

光伏直驱变频离心式冷水机组的实验研究

肖 彪¹, 张 威¹, 黄童毅², 何 林¹, 黄千泽², 程笑笑²

(1. 空调设备及系统运行节能国家重点实验室, 珠海格力电器股份有限公司, 珠海 519070;

2. 珠海格力电器股份有限公司, 珠海 519070)

摘 要: 基于光伏直驱变频离心式冷水机组系统特性, 设计并搭建一座全天候整机、逆变器性能测试平台。结合机组特有的数种工作模式满足对光伏侧、电网侧、机组水侧各参数的监控, 并计算转换效率及制冷量。试验结果表明: 纯光伏模式的转换效率达 98.25%, 用电模式额定功率转换效率为 96.3%, 名义工况下的性能系数 (coefficient of performance, COP) 为 6.79, 光伏空调的 COP_{sg} 为 6.89。在光伏功率 5%~100% 波动的情况下, 机组功率保持在 480 kW, 制冷量保持在 3180~3200 kW, 未引起机组加卸载。平台可满足全天光伏空调并网性能、整机性能、可靠性测试需求。

关键词: 测试平台; 光伏; 制冷; 离心式冷水机组; 转换效率

中图分类号: TB663

文献标识码: A

0 引 言

光伏制冷系统有多个种类, 根据光伏发电系统的形式不同, 可分为独立系统和并网系统; 根据制冷原理不同, 可分为蒸汽压缩式制冷和半导体制冷^[1]。其中, 蒸汽压缩式光伏制冷空调设备主要有以下 3 种实现模式:

1) 市电-太阳能光伏混合供电模式——优先使用光伏电源, 市电作为补充, 空调负荷特性与光伏发电特性基本吻合。这种模式受外界环境因素的影响较大, 如辐照度偏低的天气状况下, 空调耗电量中市电占比增大。

2) 太阳能光伏-蓄电池组-市电模式——该类空调系统增加蓄电池组作为电能储存单元, 即将多余光伏电能储存到蓄电池组中。优先使用蓄电池组中储存的电能, 不足部分使用市电补充。该类系统冬季白天采暖中太阳能空调运行可提供 77.7% 的电量^[2], 可满足土耳其南部地区家庭、办公室的使用^[3]。文献^[4]指出在夏热冬冷地区变频转换效率在夏、冬季节仅分别为 76.8%、68.2%, 损失最大。

3) 太阳能光伏-市电并网模式——日常使用光伏与市电混合运行, 在空调负荷低或不运行时, 光

伏板产生的电能经过逆变器并网。有学者总结光伏直驱变频离心机系统应提前启动降低水温, 控制压缩机负荷接近光伏发电量的节能策略^[5]。家用空调技术方面, 采用焓差法对光伏并网式家用空调系统进行性能实验, 分析 COP 最大可提高 10.2%, 具有节能可行性^[6]。

国内外市场上光伏制冷产品种类尚不多, 如何检测和评价光伏制冷产品的性能、可靠性、相关测试平台随着行业的发展越来越受到关注。本文研究目的在于开展光伏直驱变频离心式冷水机组的检测研究, 为光伏空调产品检测提供参考。

1 检测研究

1.1 系统简介

光伏直驱变频离心式冷水机组 (图 1) 采用三元换流技术, 光伏直流电可直接驱动变频离心机运行, 在光伏电能富余时, 机载换流器将光伏直流电逆变为交流电反馈电网, 在光伏电能不足时从电网取电, 满足混合供电, 实现能量的双向流动。即根据光伏发电及离心机运行实际情况, 切换用电模式、纯光伏发电模式、光伏空调、光伏空调与发电模式、光伏空调与用电模式 5 种工作模式。

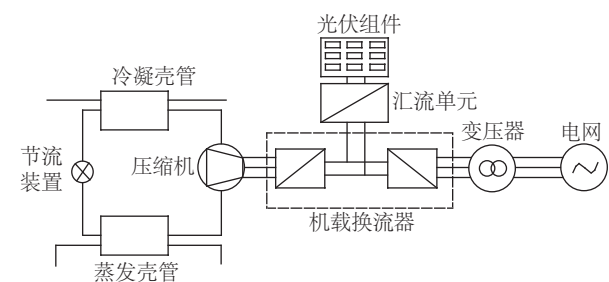


图1 光伏直驱变频离心式冷水机组系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of frequency-variable centrifuge chiller system driven by PV directly

