;  $SOC$ ——蓄电池荷电状态, Ah;  $C, r_1, r_2, r_3, r_4$ ——经验常数。

### 2.5 空调运行特性参数模型

户用分布式独立光伏空调系统中,空调部件为最终能耗终端,空调能耗主要集中在压缩机及风机部分,空调运行过程中的能量平衡方程为<sup>[9,17,18]</sup>:

$$\frac{\delta Q_{ext}}{\delta t} = \frac{(COP)\eta_{oc} P_c [BO + (1 - FOL)(1 - BO)]}{G \cdot \left[ \frac{I_B}{c} + I_L(1 - LVD) + a \right]} \quad (5)$$

$$(T_n \cdot T_w \cdot T_g \cdot p_g)^b \cdot d$$

式中,  $Q_{ext}$ ——室内冷、热负荷, J;  $t$ ——空调压缩机工作时间, s;  $COP$ ——空调能效比;  $\eta_{oc}$ ——压缩机总效率;  $P_c$ ——压缩机功耗, W;  $G$ ——太阳辐照度,  $W/m^2$ ;  $T_n, T_w, T_g, p_g$ ——室内温度(K)、室外温度(K)、制冷工质温度(K)、制冷工质压力(Pa);  $a, b, c, d$ ——常数。

### 2.6 系统能量分配

图3为系统热阻网络图。图中  $G$  为单位时间内太阳辐射能量, W;  $G_{mon}$  为单位时间内电池板产出的电能, W;  $G_k$  为单位时间内通过控制器的能量, W;  $G_b$  为单位时间内蓄电池所存储的能量, W;  $G_n$  为单位时间内通过逆变器的能量, W;  $G_a$  为单位时间内

空调所接收到的能量, W;  $G_o$  为单位时间内室内接收的能量, W;  $U_{a-wr}$  为太阳到光伏阵列的能量传递系数, W/K;  $U_{b-wr}$  为光伏阵列到控制器的能量传递系数, W/K;  $U_{ca-wr}$  为控制器到蓄电池的能量传递系数, W/K;  $U_{cb-wr}$  为控制器到逆变器的能量传递系数, W/K;  $U_{cc-wr}$  为蓄电池到逆变器的能量传递系数, W/K;  $U_{d-wr}$  为逆变器到空调的能量传递系数, W/K;  $U_{e-wr}$  为空调到房间的能量传递系数, W/K。由上述热阻网络可得到室内温度  $T_a$ 。

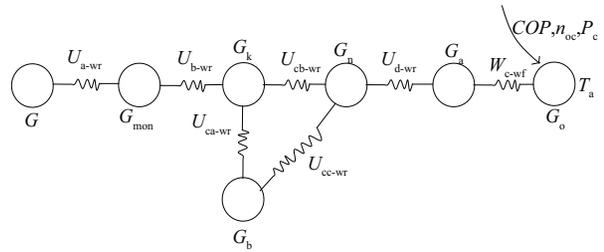


图3 系统热阻网络

Fig. 3 System thermal resistance network

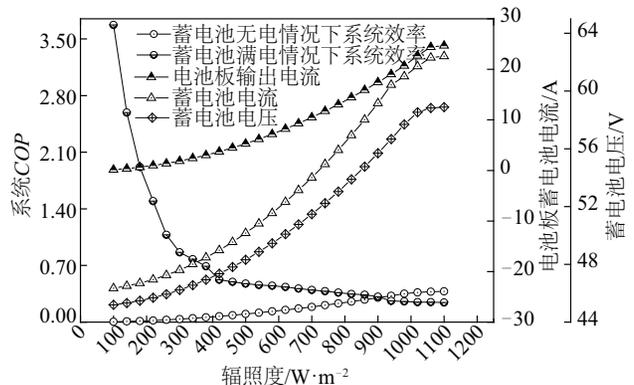
$$T_a = \frac{mc_p \cdot \frac{dT_e}{dt} + P_c}{U_A} - T_e \quad (6)$$

