

# 光伏并网逆变器检测平台的研制

闫华光, 章欣, 杨湘江, 王鹤, 范滢, 蒋利民, 李涛永

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Development of Detection Platform for Grid-Connected Photovoltaic Inverters

YAN Huaguang, ZHANG Xin, YANG Xiangjiang, WANG He, FAN Ying, JIANG Limin, LI Taoyong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** To ensure both performance and security of grid-connected photovoltaic inverters, a detection platform for grid-connected photovoltaic inverters is researched and developed; the testing method and procedures of grid-connected photovoltaic inverter are analyzed and the development course of this detection platform is described in detail. The detection platform consists of control computer, data acquisition system, RS 485 and general-purpose interface bus (GPIB) system. In this platform, the solar-cell panel is simulated by programmable DC source, the power grid characteristics of power grid by programmable DC source and the load characteristic by programmably controlled RLC load. The whole detection system is controlled by LabVIEW software interface, the communication among instruments is implemented by RS 485 and GPIB bus, thus the automation level of this platform is evidently enhanced. The proposed detection platform can be used in the electric performance testing of grid-connected photovoltaic inverters, testing of protection function, testing of electromagnetic compatibility (EMC) and so on. Practical application shows that the configuration of this detection platform is rational and reliable, and its detection results are accurate.

**KEY WORDS:** grid-connected photovoltaic inverter; grid-interface; island protection; detection platform

**摘要:** 为保证光伏并网逆变器的性能及安全, 研制了检测平台, 分析了并网逆变器的测试方法和步骤, 介绍了光伏并网逆变器检测平台的开发。整个检测平台由控制计算机、数据采集系统、RS 485 和通用接口总线(general-purpose interface bus, GPIB)系统组成。检测平台由可编程的直流电源、交流电源和 RLC 负载分别模拟太阳能电池板、电网特性以及负荷特性。整个系统通过 LabVIEW 软件界面控制, 由 GPIB 和 RS 485 总线实现仪器间的通信控制, 提高了系统的自动化程度。该检测平台可用于光伏并网逆变器电气性能测试、保护功能测试、电磁兼容测试等。实践证明该系统结构配置合理、设备可靠、精度高。

**关键词:** 光伏并网逆变器; 电网接口; 孤岛保护; 检测平台

## 0 引言

光伏并网发电是利用太阳能的发展趋势, 除大型光伏并网电站外, 光伏发电系统越来越多地用于调峰电站和屋顶光伏并网电站。截止到 2010 年底, 我国光伏系统的总装机容量约 500 MW。光伏并网发电系统中光伏逆变器是光伏发电系统的核心部件。由于光伏发电系统需要接入电网, 为保证公用电网和用户的安全, 光伏并网系统应具备完善的保护措施。目前国家标准中只规定了针对保护功能的要求<sup>[1-2]</sup>, 并没有制定相应的测试细则和步骤。因此, 有必要进一步研究光伏并网系统的测试方法及性能测试平台, 保证测试结论的可靠性和准确性。

本文将详细介绍光伏并网逆变器检测平台研制与开发, 分析并网逆变器保护功能及性能测试的方法和步骤。开发的检测平台由控制计算机、数据采集系统、RS485 和 GPIB 总线系统组成。该检测平台由可编程的直流电源、交流电源和 RLC 负载分别模拟太阳能电池板、电网特性以及负荷特性。采用虚拟仪器语言 LabVIEW 开发整个检测系统的软件, 具有良好的易用性、稳定性和可扩展性。

## 1 并网性能检测方法及原理

### 1.1 研究现状

对于分布式电源光伏并网发电系统, 为了保护电力设备、人员以及光伏系统本身的安全, 针对可能出现的各种故障, 要求光伏并网系统应在规定的时间内脱离电网, 因此保护功能的测试非常重要。关于过/欠电压、过/欠频率以及防孤岛效应保护功能的测试方法, 国标中只给出了保护功能

动作时间的限值，并没有给出具体的测试方法及要求，因此有必要对各种保护功能的测试方法进行深入研究和分析。

### 1.2 测试仪器设备的要求

文献[1-2]对测试设备及环境没有严格的规定，但测试过程中所用电网的纯净度、模拟电网源、测试设备的稳定性及精度将直接影响测试结果，并影响测试结论的判定。尤其在光伏并网逆变器谐波电流测试中，所用电网源的谐波纯净度将影响光伏系统对发出谐波电流的判定。虽然文献[1-2]在注释中规定“由于电压畸变会导致更严重的电流畸变，使得谐波的测试很麻烦，注入谐波电流不应包括任何由未连接光伏系统的电网上的谐波电压畸变引起的谐波电流”，但在实际测试操作过程中，无法区分谐波是由电网引起还是光伏系统本身发出，因此有必要对测试条件及设备作如下规定：

