

# 目 录

第 1 章 光伏逆变器测试解决方案 .....	1
1.1 光伏逆变器原理与测试环节 .....	1
1.1.1 光伏发电系统 .....	1
1.2 光伏逆变器原理与测试解析 .....	1
1.2.1 光伏逆变器原理 .....	1
1.2.2 光伏并网逆变器发电系统测量平台 .....	1
1.3 光伏并网逆变器认证规范 .....	2
1.3.1 NB/T 32004-2013 技术标准 .....	2
1.3.2 IEC61000-4-7、VDE-AR-N4105 谐波测量标准 .....	2
1.4 致远电子光伏并网逆变器测试方案 .....	3
1.4.1 功率分析仪管理软件 PAManager .....	3
1.4.2 低电压穿越(LVRT)测试 .....	6
1.4.3 谐波与谐波畸变测量 .....	9
1.4.4 防孤岛效应保护 .....	12
1.4.5 MPPT 跟踪效率与转换效率测量 .....	14
1.4.6 功率因数、电压不平衡度、直流分量 .....	18
1.4.7 过电压压/欠电压保护、交流输出过频/欠频保护 .....	21
1.5 致远电子 PA6000 功率分析仪介绍 .....	25
1.5.1 PA6000 功率分析仪基本参数 .....	25
1.5.2 PA6000 功率分析仪功能 .....	25
1.5.3 PAManager 数据管理软件功能 .....	26
1.5.4 PA6000 功率分析仪校准认证与校准体系 .....	26

# 第1章 光伏逆变器测试解决方案

## 1.1 光伏逆变器原理与测试环节

### 1.1.1 光伏发电系统

光伏并网发电系统是的一种新能源发电系统，其工作原理是先利用光伏半导体材料的光伏效应将太阳能转化为直流电，然后通过交直流转换将直流电变成交流电，最后通过电网将生成的交流电输送到用户端。一般的光伏发电系统分为集中式系统和分布式系统两种。集中式系统主要指建在荒漠地区的大型光伏电站，能大量、稳定地采集太阳能，然后通过高压远距离供电方式为电网负载提供能源；分布式主要指建于城市建筑物屋顶的光伏发电项目，就近解决用户的用电问题，通过并网实现供电差额的补偿与外送。虽然电力传输的方式不一样，但两者都是一种并网型的光伏发电系统。



图 1.1 光伏发电系统原理图

## 1.2 光伏逆变器原理与测试解析

### 1.2.1 光伏逆变器原理

逆变器是一种用于将直流电转换成交流电的电力调整装置，其核心部分是逆变桥式回路。通过控制逆变桥中的晶体管开关元件周期性地打开、关闭，将输入的直流信号转换成交流信号。为了充分利用太阳能，令整个发电系统以最大功率输出，需要在逆变器直流输入端加入最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，简称 MPPT）电路。此外，根据实际应用中输出信号质量的需求，还应该在电路中加入滤波器。

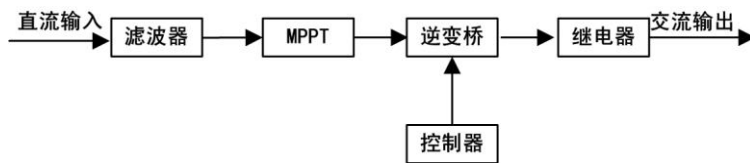


图 1.2 逆变器内部结构图

### 1.2.2 光伏并网逆变器发电系统测量平台

如图 1.3 对于光伏逆变测试系统，一般利用 DC 电源模拟光伏电池，利用 AC 电源模拟电网，可控 RLC 负载模拟不同状态下的并网点负载情况。根据其电气参数测量要求，一般采用功率分析仪器作为主要测试工具，辅以 PC 端分析软件进行数据分析和报表生成。

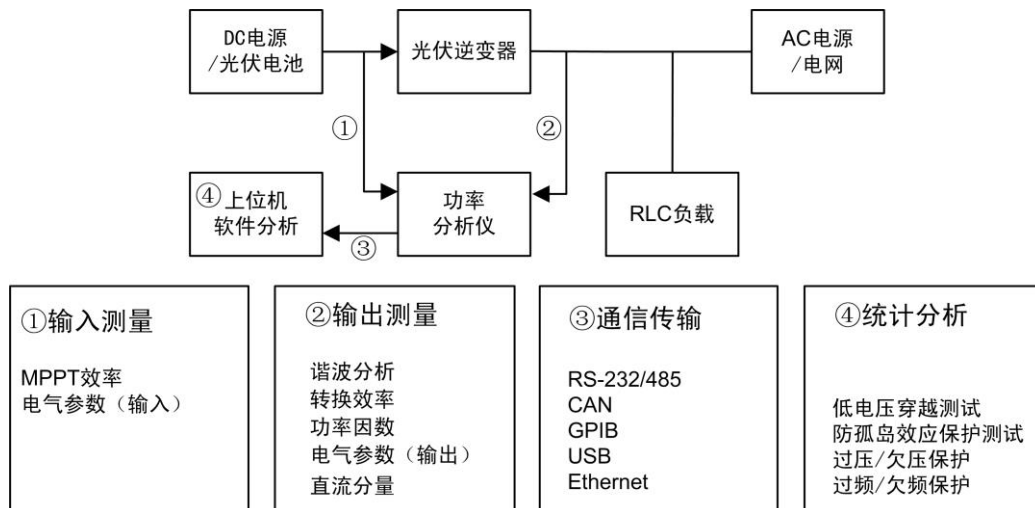


图 1.3 光伏并网逆变器系统测量平台框图

## 1.3 光伏并网逆变器认证规范

### 1.3.1 NB/T 32004-2013 技术标准

NB/T 32004-2013 是中华人民共和国能源行业标准光伏发电并网逆变器技术规范，具体要求测量的参数如下：

1. 电气参数
  - 额定输入输出；
  - 效率：MMTP 效率、转换效率。
2. 电能质量要求
  - 谐波和波形畸变；
  - 功率与功率因数；
  - 三相不平衡度；
  - 直流分量。
3. 电气保护功能
  - 低电压穿越；
  - 防孤岛效应保护；
  - 过压与过频保护。

### 1.3.2 IEC61000-4-7、VDE-AR-N4105 谐波测量标准

#### 1. IEC61000-4-7

IEC61000-4-7 是国际电能质量测量标准中能准确测量电网谐波的唯一标准，并网设备（包括光伏逆变器）依照该标准规定的测量方法得出的谐波测量结果才具有实际意义，可以根据标准中的谐波限值标准分析测量对象的谐波含量是否超标。

#### 2. VDE-AR-N4105

VDE-AR-N4105 是德国新颁布的低压电源并网运行管理规定，自 2012 年起就在德国光伏逆变器行业中强制执行，是目前世界上最严格的谐波检测标准。其检测难点在于测量设备

必须提供高达 178 次谐波的测量结果来进行谐波分析。此外，该标准还对有功功率控制精度、有功功率波动等参数有特殊测试要求。

## 1.4 致远电子光伏并网逆变器测试方案

致远电子作为一家高端仪器研发企业，在高端测量仪器领域拥有十几年丰富的研发和市场经验，引领着行业发展方向。根据光伏逆变器行业的产品测试需求，致远电子提供了基于 PA6000 功率分析仪的光伏并网逆变器测试解决方案，其方案优势如下：

- **PAManager 软件自动数据筛选与负载点数据捕获功能：**大幅减少测试过程中的人工操作与人工误差，提供最便捷准确的数据测量与数据分析方案；
- **独有的真实低电压穿越测试技术：**PA6000 功率分析仪在高达 10ms 数据刷新率支持下能对工频信号进行完整的半波分析，业界唯一能真正实现低电压穿越测试数据波形记录与分析的测量方案；
- **严格符合德国 VDE-AR-N4105 谐波测量标准：**PA6000 功率分析仪在符合 IEC 谐波测量标准前提下，仍能提供 256 次谐波测量能力，是全球唯一能根据德国 VDE-AR-N4105 标准要求测量 178 次谐波的分析仪器；
- **准确捕捉防孤岛效应测试全程波形细节：**200KS/s 采样率令 PA6000 功率分析仪能同时实现数据测量与示波器的瞬态波形分析功能，提供独一无二的便捷体验；
- **同时支持各地区 MPPT 效率测试标准：**支持动态与静态 MPPT 效率测量，且权重系数自由切换，方便导出各地区效率报表；
- **同步误差低于 10ns，准确测量功率因数：**PA6000 功率分析仪将功率输入单元的同步误差控制在 10ns 以内，能对功率因数、三相不平衡度等对电流电压相位差十分敏感的参数进行最精确的测量；
- **半波分析技术实现过欠压、过欠频保护测试瞬时：**业界最高 10ms 数据刷新率，可对工频信号进行半波分析，轻松捕获 50ms 内脱网电压信号。