式中,  $mc_p$ ——室内热容, J/K;  $T_e$ ——室外温度, K;  $P_c$ ——逆变器损失功率, W;  $U_A$ ——室内温度  $T_a$  时房间的传热系数, W/K;  $t$ ——房间供能时间, s。

## 3 理论计算与实验测试

### 3.1 理论计算

采用 Matlab 编程模拟计算系统运行效率及系统部件间的特性参数变化情况,计算结果如图4所示。



a. 辐照度对系统特性参数的影响

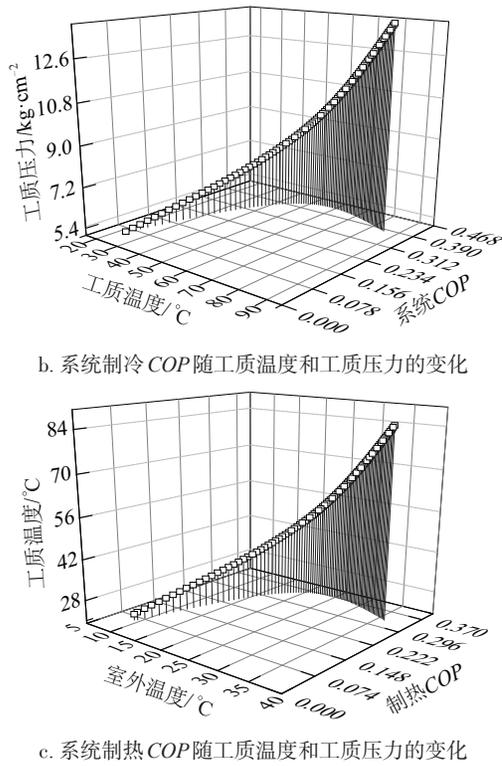


图4 系统运行效率及部件特性参数变化情况

Fig. 4 System operating efficiency and variations for system components characteristic parameter

理论计算研究表明,昆明地区的户用分布式独立光伏空调系统的最大制热效率为 0.35,最大制冷效率为 0.38。系统效率在冷媒压力、环境温度、冷媒温度三者影响下的变化呈现为先升后降的趋势,系统效率达到最大时的工质温度约为 70 ℃;制热时的工质压力为 1.23 MPa,制冷时的工质压力为 2.62 MPa;制热时室外环境温度为 9.7 ℃、制冷时室外环境温度为 29.8 ℃,当室外环境温度超过 30 ℃时系统制