1.2 测试平台系统设计与搭建

被测机既包含传统冷水机组系统结构,也包含光伏并网系统,测试平台(图2)需兼顾冷水机组能效检测、可靠性检测,同时引入光伏板组串系统供电和大功率光伏模拟器,具备光伏并网逆变器测试和上网发电质量检测功能。基于上述检测需求,搭建检测平台,该检测平台包括冷却水、冷冻水水温调节及循环系统,市电供电系统、光伏供电及并网系统,直流、交流功率检测系统,其他检测设备。

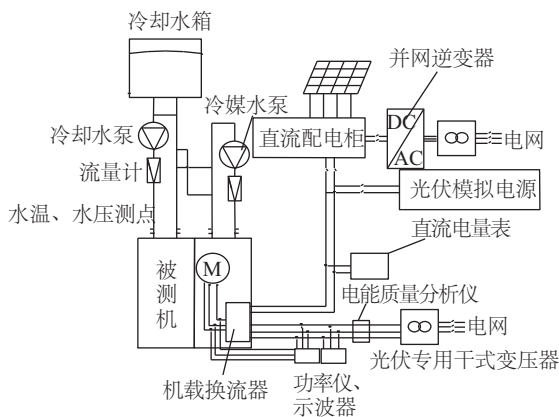


图2 测试平台配置图
Fig. 2 Schematic diagram of test platform

冷却水、冷冻水水温调节及循环系统用于满足冷水机组的测试运行条件,如表1所示,系统制冷量测试范围900~5000 kW。系统运行时被测机正常加卸载,冷冻和冷却水泵开启循环,调节冷冻水管和冷却水管之间的二通阀、兑水泵开度,实现冷却水与冷冻水的兑水换热、温度调节;又通过调节冷却水箱开度,实现对冷却水温的调节,模拟冷水机组国标中的水温工况要求^[7,8],实现冷水机组制冷能力及可靠性的检测。

表1 水温调节及循环测试系统参数

Table 1 Parameters of water temperature control and water circulation test system					
制冷量/kW	冷冻水泵流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	冷却水泵流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	冷冻水温/ $^{\circ}\text{C}$	冷却水温/ $^{\circ}\text{C}$	电网输入功率/ kW
900~5000	0~880	0~1150	0~40	8~55	0~1000

市电供电系统、光伏供电及并网系统,配置有直流配电柜、并网逆变器以及变压器等设备,光伏供电系统包含真实光伏与模拟光伏。真实光伏阵列由412.5及390.5 kW这2个阵列子单元组成,每个子单元又分成多个几十千瓦的小单元,由直流配电柜的通断开关控制真实光伏在测试系统的投入量,多余光伏发电由并网逆变器发入电网。光伏模拟电源使用科威 GK-IVS630(见表2),可输出最大630 kW的模拟光伏电,模拟光伏阵列*I-V*曲线。

表2 光伏模拟电源 GK-IVS630 参数

参数	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/kW	通讯	输入电压/V
取值	50~1000	0~1400	0~630	RS232/RS485	380

当系统运行并需要投入模拟光伏时,通过互锁开关切换光伏模拟电源,设置输出电量,余电通过机载换流器发入电网,不足从电网获电供被测机使用。当不需要使用光伏时,互锁开关使真实光伏阵列往电网发电,光伏模拟电源关闭,被测机从电网取电。该系统能够实现对光伏直驱变频离心式冷水机组的各种供电需求,全天候模拟测试各种工作模式下的整机、逆变器性能及可靠性试验。直流、交流功率检测系统包括功率测试仪、电源质量分析仪、示波器等仪器,实现输入电压、直流输入功率、交流输入功率、功率因数、电压不平衡率、机载换流器逆变效率、并网谐波、直流分量、光伏发电电量等检测项目,综合评价机载换流器的性能和稳定性、可靠性。

