

文章编号:0254-0096(2019)07-1897-06

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。

收稿日期:2017-03-27

通信作者:肖彪(1979—),男,硕士、高级工程师,主要从事产品检测及认证技术方面的研究。xiaobiao@cn.gree.com

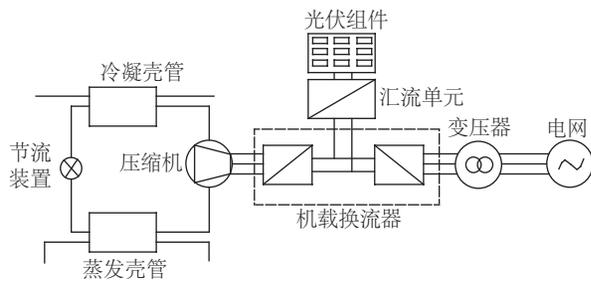


图1 光伏直驱变频离心式冷水机组系统示意图

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。

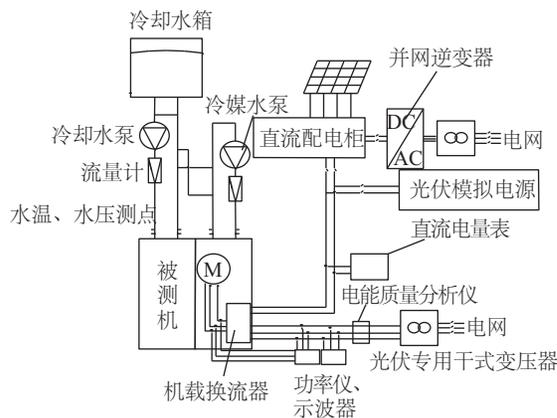


图2 测试平台配置图

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/ $m^3 \cdot h^{-1}$	冷却水泵流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	冷冻水温/ $^{\circ}C$	冷却水温/ $^{\circ}C$	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

Table 2 Parameters of PV analog power facility GK-IVS630

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的电能制取多少千瓦的冷量。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。对比光伏空节省能效果,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_c —逆变器额定功率。

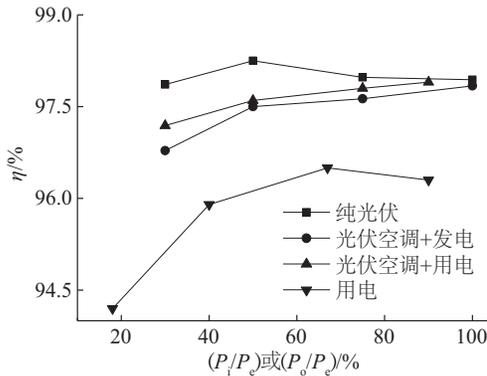


图3 转换效率

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, 被测电机 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。

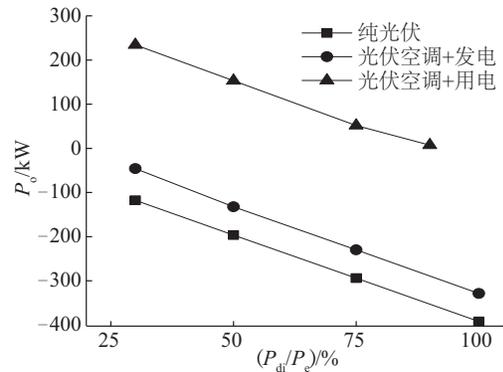


图4 不同光伏输入时的网侧功率

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。

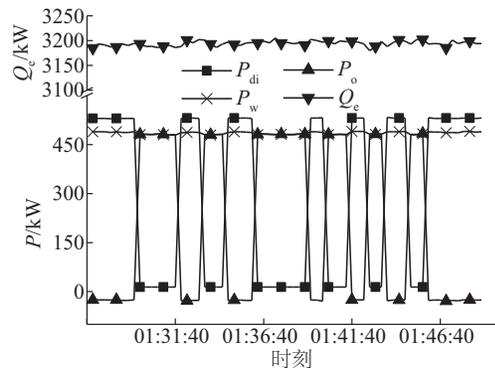


图5 光伏发电 12~520 kW 变化的制冷量和功率变化

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。

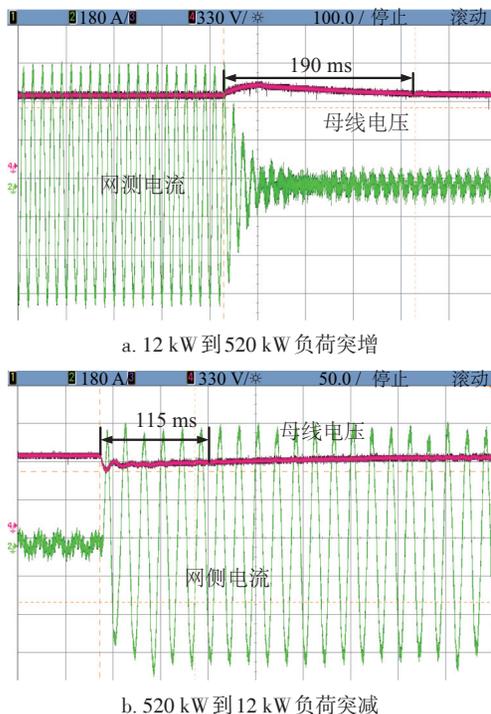


图 6 母线电压、网侧电流波形

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,对比光伏空调整能效果,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, 蒸气压缩循环冷水(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