### 1.4.1 功率分析仪管理软件 PAManager

目前光伏并网逆变器测量一般都需要用到 PC 端数据分析软件，通过功率测量仪器与 PC 间的通信将测量数据上传给软件进行后续的数据记录和报表输出。但是传统分析软件导出的报表只是把测量数据的值罗列出来，测试人员往往需要花上大量的时间精力去人工分析寻找海量数据中的问题，分析结果容易出错，工作效率也十分低下。

#### 1. 致远电子 PC 端软件解决方案

根据实际光伏逆变器测试需要，致远电子提供了基于 PA6000 功率分析仪的配套 PC 端数据管理软件 PAManager（简称 PAM）。PAM 可以提供光伏逆变器测量常用的低电压穿越测试、谐波分析、FFT 视图、周期波动、闪变分析等数据分析功能。另外，针对光伏逆变器测试中存在的测量分析效率低下问题，致远电子特地在 PAM 加入了两项特色功能：智能筛选与负载点数据捕获，致力于提高测试人员的工作效率与仪器使用体验。

- **PAM 自动数据筛选功能**

PAM 在测量过程中能实时地将异常数据自动筛选并标示，如图 1.4 所示。在客户进行自动测量完成后 PAM 能即时输出测量数据报表与异常数据分析结果，大幅提高工作效率。



图 1.4 PAM 软件异常数据自动标示功能

● PAM 负载点数据捕获功能

此外，为了满足实际测量现场的需要，PAM 还具备负载点数据捕获功能。此功能在谐波、无功功率、功率因数测量等需要在不同有功负载情况下进行测量的情况十分有用，能有效避免了人手操作带来的测量误差。在人工调节负载量程时，完全由程序来自动捕获目标负载点的瞬时相关参数，让测量变得更方便、更准确。自动测量功能界面如图 1.5 所示。



图 1.5 PAM 软件自动测量功能

● VDE-AR-4105 标准自动化测试

VDE-AR-4105 标准在光伏逆变器行业认证中应用越来越广泛，针对此标准的测量项目，PAM 具备有功功率调节精度测试、电网过频下控制有功功率波动的测试、功率因数和有功功率特征曲线测试、三相不平衡最大幅度统计测试 4 种自动化测量功能，能为使用者提供智能化的

VDE-AR-4105 标准测试体验，减少人工操作，提升工作效率。

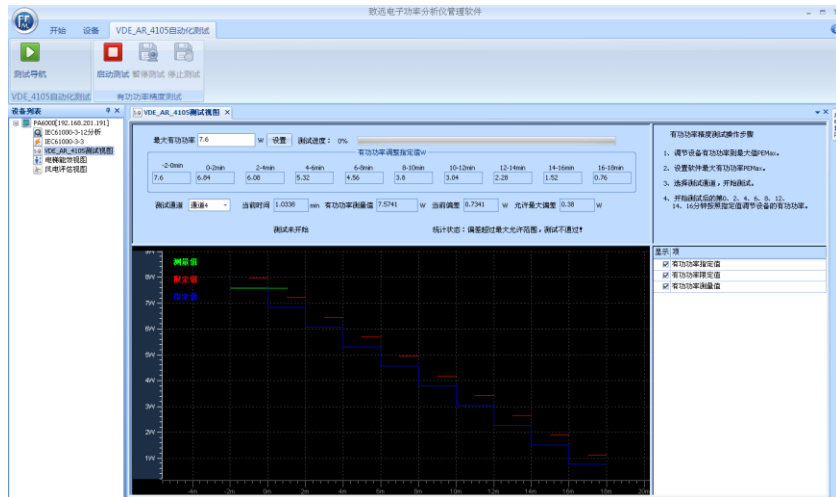


图 1.6 PAM 软件有功功率调节精度测试功能



图 1.7 PAM 软件功率因数和有功功率特征曲线测试功能

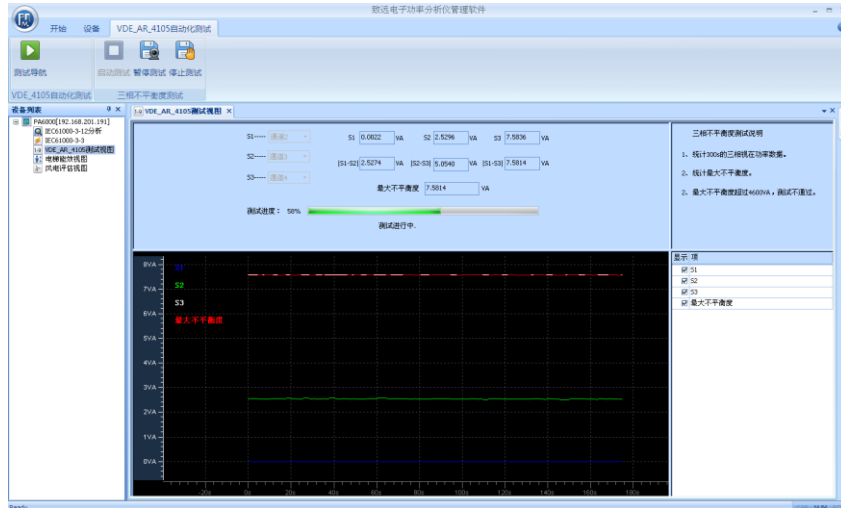


图 1.8 PAM 软件三相不平衡最大幅度统计测试功能

PA 系列功率分析仪管理软件 PAM 的设计从实际测量人员角度出发，通过数据筛选与负载点数据捕获功能大幅减少测试过程中的人工操作，还具备实现各类标准自动化测试的软件定制服务，能提供最便捷的数据测量与数据分析体验，引领着功率分析仪器配套软件智能化的发展方向。

#### 1.4.2 低电压穿越(LVRT)测试

如图 1.9 所示，当电网发生故障导致并网点电压跌落时，所有连接的光伏并网逆变器都应该在一定时间内保持与电网的连接，向电网输出无功功率，尽力维持电网电压，避免电网持续跌落造成电网供电瘫痪。因此，必须对光伏逆变器进行低电压穿越（LVRT: Low-Voltage Ride Through）测试，检验其能否在并网点电压跌落时保持与电网持续连接。

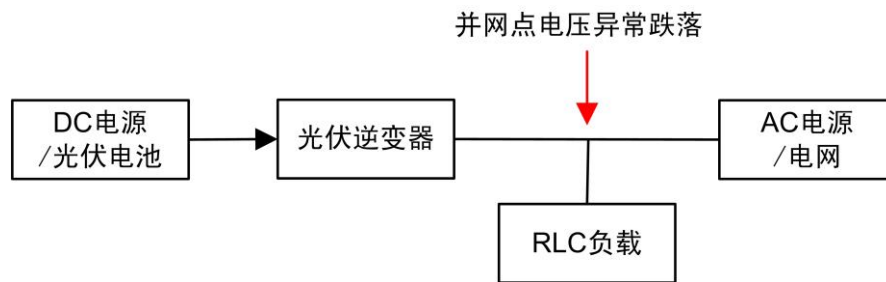


图 1.9 低电压穿越发生示意图

##### 1. NB/T 32004-2013 低电压穿越测试标准

根据 NB/T 32004-2013 的要求，当光伏逆变器并网时，要求若并网点电压跌落时在一定范围内逆变器能不间断并网运行。具体有以下两个要求：

- 逆变器要具有并网点电压最低跌至 20% 额定电压时能够保证不脱网连续运行 625ms 的能力；
- 并网点电压在发生跌落后的 2s 内若能够恢复到额定电压的 90% 时，逆变器能够保证不脱网继续运行。

根据图 1.10 所示，并网点电压处于曲线 1 以上范围时，逆变器必须保证不脱网连续运行；若电压跌落超过 2s 仍未恢复到额定电压的 90%，即并网点电压处于曲线 1 以下，且电