- 1) 模拟电网源的电压总畸变率应小于 2.5%。
- 2) 模拟电网源的单次谐波电压应低于标准中各次谐波电流限值水平(对光伏并网逆变器的谐波电流要求)的 50%。
- 3) 在测试过程中，稳态状况下的电压波动应不超过额定电压的±1%。
- 4) 在进行电压保护试验时，模拟电网源的电压改变分辨率应小于  $0.5\alpha U_N$ ，其中  $U_N$  为额定电压， $\alpha$  为生产厂家的稳态准确度。
- 5) 在进行频率保护试验时，模拟电网源的频率改变分辨率应小于  $0.5\alpha f_N$ ，其中  $f_N$  为额定频率。
- 6) 对于三相系统，模拟电网源的三相不平衡度应小于±3%，相位误差应小于 3°。在进行电压保护试验时，模拟电网源电压的步进值应在规定的时间内(小于 1 个电压周期或小于 1% 的逆变器脱离时间)从  $U_1$  升到  $U_1+0.5(U_2-U_1)$ ，其中  $U_1$  为初始电压值； $U_2$  为目标跳闸电压值。

- 7) 在进行频率保护试验时，模拟电网源电压的步进值应能在规定的时间内(小于 1 个电压周期或小于 1% 的逆变器脱离时间)从  $f_1$  上升到  $f_1+0.5(f_2-f_1)$ ，其中  $f_1$  为初始频率； $f_2$  为目标跳闸频率。

### 1.3 过/欠电压及过/欠频率保护功能测试

#### 1.3.1 幅值测试

光伏并网发电系统对异常电压响应的相关限值<sup>[1]</sup>见表 1，表中单相市电为 220 V。逆变器交流输出端电压超出表 1 规定的电压范围时，逆变器应在规定的时间内停止向电网供电，此要求适用于多相

表 1 异常电压的响应  
Tab. 1 Response to abnormal voltage

序号	在电网连接端的电压	最大跳闸时间/s
1	$U < 50\% U_N$	0.10
2	$50\% U_N \leq U < 85\% U_N$	2.00
3	$85\% U_N \leq U \leq 110\% U_N$	继续运行
4	$110\% U_N \leq U < 135\% U_N$	2.00
5	$135\% U_N \leq U$	0.05

系统中的任何一相。当电网频率小于 49.5 Hz 或大于 50.5 Hz 时，光伏并网发电系统应在 0.2~2 s 内停止向电网供电。文献[1]中并没有描述具体的测试方法，但在具体测试时，需要对光伏并网发电系统保护动作时的电压或频率以及动作时间进行测试。

在过/欠电压或过/欠频率保护功能测试中，需要一个电压源函数发生器来模拟电网电压和频率的变化，阶式电压(频率)的函数表达式为

$$y(t) = k(t - t_0) + Y_b$$

式中： $y$  为被测参数变量，即电压或频率参数； $k$  为斜坡函数的斜率； $t$  为测试中的响应时间，s； $t_0$  为斜坡函数波形发生的初始时间； $Y_b$  为斜坡函数波形发生时的被测参数(电压或频率)。需要说明： $k$  在过电压及过频率保护测试中为正，在欠电压或欠频率保护测试中为负，其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{0.5\alpha}{2t_d}$$

式中  $t_d$  为厂家声明的保护动作时间。

过电压或过频率测试的斜坡函数如图 1 所示。图中： $Y$  为被测参数(电压或频率)的幅值； $Y_N$  为被测参数的额定值； $Y_T$  为分闸时的幅值； $t_s$  为起始点  $Y_b$  的开始时间，其中  $Y_b$  一般为  $Y_T$  的 90%； $t_h$  根据测试点的选择来调整； $d$  为标准规定的最大跳闸时间。