冷效率开始降低。

### 3.2 实验验证

在 3 种典型天气条件下对系统运行的特性参数进行了实验测试,并将实验测试结果与理论计算数值进行对比分析,如图 5 和表 3 所示。

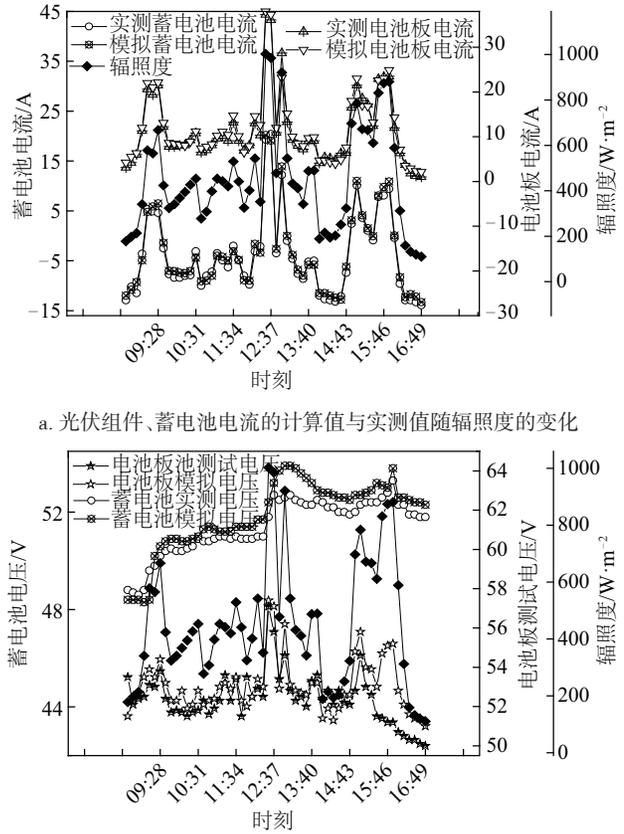


图5 分布式光伏能源系统的电流电压变化情况

Fig. 5 Variations of currents and voltages of distributed photovoltaic energy system

表3 系统特性参数的模拟量与实测值对比

Table 3 Comparison between simulated and measured values for characteristic parameters

天气	发电量/kWh		制热效率		制冷效率		制热保障系数		制冷保障系数	
	模拟值	测试值	模拟值	测试值	模拟值	测试值	模拟值	测试值	模拟值	测试值
阴天	4.8	4.5	0.29	0.28	0.30	0.30	0.65	0.62	0.78	0.76
多云	9.8	9.3	0.36	0.35	0.38	0.37	1.17	1.07	1.20	1.12
晴天	11.5	10.8	0.35	0.32	0.36	0.33	1.30	1.18	1.45	1.36

由表 3 可得,系统特性参数的模拟量与实测值的误差在 7% 以内,多云天气(制热保障系数为 1.07,制冷保障系数为 1.12)及晴天(制热保障系数

为 1.17,制冷保障系数为 1.36)时,户用独立分布式光伏能源系统的发电量均能满足空调供能需求,分布式光伏发电量有剩余。阴天时(制热保障系数为

0.62, 制冷保障系数为 0.76), 分布式光伏能源系统发电量可驱动空调运行 5~6 h, 满足 60%~70% 供电需求。因此蓄电池的容量在分布式光伏能源系统应用中的作用至关重要, 蓄电池容量与光伏组件的配比关系对系统性能影响较大。本文所采用的分布式光伏能源系统的蓄电池组为 4 个 12 V、65 Ah 串联将电压提升为满足逆变器工作电压的 48 V, 然后 2 组并联将容量提升为 130 Ah, 蓄电池储能功率为 6.24 kWh, 在满足逆变器工作电压的前提下, 只可调整蓄电池的并联数量增加蓄电池容量, 每等单位增加/减少蓄电池的并联数, 蓄电池容量增加/减少 3.12 kW, 成本会增加/减少 2200 元。在相同光伏组件和相同测试条件下, 阴天的制冷保障系数会增加/减少 0.38, 制热保障系数会增加/减少 0.31; 多云天气的制冷保障系数会增加/减少 0.56, 制热保障系数会增加/减少 0.535; 晴天的制冷保障系数会增加/减少 0.68, 制热保障系数会增加/减少 0.59。

## 4 系统匹配优化分析及配比参数

### 4.1 部件匹配特性及性能分析

各组成部件参数的匹配耦合对系统性能有较大影响, 因此系统部件间参数的匹配优化是系统性能提升的关键。户用分布式光伏能源所采用光伏组件的最大功率输出电压为 62.5 V, 最大功率输出电流为 34.5 A, 但系统所配备的控制器不带最大功率跟踪 (MPPT) 功能, 因此光伏能源系统的输出功率偏离了光伏组件最大功率点, 导致输出能量的浪费。

模拟计算及实验测试了阴天、多云和晴天 3 种典型天气条件下蓄电池存储的电能和电池板输出电能的匹配关系。研究表明, 2.45 kW 的光伏组件, 配备 130 Ah 蓄电池, 可驱动空调运行 8~10 h。但所采用的控制器的参数设置中, 蓄电池容量最大值为 120 Ah, 只能达到蓄电池容量的 85%, 因此在蓄电池充电过程中, 15% 的蓄电池容量受控制器限制而被浪费。因此优化控制器与蓄电池参数的匹配耦合关系, 系统性能将得到进一步提升。研究结果还表明, 逆变器输出功率变化范围为 700~1300 W, 且逆变效率仅为 0.7~0.8。图 6 给