压跌落时间超过 2s，则逆变器必须脱离电网。

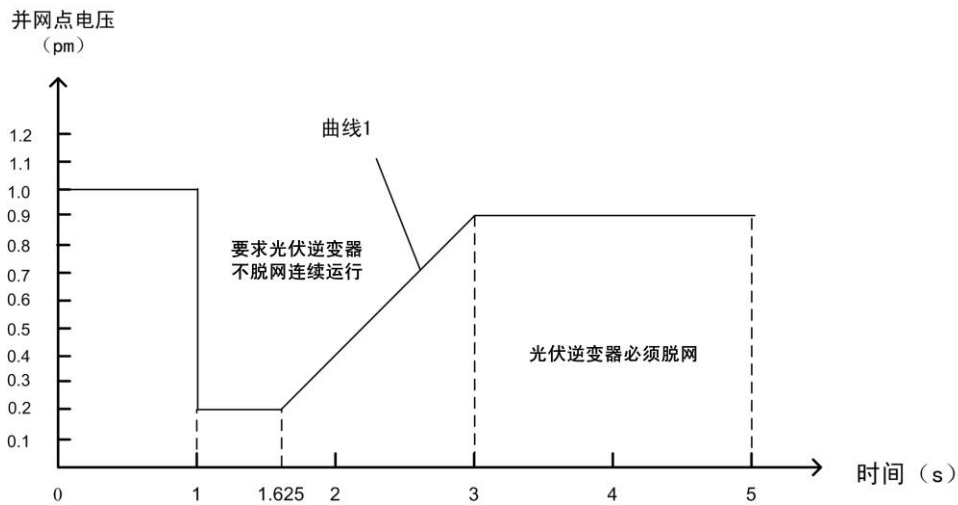


图 1.10 光伏逆变器低电压耐受能力要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，低电压穿越测试需要记录电压、有功电流、无功电流、有功功率、无功功率在不同的并网点跌落电压、不同的负载功率状态下随时间的变化。

## 2. 致远电子低电压穿越测试方案与优势

测量平台：PA6000 功率分析仪与 PAM 软件。

基于 PA6000 功率分析仪的光伏逆变系统模拟测试平台，是利用光伏方阵模拟器控制输入直流的数值，电网模拟电源与逆变器连接模拟电网与逆变器的并网状态，再通过调节电网模拟电源的输出电压仿真电网并网点电压跌落的状态。

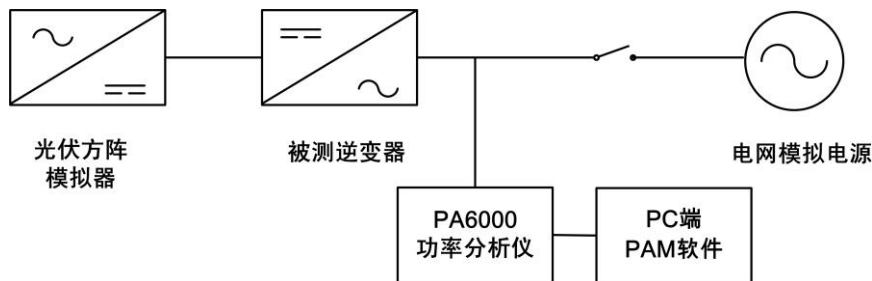


图 1.11 低电压穿越测试测试平台

方案优势：

### ● 10ms 数据刷新率实现独有的真实低电压穿越测试

低电压穿越需要对整个并网点电压跌落过程的电压波形进行分析。但以业界同行的功率分析仪 WT\*\*\*\*系列为例，最高只能提供 50ms 的数据刷新率，根本无法显示出周期为 20ms 的工频电压波形。PA6000 功率分析仪提供独有的 **10ms 行业最快数据刷新率**，成功突破在低电压穿越测试中对电压波形进行半波分析的技术难题，成为当前**唯一能进行真正低电压穿越测试**的功率分析仪器！

注：致远电子利用单通道数据传输速度高达 2.5Gb/s 的 PCIE 通信架构，实现 PA6000 功率分析仪内部 FPGA 数据采集与 CPU 数据处理之间的远超本地总线传输速度的高速数据交换，达到了 10ms 行业最快数据刷新速度。



- **0.02%测量精度完美捕捉低电压穿越测试中的电压细节**

PA6000 功率分析仪提供业界顶尖的 **0.02%功率精度**，能最准确地测量出并网点电压跌落的幅度，为测试结果的准确性提供了有力的保障。如此高的功率精度，一是得益于 PA6000 的前端调理电路中优秀的温漂、噪声处理技术保持原始信号的精准度。二是通过致远电子独特设计的 FPGA+DSP 大数据实时运算处理单元将采集到的大容量原始数据迅速处理完毕传输给 CPU，实现**精度与速度的完美结合**。

### 3. 测试结果

测量后的数据可通过上位机配套分析软件 PAM 进行图像显示与数据分析，如图 1.13、图 1.13 所示。收集的数据可以以数据报表的形式输出，如表 1.1 所示。

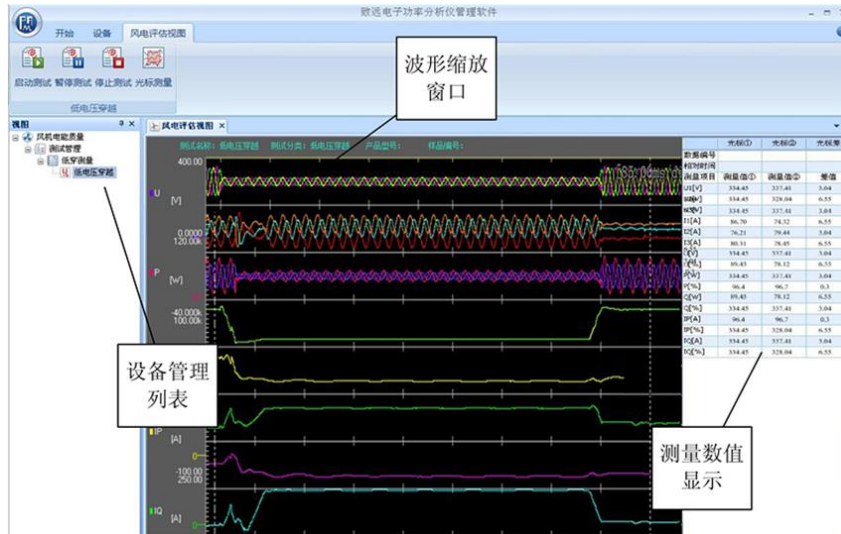


图 1.12 PAM 软件低电压穿越测试波形显示

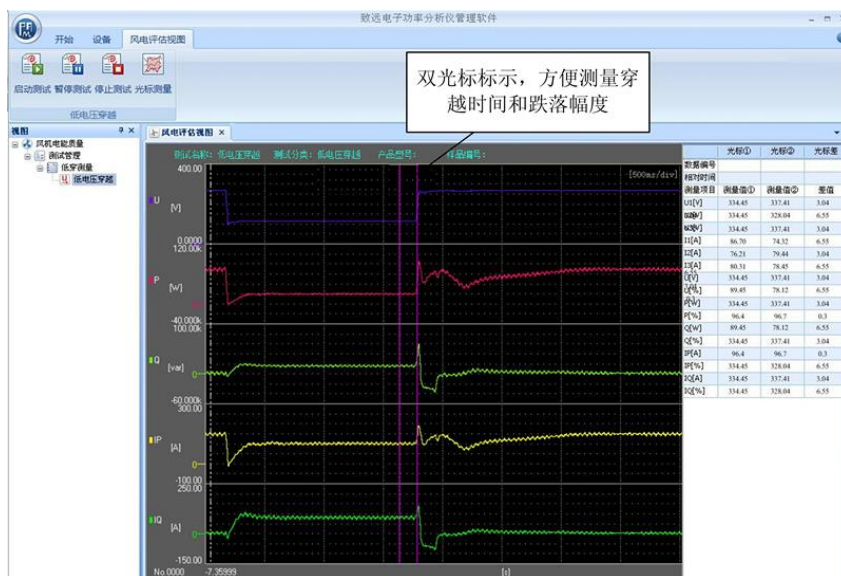


图 1.13 PAM 软件低电压穿越测试结果分析

表 1.1 PAM 软件低电压穿越测试报表

短路相		跌落电压	功率	跌落次数
三项同时跌落		20%	10%-30%	第一次跌落
测量参数	电压跌落前	穿越过程中		电压恢复后
交流输出侧A相电压Ua(Vrms)				
交流输出侧B相电压Ub(Vrms)				
交流输出侧C相电压Uc(Vrms)				
交流输出侧A相电流Ia (Arms)				
交流输出侧B相电流Ib (Arms)				
交流输出侧C相电流Ic (Arms)				
交流输出侧有功功率P (kw)				
交流输出侧无功功率Q (kVar)				
直流侧母线电压Udc(Vdc)				
直流侧母线电流Idc(A)	<input type="checkbox"/>			
故障持续时间S (ms)				
功率恢复时间R (s)				