在进行过电压保护测试时，电网模拟源应发出

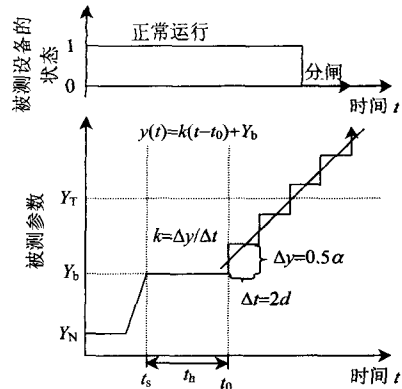


图 1 测试用的斜坡函数

Fig. 1 Ramp function for parameter under test

阶梯电压。先将电网模拟源的电压升到一个较高水平(低于过压值),再发出阶梯电压波形。用高精度的波形记录仪记录分闸时的电压水平值。建议重复发出阶梯电压波5次,观察逆变器分闸时间的变化<sup>[3-4]</sup>。

对于三相逆变器,应作2种测试:单相独立的阶梯波测试;三相同步发出的阶梯波测试。

### 1.3.2 保护动作时间测试

先把模拟源的电压或频率设置为90%的分闸点,然后将动作值调整到动作幅值点(在幅值测试中确定的动作幅值),并保持该值到系统分闸,记录分闸时间。

## 1.4 防孤岛效应测试

光伏并网发电系统除了考虑过/欠电压及过/欠频率等常规的保护功能之外,还需考虑一种特殊的故障状态,即孤岛效应<sup>[5-10]</sup>。当光伏发电系统供电量与负载需求量平衡时,电压和频率变化很小,容易发生孤岛现象。虽然文献[1-2]中规定,当孤岛效应发生时,光伏系统必须在电网失压2s以内停止向电网供电,但没有规定具体的测试方法。防孤岛测试原理如图2所示,建议其测试步骤<sup>[11-13]</sup>如下:

1) 确定分布式发电系统中光伏发电系统的有功功率  $P_{DR}$ 。

2) 运行光伏逆变器,测量有功功率  $P_{DR}$  及无功功率  $P_{q-DR}$ 。断开开关  $S_2$ , 闭合开关  $S_1$ , 光伏系统接入电网,使输出功率为  $P_{DR}$ , 测量公共连接点的有功及无功功率。有功功率应为  $P_{DR}$ , 测量得到的无功功率为  $P_{q-DR}$ 。

3) 断开开关  $S_1$ , 关闭光伏逆变器。

4) 调节可调负载,使电路品质因数  $Q=1$ 。用  $P_{qL}=P_{DR}$  确定谐振可调负载电路的感性电抗值,并将其作为 RLC 电路的第1部分,首先连接电抗到电路中,并调节电抗值,使其为  $P_{qL}$ ; 连接电容,并与电感并联在一起,调节电容,使其容抗值为  $-P_{q-DR}$ ; 连接电阻并调节电阻,使可调负载的有功

消耗为  $P_{DR}$ 。

5) 闭合开关  $S_2$ , 连接可调负载; 并闭合开关  $S_1$ , 启动逆变器,确定逆变器的输出与步骤1)一致。

上述步骤的目的是使流过公共连接点处的基波有功及无功功率分量为零,系统谐振会产生典型的谐波电流,这些谐波电流的存在使流过公共连接点处的功率及电流有效值不可能为零,因此进行测量时,应选择能精确测量基波功率的仪器。受测量误差及谐波含量的影响,应作调整以获得最坏的孤岛特性。

6) 通过计算机控制固态继电器断开,以便对防孤岛效应进行测试。对每一个负载点测试完毕后,对可变参数(电感和电容)作1%的调整,调整完毕后再作孤岛测试,并记录测试时间,如果孤岛检测时间超过2s,则表明反孤岛检测功能失败。

## 2 并网性能测试系统构成与设计

### 2.1 系统构成

整个系统由光伏电池模拟器(可编程直流电源)、电网模拟源(可编程的交流电源)、模拟电网阻抗网络、多台功率分析仪、高精度波形记录仪、控制电路等组成。采用 LabVIEW 编写系统软件,通过通用接口总线(general-purpose interface bus, GPIB),使用相应的通信协议和标准命令控制可编程 DC 电源、可编程 AC 电源、多通道功率分析仪、电能质量分析仪、波形记录仪等设备,采用上述检测方法进行保护及电能质量等各种试验,采用 RS 485 总线系统控制 RLC 负载,来获得孤岛测试环境,检验光伏并网逆变器在孤岛环境下的性能。