出了控制器与逆变器参数变化对其效率的影响关系。

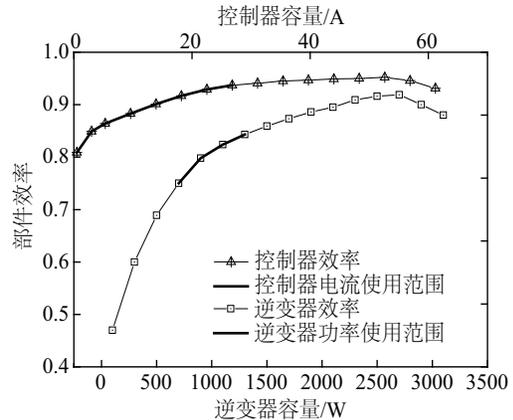


图 6 控制器与逆变器不同负载情况下效率曲线

Fig. 6 Efficiency curves under different load conditions of controller and inverter

由图 6 可得, 户用分布式光伏能源系统所采用的控制器和逆变器运行效率较低, 控制器的容量为 0~60 A, 逆变器的容量为 0~3 kW, 系统电流在 30~50 A 时控制效率较高 (95%), 逆变运行功率为 2300~3000 W 时效率可达到 0.90。但分布式光伏能源系统最大输出电流仅为 35 A, 最大输出功率也只能确保逆变器运行在 700~1300 W 之间, 控制器与逆变器均运行在低效率工况下, 存在光伏组件与控制器与逆变器参数失配现象。对控制器与逆变器的容量变化对部件功耗的影响进行模拟计算, 如图 7 所示。

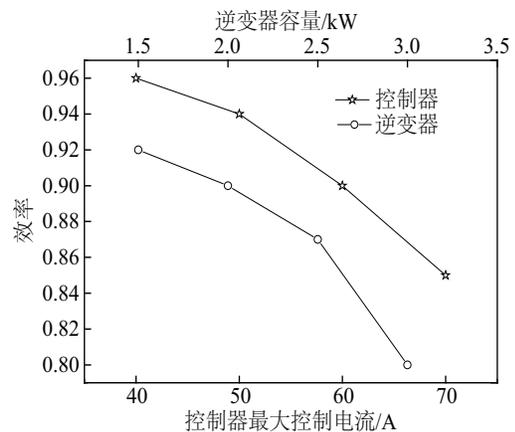


图 7 控制器与逆变器的效率随容量变化曲线

Fig. 7 Efficiency change curves of controller and inverter along with their capacity

由图 7 可得,控制器与逆变器的功耗随着容量的增加而增大,若将控制器优化为带 MPPT 功能,确保光伏组件最大功率输出电流在 40 A 时,则控制器效率将达到 0.96;若现有的逆变器优化为采用全桥式纯正弦波逆变器且容量减小为 1.5 kW 后,则逆变器效率将提升到 0.92。

因此,基于现有的户用分布式光伏空调系统,对控制器与逆变器进行优化,采用带 MPPT 功能的控制器,其工作的最大电流为 40 A,优化逆变器为全桥式纯正弦波 1.5 kW 逆变器,减少光伏组件的输出功率为 2.2 kW,优化后户用分布式光伏空调系统效率将提升 11%~13%(由 0.37 增加到 0.41)。

## 5 典型气候地区运行特性分析

为分析在不同地区气候条件下的商用与户用 1.5 匹分布式光伏空调系统的运行特性及市场应用价值,选取 3 种典型气候地区(曼谷、北京和昆明)分析分布式光伏空调系统的运行特性。