因此，拥有不可替代的 **10ms 数据刷新率**与 **0.02%测量精度**的 PA6000 功率分析仪，搭配自动化测量软件 PAM 使用，能最便捷地获得最真实的低电压穿越测试结果，是**市场上唯一能提供完整低电压穿越测试电压半波分析**的测量解决方案。

### 1.4.3 谐波与谐波畸变测量

作为一种典型的非线性负载，逆变器也是一种谐波源。而并网型逆变器作为一种谐波源，在生产过程中必须通过谐波测量标准检验才能避免在使用时生成过量的谐波污染电网，否则将会影响到电网的传输效率，企业也要承受来自供电局的罚款。

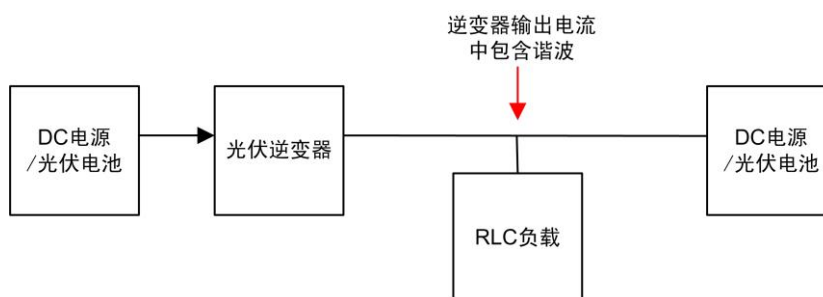


图 1.14 光伏并网逆变系统中的谐波生成

#### 1. 谐波测试标准

##### ● VDE-AR-N4105

VDE-AR-N4105 是德国新颁布的低压电源并网运行管理标准，其中谐波测量部分是当前世界上最严格的谐波检测标准，引领着谐波测试标准的发展方向。根据其要求，测量设备必须在符合 IEC61000-4-7 谐波测量标准的情况下，仍能提供高达 178 次谐波的测量结果。

##### ● IEC61000-4-7

IEC61000-4-7 是国际电能质量测量标准中能准确测量电网谐波的唯一标准。该标准中的谐波测量算法是根据电网谐波特性设计的，并为测量结果提供了对应的电流谐波含量限值参考指标。相比于不可靠的传统谐波测量方式，只有 IEC61000-4-7 谐波测量标准能为测试方提供最客观、受行业认可的电网谐波测量结果。根据该标准规定，电网谐波分析需要测量电流的谐波、间谐波和高频谐波。

注：由于过去谐波测量标准对测量仪器的谐波的计算方法没有统一规定，导致谐波测量结果没有唯一的参考标准，根本无法正确反映出测量信号中的谐波含量。由于电网谐波污染问题的日益突出，为了满足对并网供电设备进行精确谐波测量的需要，国际电工协会（IEC）提出了谐波测量技术标准 IEC61000-4-7。该标准制定了面向并网供电设备谐波测量的计算公式与对应的电流谐波限值，让谐波测量具备准确性、权威性、一致性。

● **NB/T 32004-2013**

根据 NB/T 32004-2013 标准，逆变器运行时，注入电网的电流谐波总畸变率限值为 5%，具体各次谐波电流含有率限值见表 1.2。

表 1.2 各次谐波电流含有率限值

奇次谐波次数	含有率限值 (%)	偶次谐波次数	含有率限值 (%)
3~9	4.0	2~10	1.0
11~15	2.0	12~16	0.5
17~21	1.5	18~22	0.375
23~33	0.6	24~34	0.15
35 以上	0.3	36 以上	0.3

根据 NB/T 32004-2013 标准，逆变器启动并置于正常工作状态，在不同负载功率情况下（30%、50%、100%）测量逆变器三相输出电流的各次谐波幅值与谐波含有率，至少测量 36 次谐波，每个功率区间的连续采样时间不能少于 1min。

2. 致远电子谐波测试解决方案与优势

测量平台：可控 RLC 负载、PA6000 功率分析仪与 PAM 软件。

利用 PA6000 功率分析仪测量逆变器输出的电流谐波并作谐波分析。测量所得的数据通过通信接口传回 PC 端软件 PAM 进行报表输出。平台如图 1.15 所示。

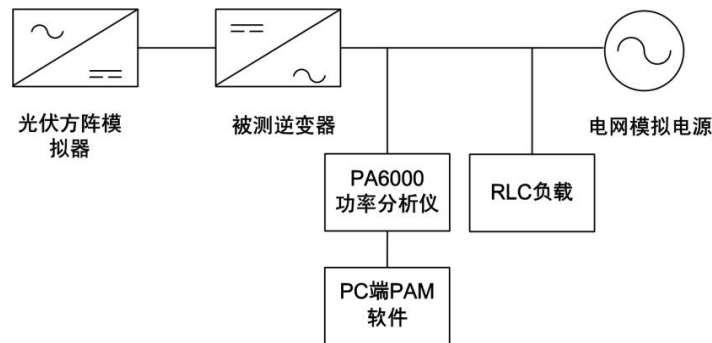


图 1.15 谐波分析测量平台

方案优势：

● **高达 256 次 IEC 谐波测量，独家支持 IEC61000-4-7 与 VDE-AR-N 4105 标准**

PA6000 功率分析仪拥有 9600 个点，256 次谐波测量的高端谐波分析能力，是市面上唯一一种完整支持 VDE-AR-N 4105 谐波测量标准的功率分析仪器，能在 IEC 谐波测量方式下进行 178 次以上谐波测量个数测量，为光伏逆变器提供最权威、最精密的电流谐波分析结果。

- 内嵌 IEC 谐波分析功能，便捷的现场测试体验

传统的光伏逆变器测量方案都必须通过 PC 端分析软件进行 IEC 谐波分析，PA6000 功率分析仪却可直接在**仪器上实现 IEC 谐波分析功能**，同时自动标示幅值超过限值的问题谐波数据，方便现场测试需要。

### 3. 测量结果

测量数据可通过 PC 端分析软件 PAM 进行数据图像显示与报表输出，如图 1.16、图 1.17、表 1.3 所示。

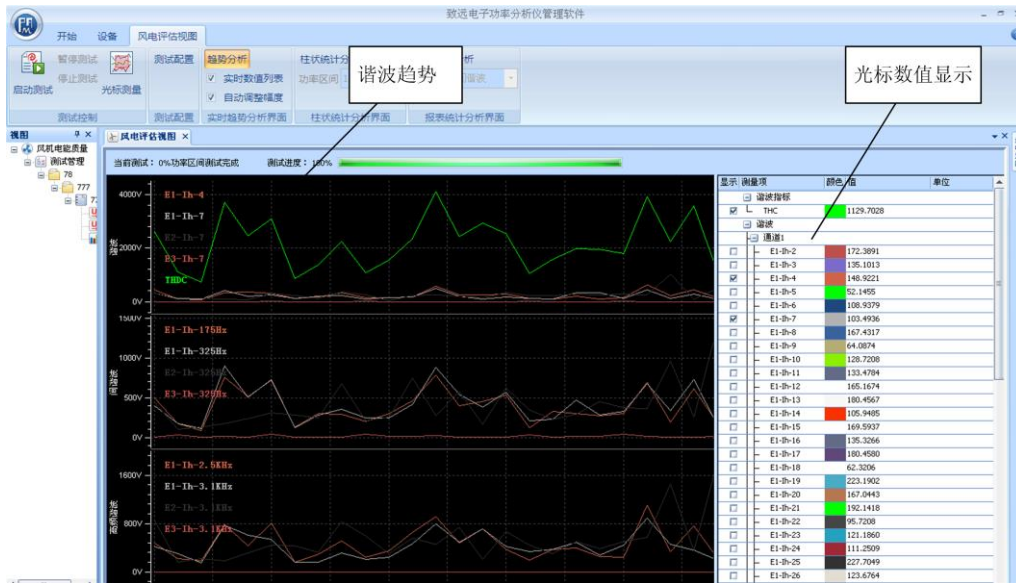


图 1.16 谐波趋势



图 1.17 柱图分析

表 1.3 PAM 软件谐波测量输出报表

		谐波和波形畸变					
标准要求		100%功率					
		L1		L2		L3	
		实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)
总	<5.0%	--		--		--	
1次	----						
2次	<1.0%						
3次	<4.0%						
.....	.....						
35次	<0.3%						
36次	<0.075%						
标准要求		50%功率					
		L1		L2		L3	
		实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)
总	<5.0%	--		--		--	
1次	----						
2次	<1.0%						
3次	<4.0%						
.....	.....						
35次	<0.3%						
36次	<0.075%						
标准要求		30%功率					
		L1		L2		L3	
		实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)	实际值 (A)	含有率 (%)
总	<5.0%	--		--		--	
1次	----						
2次	<1.0%						
3次	<4.0%						
.....	.....						
35次	<0.3%						
36次	<0.075%						