### 2.2 硬件系统构成

基于虚拟仪器的光伏并网逆变器性能检测系统的硬件主要包括 PC 机、接口卡和数据总线、交直流可编程电源、功率仪表、RLC 可调负载、模拟阻抗网络和被测设备等,如图3所示。采用1台 PC 机作为上位机,仪器设备为作为下位机,下位机的接口有 GPIB 和 RS 485 接口。系统中采用可编程直流电源作为太阳能模拟器,具有恒电压、恒电流和恒功率工作模式,可以模拟光伏电池伏安特性曲线。可编程交流线性电源作为电网模拟源,可以模拟电压波动和闪变、电压骤升和骤降、电压频率变化、电压谐波及三相不平衡等多种电网的变化。PC 机通过 RS 485 总线控制 RLC 可调负载和控制开关,实现开关的自动切换和负载的自动调节。PC

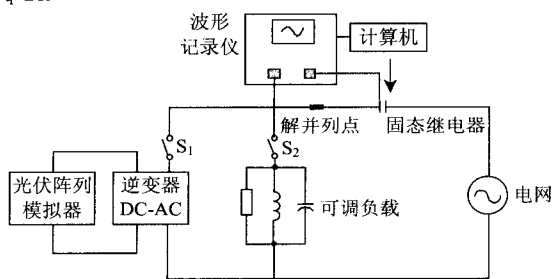


图2 防孤岛测试原理  
Fig. 2 Anti-islanding test

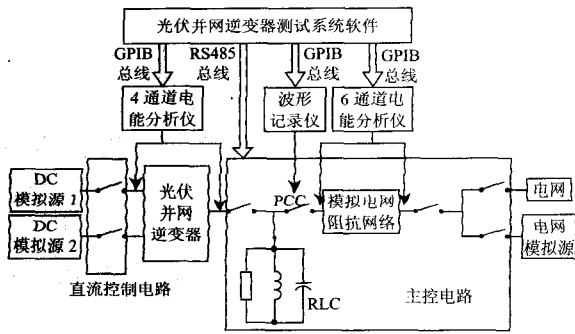


图3 光伏并网逆变器性能检测平台硬件结构

Fig. 3 Hardware block of photovoltaic inverter test system

机通过 GPIB 总线控制直流电源、交流电源、功率分析仪、波形记录仪等仪器，实现对交直流电源的编程控制、数据的自动采集和分析、波形的记录等功能。

### 2.3 软件系统构成和设计

LabVIEW 语言是目前基于虚拟仪器技术较好的软件平台之一，具有良好的易用性、稳定性，有利于降低成本(包括购买成本和维护成本)，同时可以保证开发软件良好的运行效率<sup>[14-19]</sup>。光伏并网逆变器检测平台软件主要包括 3 个软件模块，如图 4 所示，用来实现仪器设备控制、数据处理、数据传输及分析等功能。

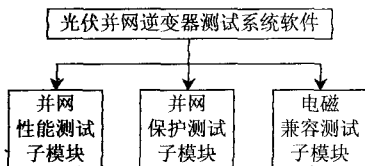


图4 光伏并网逆变器检测平台软件结构

Fig. 4 The software block diagram of photovoltaic inverter test system

1) 并网性能检测子系统。实现效率、电能质量、功率因数的测试。子系统包括直流源的输出设置和仪器测量 2 个子模块。仪器测量模块实现谐波电流、交直流功率、功率因数、三相不平衡、闪变等相关参数的测量，并通过调动仪器驱动来实现。

2) 并网保护测试子系统。实现过/欠电压、过/欠频、防孤岛功能测试。该子系统主要包括可编程交流电源的设置、可调 RLC 负载的设置、波形数据的读取和分析，并对波形数据进行分析处理，判断出保护时间和保护幅值。

3) 电磁兼容测试子系统<sup>[20]</sup>。实现电压波动和闪烁、电压骤升骤降抗扰度的测试。该子系统主要包括电网模拟阻抗网络、可编程电源输出的设置、电压波动的测量等子模块。

### 3 试验实例

对德国生产的单相 SP 3000E 并网逆变器进行了测试，此时 SP 3000E 并网逆变器的频率工作范围为 49.80~50.20 Hz。过频率和欠频率保护的试验结果如图 5、6 所示。从图 5、6 可以看出，当并网电源频率不小于 50.20 Hz 时，被测逆变器保护装置动作，逆变器停止输出；当并网电源频率不大于 49.80 Hz 时，保护装置动作，逆变器停止输出，这与产品说明书中标明的频率工作范围基本一致。