2 检测案例及试验结果分析

2.1 实验理论分析

2.1.1 转换效率、名义性能实验

参考光伏并网逆变器行业标准^[9]转换效率测试

方法,光伏离心机组的转换效率由于整机因素的介入,丰富了其转换效率的测试模式,本文依据发用电情况,定义5种工作模式状态:纯光伏模式、光伏空调模式、光伏空调与用电模式、光伏空调与发电模式、用电模式。依据工作模式的不同,按式(1)~式(5)计算转换效率:

$$\eta_1 = \frac{|P_o|}{P_{di}} \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{|P_o| + P_w}{P_{di}} \quad (2)$$

$$\eta_3 = \frac{P_w}{|P_o| + P_{di}} \quad (3)$$

$$\eta_4 = \frac{P_w}{|P_o|} \quad (4)$$

$$\eta_5 = \frac{|P_o| + P_w}{P_{di}} \quad (5)$$

式中, η_1 ——纯光伏模式转换效率,%; P_o ——网侧输出功率, W; P_{di} ——光伏输入功率, W; η_2 ——光伏空调模式转换效率,%; P_w ——电机消耗功率, W; η_3 ——光伏空调与用电模式转换效率,%; η_4 ——用电模式转换效率,%; η_5 ——光伏空调与发电模式转换效率,%。

表3 工作模式表达式

Table 3 Work mode expression

工作模式	判断表达式
纯光伏模式	$P_{di} > 0, P_w = 0$
光伏空调模式	$P_{di} > 0, P_w > 0, P_o = 0$
光伏空调与用电模式	$P_{di} > 0, P_w > 0, P_o > 0$
光伏空调与发电模式	$P_{di} > 0, P_w > 0, P_o < 0$
用电模式	$P_{di} = 0, P_w > 0$

注:本文规定 $P_o > 0$ 为用电状态, $P_o < 0$ 为发电状态。

性能系数计算公式为:

$$COP = \frac{Q_c}{P_o} \quad (6)$$

$$COP_{sg} = \frac{Q_c}{P_{di} + P_o} \quad (7)$$

式中, COP ——性能系数; Q_c ——制冷量, W; COP_{sg} ——光伏空调性能系数。

性能系数的意义在于1 kW的电能耗取多少千瓦的冷量。根据热能第二定律,加入光伏系统并不改变制冷过程消耗能量的本质,故计算光伏空调性能系数时,消耗功率为机组实际消耗的光伏投入量

与网侧功率之和,而非光伏投入量与机组功率的差值。对比光伏空调节能效果,建议研究一种新的评价方式及指标。

2.1.2 光伏负荷变化实验

因光伏阵列输出随天气变化具有不稳定性,为满足机载换流器实时切换及适应波动能力,其平衡条件如式(7)~式(9)所示^[10]。从可靠性实验角度,选取主要输入量之一的“光伏输出”作为应力条件参与验证机载换流器的处理及承受能力,并考核在此期间机组的压缩机运行、制冷稳定的能力。而依据光伏组件发电特性,光伏输入电流直接与辐照度的幅度呈正相关^[11]。故采用光伏负荷变化的方式开展实验:

$$P_{load} - P_{di} = P_o \quad (8)$$

$$V_{dc} = V_{di} \quad (9)$$

$$i_{dc,o} + i_{di} = i_{dc,load} \quad (10)$$

式中, P_{load} ——机组消耗功率, W; V_{dc} ——中间直流母线电压, V; V_{di} ——光伏输入电压, V; $i_{dc,o}$ ——中间直流母线网侧电流, A; i_{di} ——光伏输出电流, A; $i_{dc,load}$ ——中间直流母线机组侧电流, A。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 转换效率、名义性能实验

测试选用搭载400 kVA逆变器容量的光伏离心机组,得益于光伏发电切换系统,在光照条件不足时,启用光伏模拟电源输出稳定、准确的直流电。如表4所示,规定光伏空调+发电模式及光伏空调+用电模式下,机组分别运行综合部分负荷性能系数(IPLV)25%(冷量)部分负荷工况及名义工况(IPLV100%),两者依次投入光伏占额定功率之比分别为30%(120 kW)、50%(200 kW)、75%(300 kW)、100%(400 kW,其中光伏空调+用电模式为90%,360 kW)光伏;用电模式运行国标IPLV25%、50%、75%、100%这4个工况(对应网侧功率为逆变器额定功率的18%、40%、67%、90%),满足各模式下网侧功率高低变化的测试条件。

由图3可看出,在各种混合模式下,纯光伏模式的效率最高,分析 $P_{di} > 0, P_w = 0$ 时的机组并网发电,仅AC/DC模块工作,DC/AC模块待机,这使得AC/DC模块处在一个较高功率的工作状态,因此相对其他模式,其效率最高。用电模式转换效率均低于光伏工作模式水平,额定功率(90%负荷)转换效

率为 96.3%,此时 AC/DC、DC/AC 模块均处于工作状态,电流流向从电网至压缩机,且两转换模块负荷基本一致,故功耗损失较大,IPLV 25%转换效率最低,一方面是逆变器此时“大马拉小车”,另一方面是由于过低负荷对仪器读数产生干扰,影响读数准确性。