作为市面唯一一种同时支持 IEC61000-4-7 与 VDE-AR-N 4105 标准的谐波测量方案，PA6000 功率分析仪能提供基于 IEC 标准的最真实的谐波测量结果，PAM 软件能提供最便利的数据分析与报表输出功能体验。

#### 1.4.4 防孤岛效应保护

孤岛效应是指当电网供电因故障或停电维修等情况发生电压异常而跳脱时，各个用户端的并网逆变器发电系统却未能即时检测出停电状态而将自身从市电网络脱离，于是形成由光伏并网逆变发电系统和周围的负载组成的一个自给供电的孤岛状况。如图 1.18 所示

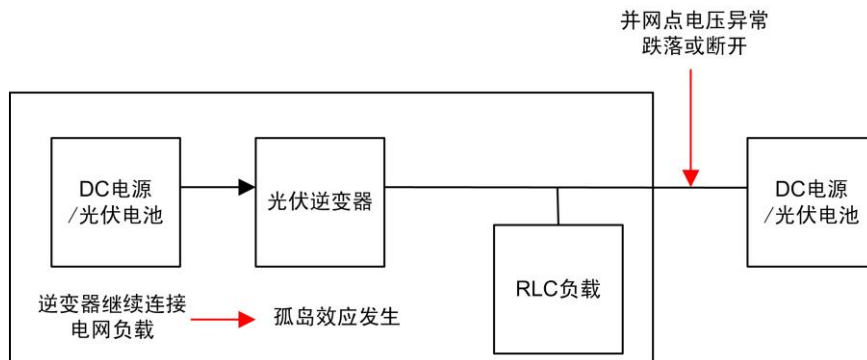


图 1.18 孤岛效应发生示意图

孤岛效应令光伏发电系统附近的负载端持续有电流通过，不但危及电网输电线路维修

人员的安全，还会影响传输电能质量，令电力孤岛区域的供电电压与频率将不稳定。且当电网供电恢复后孤岛效应会造成的电网电流相位不同步，所以当光伏逆变器与电网并网连接时，应具备防孤岛效应保护功能。

### 1. 防孤岛效应测试 NB/T32004-2013 标准

根据 NB/T32004-2013 标准规定，若逆变器与电网直接的并网点出现电压、频率以及阻抗出现异常变化时，逆变器应在 2s 内停止向电网供电，同时发出警示信号。在测量逆变器的主动式防孤岛效应保护功能时，需要利用电网模拟电源和 RLC 负载来进行，并且测量设备要能同步测量出并网点的输出电压、频率和阻抗，检验逆变器防孤岛效应能力的可靠性。

### 2. 致远电子防孤岛效应测试方案与优势

测试平台：RLC 负载、PA6000 功率分析仪与 PAM 软件。

利用电网模拟电源与 RLC 负载来实现并网点负载不匹配的测试环境。根据标准规定的有功功率、无功功率与额定值的偏差百分比，通过调节 RLC 负载的电阻值和电抗值，制造各种并网点负载不匹配状态，测量逆变器从负载改变到断开所用的时间长短。

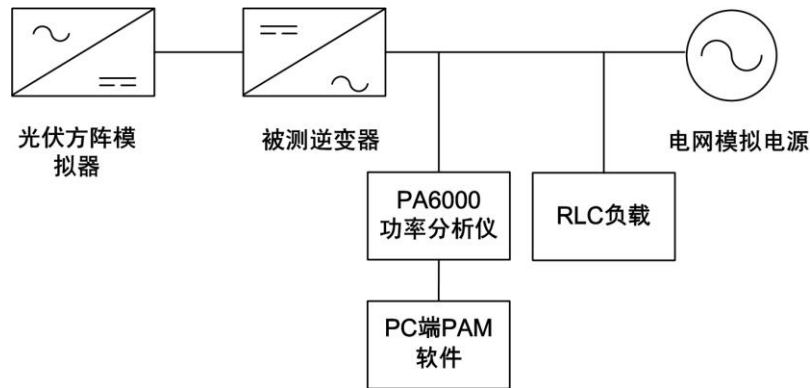


图 1.19 防孤岛效应保护测试平台

#### 方案优势：

- 200KS/s 采样率与 2G 内存实现测量波形的瞬态记录与分析

在防孤岛效应保护测试中，需要使用示波器进行整个电流跌落过程的波形记录和分析，计算被测逆变器在负载不匹配情况下的跳闸时间是否符合标准。PA6000 功率分析仪拥有 200KS/s 的高采样率和 2G 大容量内存，能对长达 20s 的测量信号进行保存及波形细节放大分析，完美捕捉逆变器输出电流从负载不匹配发生到逆变器脱网两个时间点之间的所有信号细节，在屏幕上将测量数据的数值和波形同时显示。因此，PA6000 完全能取代防孤岛效应测试中示波器的位置，实现独一无二的一机两用能力，既减少测试人员的人工操作，又降低光伏逆变发电系统测试平台的硬件成本。

注：在对时间测量值十分敏感的场所，或测量结果非常接近限制值时，使用 ZDS2000 系列示波器进行瞬态波形观察能获取更精准的测试结果。

### 3. 测试结果

PAM 软件提供防孤岛效应测试自动报表生成功能，输出报表如表 1.4 所示。



表 1.4 PAM 软件孤岛效应测量报表

防孤岛效应保护									
序号	$P_{EUT}$ (%额定EUT)	无功负载(% $Q_L$ )	$P_{AC}$ (%额定)	$Q_{AC}$ (%额定)	运行时间(ms)	$P_{EUT}$ (kW)	实测 $Q_f$	$V_{DC}$ (V)	评述
1	100	100	0	0					测试A BL
2	66	66	0	0					测试B BL
3	33	33	0	0					测试C BL
4	100	100	-5	-5					测试A IB
5	100	100	-5	0					测试A IB
6	100	100	-5	5					测试A IB
7	100	100	0	-5					测试A IB
8	100	100	0	0					测试A IB
9	100	100	5	5					测试A IB
10	100	100	5	-5					测试A IB
11	66	66	5	0					测试A IB
12	66	66	0	-5					测试B IB
13	66	66	0	-4					测试B IB
14	66	66	0	-3					测试B IB
15	66	66	0	-2					测试B IB
16	66	66	0	-1					测试B IB
17	66	66	0	1					测试B IB
18	66	66	0	2					测试B IB
19	66	66	0	3					测试B IB
20	66	66	0	4					测试B IB
21	66	66	0	5					测试B IB
22	33	33	0	-5					测试C IB
23	33	33	0	-4					测试C IB
24	33	33	0	-3					测试C IB
25	33	33	0	-2					测试C IB
26	33	33	0	-1					测试C IB
27	33	33	0	1					测试C IB
28	33	33	0	2					测试C IB
29	33	33	0	3					测试C IB
30	33	33	0	4					测试C IB
31	33	33	0	5					测试C IB

基于 PA6000 功率分析仪和 PAM 管理软件的致远电子防孤岛效应测试解决方案，20s 波形回放和报表自动生成功能能为测试人员提供最便捷的测试体验。

#### 1.4.5 MPPT 跟踪效率与转换效率测量

光伏系统工作时，太阳能电池在一定的温度和日照强度下具有唯一的最大功率点，当太阳能电池工作在该点时能输出当前温度和日照条件下的最大功率。但由于太阳能电池的输出特性受负荷状态、日照量、环境温度等因素的影响、太阳能电池阵列的电压和电流均发生很大的变化，从而使输出功率不稳定，即最大功率点时刻变化。为了充分利用太阳能以获取最大功率输出，必须跟踪、控制太阳能电池的最大功率点、最大限度地利用太阳能。

逆变器转换效率是选购光伏逆变器的核心参数之一，转换效率的高低决定了逆变器的品质,对新能源产业的发展起着不可小觑的作用。目前，大多是太阳能电池的转换效率仅有 10%-20%左右，在此背景下，提升光伏逆变器的效率，对于提升太阳能并网发电系统的整体效率显得至关重要。高效率且具有低成本效益的逆变器成为评定太阳能发电系统优劣的关键指标。

##### 1. NB/T 32004-2013 测试标准

根据 NB/T 32004-2013 的要求，MPPT 效率包括动态 MPPT 效率和静态 MPPT 效率，测量方法按 EN 50530-2010 的要求进行或参见 NB/T 32004-2013 附录 K。