### 5.1 热带地区光伏空调系统运行特性

曼谷地区户用空调设计使用时间为工作日周一~周五:18:30~次日 08:00;周末或节假日设计使用时间为:12:00~次日 08:00,设计系统保障率为 1 d。曼谷地区月平均气象条件如图 8 所示,根据图 8 的气象数据可计算得到分布式光伏空调系统在曼谷地区的耗能情况,如图 9 所示。接着,结合表 4 给出的曼谷地区的居民电价数据,可计算分析分布

式光伏空调系统在曼谷地区的经济性能,如表 5 所示。

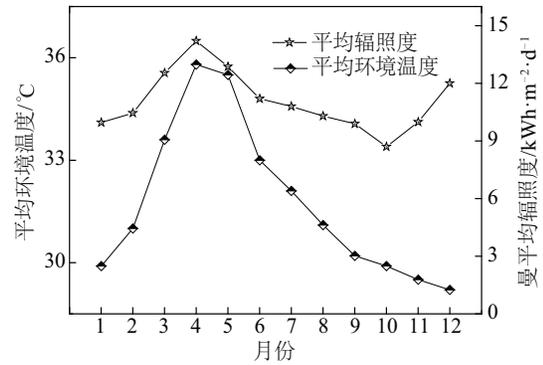


图 8 曼谷地区月平均环境温度与辐照度

Fig. 8 Monthly mean ambient temperature and irradiance in Bangkok

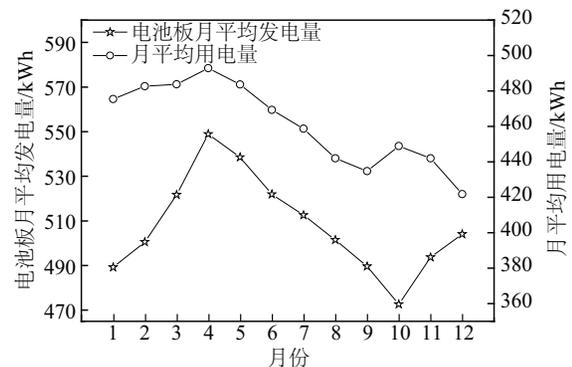


图 9 曼谷地区 1.1 kW 的分布式光伏空调系统的月平均发电量及耗电情况

Fig. 9 Monthly average power generation of PV array and power consumption of air conditioning in 1.1 kW household distributed photovoltaic air conditioning system in Bangkok

表 4 曼谷居民电价表

Table 4 Resident electricity price of Bangkok

曼谷用电峰、平、谷值时间表				电价	
峰值	08:00~11:30	14:30~17:30	19:00~21:00	5.5 泰铢=0.99 ¥	
平值	07:00~8:00	11:30~14:30	17:30~19:00	21:00~23:00	3.8 泰铢=0.68 ¥
谷值	23:00~次日 07:00			2.8 泰铢=0.5 ¥	

由表 4 和表 5 可得,曼谷地区天气较热,全年有 300 d 的供冷需求量,采用市电驱动空调耗能较多,采用光伏驱动空调不仅可节约电费,而且还可充分利用曼谷地区的丰富的太阳能资源。计算得到曼谷地区的户用型分布式光伏空调系统的投资回收期约为 6 a,因此在热带地区,与常规市电驱动的空调相比,分布式独立光伏空调系统有较好的经济

效益、环境效益和社会效益。商用光伏驱动分布式空调系统的使用时间为工作日的 08:30~18:00,减少了晚上采用蓄电池供能环节,所需的光伏组件及蓄电池容量均可大幅减少,计算可得曼谷地区商用分布式光伏空调系统回收期为 4.3 a,光伏空调系统商用价值更高。分布式光伏能源系统中蓄电池数量使用多少对系统成本及投资回收期的影响较大。