表 4 开机运行电机功率数据统计

Table 4 Data statistics of motor operation power		
投入光伏 功率 P_{di}/kW	电机消耗功率 P_w/kW	
	光伏空调+发电模式	光伏空调+用电模式
120.00	70.22	344.25
200.40	63.19	344.79
300.00	63.01	343.96
360.00	—	345.30
400.20	63.04	—

注: P_e —逆变器额定功率。

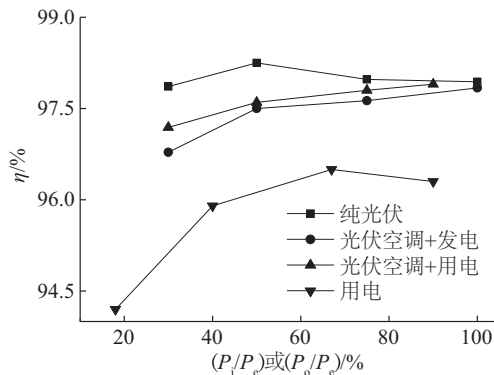


图3 转换效率

Fig. 3 Conversion efficiency

一般选型上会将光伏发电系统装机容量配置在离心机功率的 0.9~1.1 倍。从图 4 分析,定义向电网发电时, $P_o < 0$, 混合模式下,电机消耗功率 P_w 保持,网侧功率随光伏投入而改变,曲线处于负数区,说明系统向外发电,反之,用电。光伏空调+用电模式网侧功率越低,表明随着光伏投入的增加,向光伏空调模式、光伏空调与发电模式转变。

实验过程中难以保证网侧输出功率维持在 0 kW,实验结果在 1%内波动时认定为光伏空调模式。如表 5 所示,名义工况用电模式下,被测机 COP 达到 6.79,相同工况的光伏空调 COP 为 6.89,

提高了 1.5%,分析为光伏的投入使得转换效率提高,减少变频器损耗,制冷量不变,能效提高。

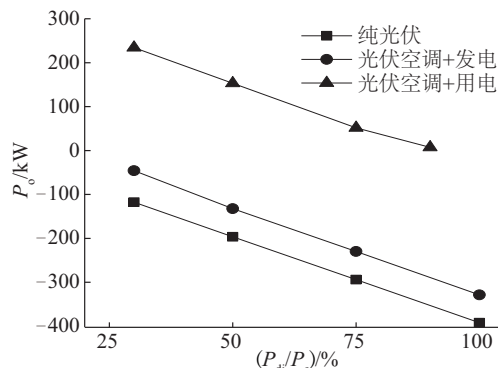


图4 不同光伏输入时的网侧功率

Fig. 4 Different PV generation convert to grid power

表 5 名义工况性能系数

Table 5 COP of nominal condition test					
模式	转换效率/%	制冷量/ kW	投入 光伏/kW	网侧 功率/kW	性能 系数
用电模式	96.3	2460.1	0.0	362.5	6.79
光伏空调	97.9	2462.3	357.3	0.0	6.89

本次实验使用光伏模拟电源作为光伏输入设备,光伏阵列不作为测试对象,仅测试光伏空调,不评价太阳能 COP、光伏转换效率。

2.2.2 光伏负荷变化实验

测试选用搭载 525 kVA 逆变器容量的光伏离心机组进行测试。机组稳定运行,调节光伏负荷由 12.4 kW 增加到 520.8 kW,再由 520.8 kW 到 12.4 kW 进行突变,如图 5 所示。