##### ● 静态最大功率点跟踪效率的测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，静态最大功率跟踪效率计算公式如下

$$\eta_{MPPT,sta} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{DC,i} I_{DC,i} \Delta T}{P_{MPP,PVS} T_M}$$

式中：  $U_{DC,i}$  — 逆变器输入电压的采样值；

$I_{DC,i}$  — 逆变器输入电流的采样值；

$P_{MPP,PVS}$  — 从光伏方阵中得到的最大功率输出；

$\Delta T$  — 连续两个采样值之间的周期（不大于20ms）；

$T_M$  — 总采样周期（不小于10min）。

静态最大功率点跟踪效率反应的是在给定的静态 PV 组件的特性曲线上，逆变器调节跟踪最大功率点的精度。

注： $U_{DC,i}$  和  $I_{DC,i}$  必须是同一时间的采样值。

#### ● 动态最大功率点跟踪效率的测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，动态最大功率跟踪效率计算公式如下

$$\eta_{MPPT,dyn} = \frac{1}{\sum P_{MPP,PVS,i} \Delta T_j} \sum U_{DC,i} I_{DC,i} \Delta T_i$$

式中：  $\Delta T_j$  —  $P_{MPP,PVS,j}$  的采样间隔；  $U_{DC,i}$  — 逆变器输入电压的采样值

$\Delta T_i$  —  $U_{DC,i}$ 、  $I_{DC,i}$  的采样间隔；  $I_{DC,i}$  — 逆变器输入电流的采样值

$P_{MPP,PVS,i}$  — 从光伏方阵中得到的最大的功率输出

所以 MPPT 动态最大功率跟踪效率测量，我们应该测出太阳能电池输出的电压电流及最大功率输出，并进行上述公式的计算，才能得出结论。

## 2. EN 50530 MPPT 跟踪效率测试标准

### 欧洲静态 MPPT 效率和欧洲静态转换效率测试要求

根据欧洲电工标准化委员会专门制定标准 EN 50530(Overall Efficiency of Grid Connected Photovoltaic Inverters)。标准给出了欧洲静态 MPPT 效率和欧洲静态转换效率的计算公式，分别如下：

$$\eta_{MPPTstatEUR} = 0.03\eta_{MPPTstat5\%} + 0.06\eta_{MPPTstat10\%} + 0.13\eta_{MPPTstat20\%} + 0.10\eta_{MPPTstat30\%} + 0.48\eta_{MPPTstat50\%} + 0.20\eta_{MPPTstat100\%}$$



$$\eta_{\text{conv}EUR} = 0.03\eta_{\text{conv}5\%} + 0.06\eta_{\text{conv}10\%} + 0.13\eta_{\text{conv}20\%} + 0.10\eta_{\text{conv}30\%} + 0.48\eta_{\text{conv}50\%} + 0.20\eta_{\text{conv}100\%}$$

表 1.5 欧洲、CEC、广州权重系数

加权因子	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
欧洲效率权重	0.03	0.06	0.13	0.1	0.48	0.2	
CEC 效率权重		0.04	0.05	0.12	0.21	0.53	0.05
上海、广州效率权重	0.03	0.06	0.12	0.22	0.33	0.22	0.02
负载点	1	2	3	4	5	6	7
	5%	10%	20%	30%	40%	75%	100%

### 3. NB/T 32004-2013 转换效率测量标准

NB/T 32004—2013 中要求不带隔离变压器型逆变器的转换效率最大值应不低于 96%，带隔离变压器型逆变器的转换效率最大值不低于 94%。

转换效率公式如下：

$$\eta_{\text{conv}} = \frac{\int_0^{T_M} P_{\text{ac}}(t) dt}{\int_0^{T_M} P_{\text{dc}}(t) dt}$$

式中  $P_{\text{dc}}(t)$  表示逆变器 DC 输入端子输入的实时功率； $P_{\text{ac}}(t)$  表示逆变器 AC 输出端子输出的实时功率

### 4. 致远电子 MPPT、转换效率测试解决方案与优势

测量平台：PA6000 功率分析仪与光伏逆变系统模拟测试平台。

利用光伏方阵模拟器控制输入直流的数值，电网模拟电源与逆变器连接模拟电网与逆变器的并网状态，再通过调节光伏方阵模拟器模拟太阳电池输出电压电流的变化。

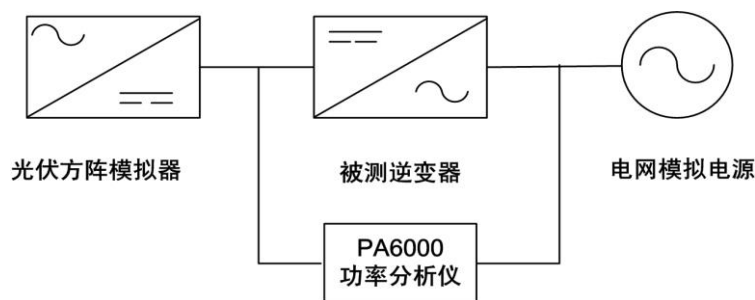


图 1.20 MPPT 效率、转换效率测量平台

方案优势：

- 最多支持 7 个功率输入单元，输入功率与输出功率同步测试，进一步提高准确度

传统测量转换效率，由于测量设备通道数有限，输入与输出只能分开测量，这样导致采集到的数据缺乏同步性，由此算得的转换效率自然不准确。针对多路输入的光伏逆变器，

PA6000 可轻松实现 4 通道输入，3 通道输出同时采样，并且 PA6000 内部采用高稳定度温度补偿的 100M 同步时钟实现 7 通道的 ADC 同步采样，同步采样时钟误差小于 10ns，满足高效能逆变器效率的极致测量要求。

- 支持权重系数自由切换，方便导出各地区效率报表

PAM 软件能够自由切换权重系数，支持欧洲效率、CEC 效率、中国各地区权重系数计算，并能快速的导出相应地区的效率报表，PA6000 是业内唯一支持效率权重系数自由切换的功率分析仪器。

- 支持自定义效率公式，方便导出 MPPT、转换效率报表

支持自定义效率测试公式，能同时显示 6 个效率测试结果，方便同时测量 MPPT 效率，转换效率。PAM 软件能够导出测试静态与动态 MPPT 报表，转换效率报表，方便检测机构进行操作，大大提高了工作效率。

### 5. 测试结果

测量后的数据可 PC 端分析软件 PAM 进行数据分析，导出记录报表如表 1.6 表 1.7 表 1.8 所示。

表 1.6 PAM 软件 MPPT 静态效率测试报表

MPPT 效率											
U <sub>mpp</sub> (V)	PV 模拟源 U/I 特性曲线类型	PV 模拟源输出最大功率点与额定输入功率比								欧洲效率	CEC 效率
		0.05	0.1	0.2	0.25	0.3	0.5	0.75	1		
		静态效率									
U <sub>MPPmin</sub>											

表 1.7 PAM 软件 MPPT 动态效率测试报表

MPPT 动态效率							
a) 辐照度 100-500W/m <sup>2</sup> (10%-50%P <sub>DC</sub> )							
循环次数	步长 (W/m <sup>2</sup> /s)	上升时间 (s)	驻留时间 (s)	下降时间 (s)	驻留时间 (s)	测试总时间 (s)	分段动态效率 (%)
2	0.5	800	10	800	10	3540	
2	1	400	10	400	10	1940	
3	2	200	10	200	10	1560	
4	3	133	10	133	10	1447	
6	5	80	10	80	10	1300	
8	7	57	10	57	10	1374	
10	10	40	10	40	10	1700	
10	14	29	10	29	10	1071	
10	20	20	10	20	10	900	
10	30	13	10	13	10	767	
10	50	8	10	8	10	660	

表 1.8 PAM 软件转换效率测试报表

功率点 (%)	转换效率								
	常温			低温			高温		
	输入功率 (kW)	输出功率 (kW)	效率 (%)	输入功率 (kW)	输出功率 (kW)	效率 (%)	输入功率 (kW)	输出功率 (kW)	效率 (%)
5									
10									
20									
25									
30									
50									
75									
100									

致远电子 PAM 软件能够方便的进行 MPPT 效率报表、转换效率报表导出、可自由选择欧洲、CEC、中国各地区权重系数，方便进行效率计算,PA6000 是业内唯一支持效率权重系数自由切换的功率分析仪器。

#### 1.4.6 功率因数、电压不平衡度、直流分量

良好的功率因数的确保，可以减少供电系统中的电压损失，可以使负载电压更稳定，改善电能的质量。通过改善功率因数，减少了线路中总电流和供电系统中的电气元件，不但减少了投资费用，而且降低了本身电能的损耗。