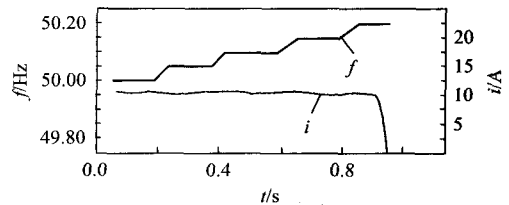


图5 过频率保护试验波形

Fig. 5 Test diagram of over-frequency protection

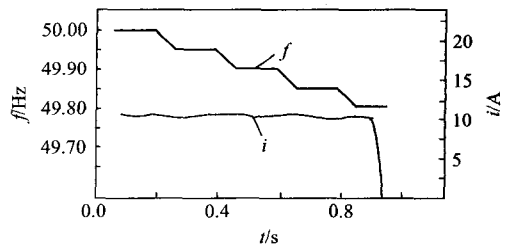


图6 欠频率保护试验波形

Fig. 6 Test diagram of under-frequency protection

### 4 结论

光伏发电系统能够充分发挥太阳能光伏发电适宜分散供电的优势，但对电网也带来一定的影响，包括电能质量和各种保护功能等方面。本文研究分析了国内外光伏并网发电系统的相关标准，提出具体的测试步骤及方法，并开发了光伏并网逆变器检测平台。实践证明，该平台系统功能完善、设备配置合理、操作方便、测量精度高和自动化程度高。

### 参考文献

- [1] GB/T 19939-2005, 光伏系统并网技术要求[S].
- [2] GB/T 20046-2006, 光伏(PV)系统接口特性[S].
- [3] IEEE Std 929-2000, IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic systems[S].
- [4] IEEE Std 1547.1-2005, IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems[S].
- [5] Stevens J. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems[R]. Photovoltaic System Applications Department, California: Sandia National Laboratory, 2000.

- [6] Woyte A, Belmans R, Nijs J. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18(1): 157-162.
- [7] Kern G A. Sunsine 300, utility interactive AC module anti-islanding test results[C]//Proceedings of the 26th IEEE PVSC. Anaheim, CA: IEEE, 1997: 1265-1268.
- [8] Huang S J, Pai F S. A new approach to islanding detection of dispersed generators with self-commuted static power converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 500-507.
- [9] Wichert B, Dymond M, Lawrance W. Development of a test facility for photovoltaic-diesel hybrid energy systems[J]. Renewable Energy, 2001, 22(1): 311-319.
- [10] Yu B G, Matsui M, So J H, et al. A high power quality anti-islanding method using effective power variation[J]. Solar Energy Journal, 2008, 81(4): 368-378.
- [11] Chowdhury S P, Chowdhury S, Crossley P A. Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: a comprehensive survey[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(6): 984-992.
- [12] Liserre M, Pigazo A, Dell Aquila A, et al. An anti-islanding method for single-phase inverters based on a grid voltage sensorless control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1418-1426.
- [13] Ye Z H, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone Concept[J]. IEEE Trans on Power Electronic, 2004, 19(5): 1171-1176.
- [14] Forero N, Hernandez J, Gordillo G. Development of a monitoring system for a PV solar plant[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15): 2329-2336.
- [15] 闫华光, 李华, 赵莎, 等. 基于虚拟仪器技术的电能质量校准装置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 103-105.
- Yan Huaguang, Li Hua, Zhao Sha, et al. Power quality calibration device based on virtual instrument technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 103-105(in Chinese).
- [16] Alex See Kok Bin, Shen Weixiang, Ong Kok Seng, et al. Development of a LabView-based test facility for standalone PV systems[C]//Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'06). Malaysia: IEEE, 2006: 275-280.
- [17] Beck D, Brand H, Karagiannis C, et al. The first approach to object oriented programming for LabVIEW real-time targets[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(3): 930-935
- [18] Nikitin P, Rao K. LabVIEW-Based UHF RFID tag test and measurement system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2374-2381.
- [19] Goulart T, Consonni D. Automated system for measuring electrical three-phase power components[J]. IEEE Transactions on Education, 2001, 44(4): 336-341
- [20] Zulkifli M, Harun S, Thambiratnam K, et al. Self-calibrating automated characterization system for depressed cladding EDFA applications using LabVIEW software with GPIB[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2677-2681.



闫华光

收稿日期: 2010-07-14.

作者简介:

闫华光(1977), 男, 硕士, 高级工程师, 从事能效测评技术、分布式电源检测技术、节能技术研究及咨询工作, E-mail: hgyan@epri.sgcc.com.cn.

(编辑 张磊)