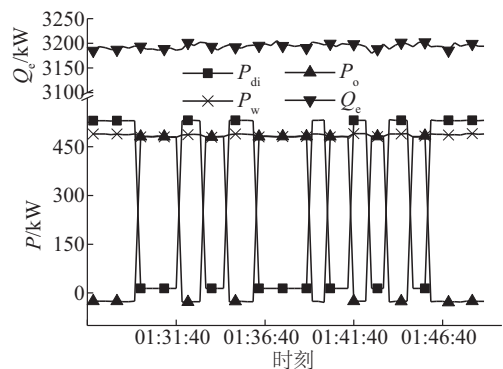


图5 光伏发电 12~520 kW 变化的
制冷量和功率变化

Fig. 5 Cooling capacity and Power variation when PV
generate between 12-520 kW

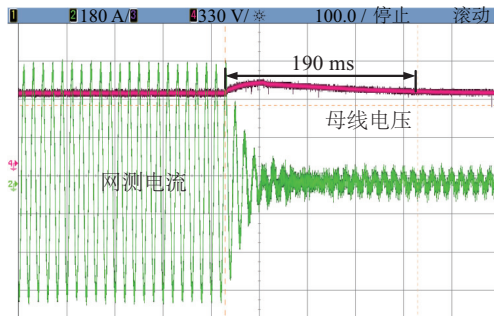
在功率变化过程中,离心机经历光伏空调与发电模式到光伏空调与用电模式,再到光伏空调与发电模式循环切换。离心机功率 P_w 保持在 480 kW,制冷量 Q_e 也保持在 3180~3200 kW,制冷量波动在 2%以内,符合国标要求。表明整机在发电功率 5%~100%波动的情况下未受到影响,光伏负荷在变化过程中,DC/AC 模块换向输出,AC/DC 模块维持输出,故在模式动态切换后机组功率、能力未发生明显变化,从可靠性角度分析,本试验主要考核 DC/AC 模块应变、耐冲击能力,具体实验参数设置见表 6。

表 6 光伏模拟电源设置

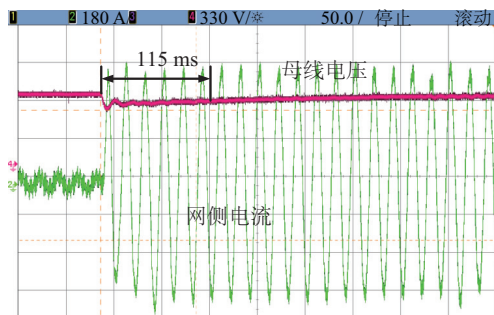
Table 6 PV simulator settings

V_{oc}/V	I_{sc}/A	V_{mp}/V	I_{mp}/A	P_{mp}/kW
722	21.1	620	20	12.4
722	886.9	620	840	520.8

注:光照辐射强度=1000 W/m²、温度=25 ℃。 V_{oc} —开路电压; I_{sc} —短路电流; V_{mp} —最大输出功率; I_{mp} —最大输出电流; P_{mp} —最大输出功率。



a. 12 kW 到 520 kW 负荷突增



b. 520 kW 到 12 kW 负荷突减

图 6 母线电压、网侧电流波形

Fig. 6 Busbar voltage, grid current waveform

如图 6 所示,光伏负荷突增,引起母线电压突增,恢复时间在百毫秒级,光伏负荷突降,母线电压突减。过长的恢复时间会导致模式识别异常、功率失调,波动幅值过大,又会引起保护停机,可作为一

项指标评价逆变器是否正常运行,建议通过增大电容、缩短电压检测响应时间等方式减缓波动幅度、缩小动态切换时间优化设计。

3 结 论

1)本文对光伏直驱变频离心式冷水机组运行模式进行研究,通过关联冷水水冷实验室与市供电系统、光伏供电及并网系统,增加直流模拟电源,控制光伏测试时供平台使用,非测试时并网发电,形成一套光伏直驱变频离心式冷水机组测试平台,满足逆变器并网性能、整机性能、可靠性测试需求。

2)该测试平台可实现在各种工作模式下,通过投切目标光伏、离心机运行,测试其并网转换效率以及其他并网、整机性能指标。其中,纯光伏模式的转换效率 98.25%,相对其他模式,其效率最高。用电模式额定功率(90%负荷)转换效率为 96.3%,该模式下模块损耗更大。名义工况下,被测机 COP 达到 6.79,相同工况的光伏空调 COP 为 6.89,提高了 1.5%,光伏的投入使得转换效率提高,能效提高。

3)根据热能第二定律,加入光伏系统并不改变制冷过程消耗能量的本质,故计算光伏空调性能系数时,消耗功率为机组实际消耗的光伏投入量与网侧功率之和,而非光伏投入量与机组功率的差值。现有的冷水机组能效计算方式不能合理表达光伏离心机能效水平,对比光伏空调节能效果,建议研究一种新的评价方式及指标。

4)依托测试平台可全天候模拟光伏测试的特性,明确光伏的设定值、变化速率、规律及与机组的协同影响,建立全天候光伏测试标准及其方法显得有必要。实验数据表明,该离心机定负荷情况,发电功率 5%~100%波动的情况下,未引起机组加卸载、保护,功率 P_w 保持在 480 kW,制冷量也保持在 3180~3200 kW,切换过程中,母线电压恢复时间在百毫秒级,过长的恢复时间会导致模式识别异常、功率失调,波动幅值过大,又会引起保护停机,对于验证可靠性具有一定指导意义,建议通过增大电容、缩短电压检测响应时间等方式优化设计。

[参考文献]

- [1] 吕光昭,李 勇,代彦军. 太阳能光伏制冷技术(上)[J]. 太阳能, 2011, (3): 14—16.
- [1] Lyu Guangzhao, Li Yong, Dai Yanjun. Solar and photovoltaic refrigeration technology (volume 1) [J].