表5中的系统采用的蓄电池成本为4400¥,占总成本的19.64%,每单位量增加/减少一组蓄电池,成本会增加/减少2200¥,投资回收期会增加/减少9.82%。

表5 曼谷地区1.1 kW户用分布式光伏空调系统经济性能分析

Table 5 Economic performance analysis of 1.1 kW household distributed photovoltaic air conditioning system in Bangkok

光伏空调系统			普通空调系统		
	数量	单价/ 合计/ ¥ ¥		数量	单价/ 合计/ ¥ ¥
空调	1台	3600 3600	空调	1台	3600 3600
光伏组件	14	550 7700			
控制器	1台	600 600			
逆变器	1台	1500 1500			
蓄电池	8只	550 4400			
导线	1卷	600 600			
其他		4000元	其他		300元
合计		22400元	合计		3900元
年耗电量	(市电)	0 kWh	年耗电量	(市电)	5864 kWh
回收期/a		6	回收期		

## 5.2 温带地区光伏空调运行性能分析

结合温带地区气象资源,对户用型、商用型独立光伏空调在四季分明(北京)、四季如春(昆明)地区的运行特性及经济性能进行分析,结果如表6所示。

表6 北京与昆明1.1 kW户用分布式光伏空调系统投资回收期

Table 6 Payback period of 1.1 kW household distributed photovoltaic air conditioning system in Beijing and Kunming

类型	曼谷	北京	昆明
户用型回收期/a	6.0	8.3	11.2
商用型回收期/a (商用电价计算)	4.3	5.1	10.4

研究表明,户用型分布式光伏空调系统及商用型分布式光伏空调系统对于电价较高或缺电的热带地区及四季分明的地区具有较好的经济效益及突出的环境效益和社会效益。

## 6 结 论

1)实验研究表明,户用分布式光伏空调系统的

系统采暖、制冷效率分别可达0.35和0.37,保障率最高可达1.41。

2)理论计算和实验测试误差均在7%以内,所建立的数学模型可较好地表述系统运行特性。利用验证后的模型分析优化光伏组件、控制器与逆变器的匹配性,优化后系统效率最高可达0.41。

3)结合热带地区曼谷、温带地区的北京与昆明3种典型气候特性,分析商用与户用分布式光伏空调系统的经济性能。曼谷地区的投资回收期为4.3 a和6.0 a;北京地区为5.1 a和8.3 a;昆明地区为10.4 a和11.2 a。分布式光伏空调系统在热带地区和四季分明地区具有较好的经济性能。

## [参考文献]

- [1] Zhao Xudong, Yang Shuang, Duan Zhiyin, et al. Feasibility study of a novel dew point air conditioning system for China Building application[J]. Build Environment, 2009, 44(9): 1990—1999.
- [2] Kiran T R, Rajput S P S. Energy saving potential of a novel dew point evaporative air conditioning system for Indian buildings research[J]. Applied Science Research, 2010, 2(1): 376—382.
- [3] Mokrani Z, Rekioua D, Rekioua T. Modeling control and power management of hybrid photovoltaic fuel cells with battery bank supplying electric[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39: 15178—15187.
- [4] 刘吉臻, 孟洪民, 胡 阳. 采用梯度估计的风力发电系统最优转矩最大功率点追踪效率优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2367—2374.
- [4] Liu Jizhen, Meng Hongmin, Hu Yang. Efficiency optimization of optimum torque maximum power point tracking based on gradient approximation for wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2367—2374.
- [5] 张 力, 阮新波, 任小永. 两级式逆变器中前级直流变换器的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 660—670.
- [5] Zhang Li, Ruan Xinbo, Ren Xiaoyong. Control schemes for the front-end DC-DC converter in the two-stage inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 660—670.
- [6] Jiang Shuai, Cao Dong, Li Yuan, et al. Grid connected boost half bridge photovoltaic micro-inverter system using repetitive current control and maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power