电压不平衡度是逆变器输出三相电的重要指标，三相不平衡有很大危害，影响用电设备的安全运行，增加线路的电能损耗，电动机效率降低，影响我们生活、工业生产的方方面面。

对于并网逆变器，在并网开关合上的瞬间，如果输出电压中有很大的直流分量，则会在逆变器与电网之间出现很大的冲击电流，影响了进网电流 THD。作为并网逆变器，为了获得更好的输出波形，保证电路的安全，要求输出电压中不含直流分量。

##### 1. NB/T 32004-2013 功率因数、电压不平衡度、直流分量测试标准

###### ● 功率因数测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，当逆变器输出有功功率大于其额定功率的 50%时，功率因数应不小于 0.98（超前或滞后）；输出有功功率在 20%~50%之间时，功率因数应不小于 0.95（超前或滞后）。

###### ● 电压不平衡度测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，逆变器并网运行时（三相输出），引起接入电网的公共连接点的三相电压不平衡度不应超过 GB/T15543-2008 规定的限值。逆变器引起该点负序电压不平衡度一般不超过 1.3%，短时不超过 2.6%。根据连接点负荷情况及安全运行要求可做适当变动，但必须满足负序电压不平衡度应不超过 2%，短时不超过 4%的要求。

###### ● 直流分量测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，逆变器额定功率并网运行时，向电网馈送的直流电流分量应不超过其输出电流额定值的 0.5%或 5mA，取两者中较大值。

##### 2. 致远电子功率因数、电压不平衡度、直流分量测试解决方案与优势

测量平台：PA6000 功率分析仪与 RLC 负载。

利用光伏方阵模拟器控制输入直流的数值，电网模拟电源与逆变器连接模拟电网与逆变器的并网状态，再通过调节虚拟负载模拟负载点的功率变化，即可通过测量设备 PA6000 功率分析仪测出相应的参数，如图 1.21。

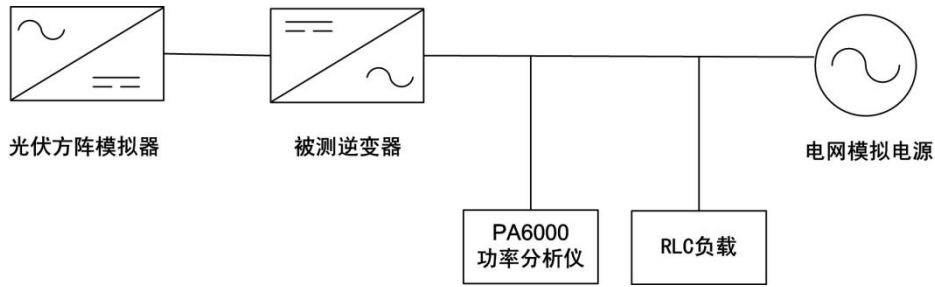


图 1.21 功率因数、电压不平衡度、直流分量的测量平台

**方案优势：**

- 支持负载点变化自动捕获，降低人工操作失误风险

由 PAM 软件自动监控整个测量过程，完成后直接导出测试不同负载点下的功率因数、电压不平衡度、直流分量的报表，大大提高检测的工作效率。

- 温补同步时钟高达 100M，同步误差小于 10ns

采用高稳定度温度补偿的 100M 同步时钟，避免温度变化带来时钟漂移所引入的测量误差。同时保证任一通道 ADC 的采样相位同步，误差在 10ns 以内，减少测量时 U、I 夹角的引入误差，保证功率因数测量精度。不仅如此，单独消零功能可以将特定输入通道的 DC 偏置设置为零值，这样可执行更精确的测量直流分量。

**3. 测试结果**

测量后的数据可通过 PAM 软件进行电压不平衡度，直流分量，功率因数的图像显示与数据分析，如下所示。



图 1.22 PAM 软件矢量图与三相不平衡度显示

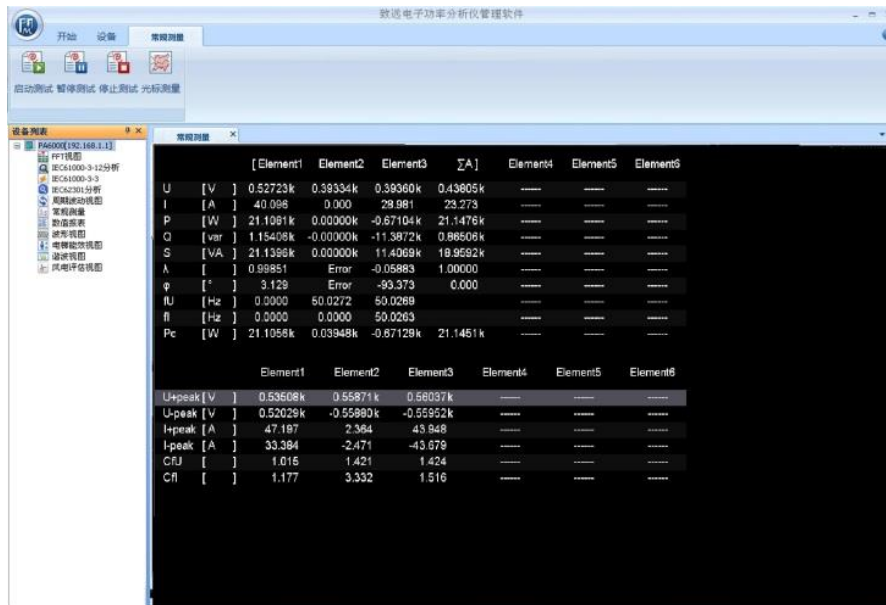


图 1.23 PAM 软件直流分量与功率因数显示

表 1.9 PAM 软件功率因数测试报表

设定负载点%	功率因数			要求
	L1	L2	L3	
30%				>0.95 (超前或滞后)
50%				>0.98 (超前或滞后)
70%				>0.98 (超前或滞后)
100%				>0.98 (超前或滞后)

表 1.10 PAM 软件电压不平衡度测试报表

电压不平衡度 (适用于三相样品)				
负载点 (%)	不平衡度概率大值	最大值	限值	短时限值
30			1.30%	2.60%
50				
75				
100				

表 1.11 PAM 软件直流分量测试报表

表8. 4. 3. 4	直流分量		
负载点 (%)	相位	直流分量 (A)	允许直流分量 (A)
30	L1		
	L2		
	L3		
50	L1		
	L2		
	L3		
75	L1		
	L2		
	L3		
100	L1		<input type="checkbox"/>
	L2		
	L3		

测量功率因数、电压不平衡度、直流分量需要根据负载点百分比变化进行分析，而传统的测量方法是由手动调节负载点的百分比变化的，十分繁琐，而且有时人工调节负载点偶尔会操作不准确，现在由致远电子 PA6000 功率分析仪提供配套的 PAM 软件，其能自动捕获负载点变化情况，并自动导出功率因数、电压不平衡度、直流分量的报表，大大降低人工操作失误的风险。

#### 1.4.7 过电压/欠电压保护、交流输出过频/欠频保护

逆变器输入电压与输出电压若不符合逆变器电压允许范围，交流输出端输出的电压的频率若过高或过低从而不符合电网的工频，这都将影响电网的稳定性，所以测量逆变器在过电压/欠电压、交流过频/欠频时自动脱网能力，显得尤其重要。

##### 1. NB/T 32004-2013 过电压/欠电压保护、交流输出过频/欠频保护测试标准

###### ● 直流输入侧输入电压测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，当直流侧输入电压高于逆变器允许的直流方阵接入电压最大值时，逆变器不得启动或在 0.1s 内停机（正在运行的逆变器），同时发出警示信号。直流侧电压恢复到逆变器允许工作范围后，逆变器应能正常启动。

###### ● 交流输出侧过电压/欠电压测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，逆变器交流输出端电压超过电网允许电压范围时，允许逆变器断开向电网供电，切断时应发出警示信号。除大功率逆变器外对异常电压的响应时间应满足表 1.12 的要求，电站型逆变器电压异常响应时间应满足表 1.13 的要求。在电网电压恢复到允许的电压范围时逆变器应能正常启动允许。此要求适用于多相系统中的任何一相。

表 1.12 异常电压响应时间

电网电压（电网接口处） $U$	最大脱网时间/s
$20\%U_N \leq U < 50\%U_N$	0.1
$50\%U_N \leq U < 85\%U_N$	2.0
$85\%U_N \leq U < 110\%U_N$	继续运行
$110\%U_N \leq U < 135\%U_N$	2.0
$135\%U_N \leq U$	0.05
主控与监测电路应切实保持与电网的连接，从而持续监视电网的状态，使得“恢复并网”功能有效。主控与监测定义参加 GB/T18479-2001。	