- Solar Energy, 2011, (3): 14—16.
- [2] 吕光昭. 独立光伏空调系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [2] Lyu Guangzhao. Research on a stand-alone photovoltaic air conditioning system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [3] Bilgili M. Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system[J]. Solar Energy, 2011, 85(11): 2720—2731.
- [4] Li Y, Zhang G, Lyu 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.
- [5] 宋海川, 赵志刚, 张鹏娥, 等. 光伏直驱变频离心机中发电与耗电实验研究[J]. 制冷, 2015, (2): 80—83.
- [5] Song Haichuan, Zhao Zhigang, Zhang Peng'e, et al. The power generation & consumption experiment of pv directly driving variable frequency centrifugal chiller [J]. Refrigeration, 2015, (2): 80—83.
- [6] 金听祥, 徐笑锋. 光伏并网家用空调系统性能的实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 55—59.
- [6] Jin Tingxiang, Xu Xiaofeng. Experimental investigation on the performance of household air conditioning system with grid-connected photovoltaic generation [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(5): 55—59.
- [7] GB/T 18430.1—2007, 蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组(第1部分): 工业用及商业用及类似用途的冷水(热泵)机组[S].
- [7] GB/T 18430.1—2007, Water chilling (heat pump) packages using the vapor compression cycle (Part 1): Water chilling (heat pump) packages for industrial & commercial and similar application[S].
- [8] GB/T 10870—2014, 容积式和离心式冷水(热泵)机组性能试验方法[S].
- [8] GB/T 10870—2014, The methods of performance test for positive displacement & centrifugal water-chilling units and heat pump[S].
- [9] NB/T 32004—2013, 光伏并网逆变器技术规范[S].
- [9] NB/T 32004—2013, Technical specification of grid-connected PV inverter[S].
- [10] 赵志刚, 张雪芬, 刘怀灿, 等. 基于光伏直驱变频式离心机系统的三元换流控制方法[J]. 制冷与空调, 2014, 14(12): 18—20.
- [10] Zhao Zhigang, Zhang Xuefen, Liu Huaican, et al. Ternary commutation control method based on frequency-variable centrifuge system driven by PV directly[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2014, 14(12): 18—20.
- [11] 郭 泉. 光伏组件发电效率影响因子的优化研究[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2015.
- [11] Guo Xiao. Optimization for influencing factors of power generation efficiency of PV modules [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Technology, 2015.

EXPERIMENTAL STUDY ON FREQUENCY-VARIABLE CENTRIFUGE CHILLER DRIVEN BY PV DIRECTLY

Xiao Biao¹, Zhang Wei¹, Huang Tongyi², He Lin¹, Huang Qianze², Cheng Xiaoxiao²

(1. State Key Laboratory of Green Air-conditioning Equipment and System, Gree Electric Appliances, INC. of Zhuhai, Zhuhai 519070, China;

2. Gree Electric Appliances, INC. of Zhuhai, Zhuhai 519070, China)

Abstract: Based on frequency-variable centrifuge chiller driven by PV directly experimental study, design and build an all-day performance test platform for chiller and inverter. Integrates multiple unique operation modes which consuming or generating electricity, meets the conditions of monitoring photovoltaic-side, grid-side, chiller water-side parameters, and then calculates the conversion efficiency and refrigerating capacity. The experiment results show that conversion efficiency of pure PV mode is 98.25%, grid mode's conversion efficiency is 96.3%, COP is 6.79 and COP_{sg} is 6.89 in nominal condition. While PV generated power variably between 5% to 100%, chiller power stay around 480 kW and cooling capacity is 3180-3200 kW, therefore, chilling doesn't execute loading or uploading. Test platform can provides photovoltaic chiller all-day photovoltaic-grid performance test, overall test and reliability test.

Keywords: test platform; photovoltaic; refrigeration; centrifugal chiller; conversion efficiency