- Delivery, 2012, 27(11): 4711—4722.
- [7] Castellanos J G, Walker M, Poggio D. Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 390—398.
- [8] Kamel Rabhi, Chaouki Ali, Rached Nciri, et al. Novel design and simulation of a solar air-conditioning system with desiccant dehumidification and adsorption refrigeration[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40: 3379—3391.
- [9] Balaji N, Suresh Mohan Kumar P, Velraj R, et al. Experimental investigations on the improvement of an air conditioning system with a nanofluid-based intercooler [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40: 1681—1693.
- [10] Kim S C, Park J C, Kim M S. Performance characteristics of a supplementary stackcooling system for fuel-cell vehicles using a carbon dioxide air-conditioning unit[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2010, 11(6): 893—900.
- [11] Francisco J, Aguilar Pedro V, Quiles Simón Aledo. 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.
- [12] Abdel-Rahim Naser M B. Adjustable speed unsymmetrical two-phase induction motor drive for photovoltaic powered air condition electric power components and systems[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2010, 38: 865—880.
- [13] 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): 1167—1171.
- [13] Lyu Guangzhao, Li Yong, Dai Yanjun, et al. Winter heating performance analysis of independent photovoltaic air conditioning system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(7): 1167—1171.
- [14] 茆美琴, 何若慧, 曹仁贤. 光伏空调系统的结构及优化配置[J]. *新能源*, 1996, 18(12): 18—20.
- [14] Mao Meiqing, He Huiruo, Cao Renxian. The structure and optimal configuration of photovoltaic conditioner[J]. *New Energy Sources*, 1996, 18(12): 18—20.
- [15] 郑 超, 林俊杰, 赵 健, 等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(5): 1059—1071.
- [15] Zheng Chao, Lin Junjie, Zhao Jian, et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(5): 1059—1071.
- [16] 王海涛. 户式光伏空调系统性能的数值模拟[J]. *节能技术*, 2007, 25(2): 213—222.
- [16] Wang Haitao. Numerical simulation of PVAC system[J]. *Energy Conservation Technology*, 2007, 25(2): 213—222.
- [17] 李玉恒, 周绍红, 林卫东, 等. 光伏冰箱系统的性能特性研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(2): 422—429.
- [17] Li Yuheng, Zhou Shaohong, Lin Weidong, et al. Performance analysis of photovoltaic refrigerator system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(2): 422—429.
- [18] 徐素娟. 独立光伏发电系统中充电控制器的研究与设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [18] Xu Sujuan. Research and design of charging controller in independent photovoltaic power generation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.

## PERFORMANCE ANALYSIS AND COMPONENTS MATCHING RESEARCH ON AIR CONDITIONING SYSTEM DRIVEN BY DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC

Luo Xi<sup>1</sup>, Su Kunye<sup>1</sup>, Xu Yongfeng<sup>1,2</sup>, Li Ming<sup>1</sup>

(1. *Solar Energy Research Institute of Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;*

2. *Zhejiang Province Solar Products Quality Inspection Center, Haining 314400, China*)

**Abstract:** Constructing air conditioning system driven by distributed PV system, the mathematical model was established to analyze the matching and coupling characteristics between distributed PV generation system and cooling and heating performance of air conditioning system, and the experimental research work was carried out. The research results indicate that the cooling efficiency and heating efficiency of the main characteristic parameters for the distributed PV air conditioning system are 0.37 and 0.35, respectively. The highest operation guaranteed rate of air conditioning system driven by distributed PV system is up to 1.41. The parameters of each component of the system are optimized by the simulation and calculation, the system performance can be improved by 17.14%. Combined with national HVAC standards, using typical meteorological conditions to simulate and analyze the operational characteristics of distributed PV air conditioning system in three regions of Beijing, Kunming and Bangkok and parameter matching optimization relationship of associated components, and also compare and analyze the economic performance of distributed PV air conditioning systems in different regions. The research results can provide theoretical analysis basis and selection basis for the design and application of distributed PV air conditioning systems.

**Keywords:** photovoltaic; air conditioner; simulation; characteristic parameters; performance