表 1.13 电站型逆变器电压异常响应时间

电压范围	运行要求
$<0.9U_T$	应符合 7.7.8 低电压穿越的要求
$0.9U_T < U_T < 1.1U_T$	应正常运行
$1.1U_T < U_T < 1.2U_T$	应至少持续运行 10s
$1.2U_T < U_T < 1.3U_T$	应至少持续运行 0.5s
注 1：依据接入电网主管部门的相应技术规范要求设定	
注 2： $U_T$ 为测试电压	

● 交流输出过频/欠频测试要求

根据 NB/T 32004-2013 标准，电网频率变化时，逆变器的工作状态应该满足表 1.14 的要求。当因为频率响应的问题逆变器切出电网后，在电网频率恢复到允许运行的电网频率时逆变器应能重新启动运行。

表 1.14 电网频率的响应

频率 $f$ (Hz)	逆变器响应
$f \leq 48$	0.2s 内停止运行
$48 < f \leq 49.5$	10min 后停止运行
$49.5 < f \leq 50.2$	正常运行
$50.2 < f \leq 50.5$	运行 2min 后停止运行，此时处于停运状态的逆变器不得并网
$f > 50.5$	0.2s 内停止向电网供电，此时处于停运状态的逆变器不得并网

## 2. 致远电子过电压/欠电压保护、交流输出过频/欠频保护测试解决方案与价值

测试平台：PA6000 功率分析仪与光伏逆变系统模拟测试平台。

利用光伏方阵模拟器控制逆变器直流输入端的电压高低，电网模拟电源与逆变器连接模拟电网与逆变器的并网状态。

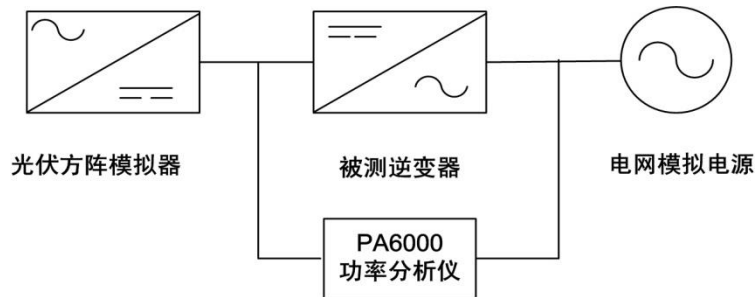


图 1.24 过电压/欠电压、交流输出过频/欠频测试平台

### 方案优势：

- **业界最高 10ms 数据刷新率，轻松捕获 50ms 内脱网电压信号**

根据 NB/T 32004-2013 标准要求，过电压时，逆变器最快应在 50ms 内脱网，但以业界同行的功率分析仪 WT\*\*\* 系列为例，最高只能提供 50ms 的数据更新率，根本无法显示周期为 20ms 的工频电压在 50ms 时间内脱网的波形，PA6000 功率分析仪提供独有的 10ms 行业最快数据刷新速度，成功突破在 50ms 内对电压波形进行**半波分析**的技术难点，精确显示电压在 50ms 内脱网的波形。

- **0.02%测量精度完美捕捉脱网电压波形**

高精度是准确测量的保证，PA6000 功率分析仪提供业界顶尖的 0.02% 功率精度，能最准确地测量出电压脱网前后的幅度差，为测试结果的准确性提供了强有力的保障。

注：0.02%测量精度源自全新的设计架构，六大核心技术，保证 PA6000 功率分析仪的精度和性能。第一、低温漂、低噪声的高速数据采集；第二、单通道自带大数据量实时运算处理单元；第三、高带宽极速传输；第四、工业级主板和可靠操作系统保证稳定性；第五、温补同步时钟高达 100M，同步误差小于 10ns；第六、隔离浮地设计、更高共模抑制比和安全系数。

## 3. 测试结果

测量后的数据可在 PAM 软件进行数据分析，导出记录报表



表 1.15 PAM 软件过电压欠电压保护测试报表

过电压/欠电压保护										
直流输入侧过压保护										
逆变器初始状态	逆变器设定过压	测试直流电压值(V)			标准要求			测试结果		
逆变器处于停机状态					逆变器不得启动					
逆变器已经启动运行					0.1s内停机					
交流输出侧过电压/欠电压保护										
电压U(交流电压输出端)要求值	跳闸时间									允许最大跳闸时间
	电压高值(V)			电压中间值(V)			电压低值(V)			
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#	
( $U < 0.5 \times U_{\text{正常}}$ )										0.1s
( $0.5 \times U_{\text{正常}} < U < 0.85 \times U_{\text{正常}}$ )										2.0s
( $U = 0.85 \times U_{\text{正常}}$ )										继续运行
$V(U = 1.1 \times U_{\text{正常}})$										继续运行
( $1.1 \times U_{\text{正常}} < U < 1.35 \times U_{\text{正常}}$ )										2.0s
( $1.35 \times U_{\text{正常}} < U$ )										0.05s

表 1.16 PAM 软件过频欠频保护测试报表

过频/欠频保护							P
频率	逆变器响应						标准要求
	频率高值		频率中间值		频率低值		
	1#	2#	1#	2#	2#	3#	
<48Hz							0.2s内停止运行
48-49.5Hz							10min后停止运行
49.5-50.2Hz							正常运行
50.2-50.5Hz							运行2min后停止
>50.5Hz							0.2s内
要求过、欠频点检测与设置点不超过0.1%fn; (选做)							
时间限值200ms (欠压时间为总时间减去48Hz降至跳脱点的时间);							
跳脱设定: 1Hz/s变化							
过、欠频点测量							
频率	1#		2#		3#		
欠频点							
过频点							
跳脱时间测量							
48Hz→47Hz							
49.7Hz→50.7Hz							

传统的判断过电压欠电压保护，过频欠频是否符合要求，是通过人工观察电压波形来判断逆变器脱网情况，这样既繁琐又不准确，现在由致远电子提供的 PAM 软件实现了自动判断过电压欠电压、过频欠频脱网情况，并能够将其脱网情况导出报表，行业内自动判断脱网情况先河，大大降低了检测难度。

## 1.5 致远电子 PA6000 功率分析仪介绍

广州致远电子股份有限公司 PA6000 功率分析仪提供了最新的测量技术来帮助从事光伏逆变器行业的开发和测试工程师，在保证高测量精度的前提下，有效减少研发和测试的工作量，大幅提升工作效率。



图 1.25 PA6000 功率分析仪实物图

### 1.5.1 PA6000 功率分析仪基本参数

- 数据刷新率：10ms；
- 功率精度：0.02%；
- 带宽：0.1~1MHz；
- 采样率：200KS/s；
- 电压输入范围：0~1500V（最大峰值 3000V）；
- 电流输入范围：0~55A（最大峰值 90A）；
- 最大 7 通道功率输入单元；
- 60G 固态硬盘存储空间。
- RS-232、GPIB、USB、Ethernet 通信接口
- 12.1 寸触摸显示屏，1200×800 像素分辨率，全中文操作界面。

### 1.5.2 PA6000 功率分析仪功能

1. 测量功能
  - 数值、波形显示；
  - 矢量图显示，Delta 测量；
  - FFT 显示；
  - 自定义公式测量。
  - 积分测量。
2. 分析功能
  - 谐波分析与 IEC 谐波分析；

- 周期波动分析；
- 闪变分析；
- 趋势分析；
- 电机分析。

### 1.5.3 PAManager 数据管理软件功能

- 数值、波形、谐波、FFT、趋势等视图显示功能；
- 与 PA6000 进行远程操作和数据实时获取与保存；
- USB、Ethernet、GPIB 三种通信方式；
- 模块化功能管理，为客户提供软件功能定制服务；
- 支持 CSV、PAD 格式报表输出。

### 1.5.4 PA6000 功率分析仪校准认证与校准体系

#### 1. 国家级计量检测中心权威校准认证

PA6000 高精度功率分析仪已通过赛宝计量检测中心权威校准认证，所有项目均高标准通过鉴定。



图 1.26 PA6000 赛宝计量检测中心校准证书

#### 2. 致远电子校准体系

通过校准仪 Fluke5720A、Fluke5520A、Fluke6105A、Agilent3458A 校准电压和电流的精度（增益、频响）、相位（通道间延迟），保证了 PA6000 功率分析仪测量结果的高精度和可靠性。



图 1.27 PA6000 功率分析仪校准体系