

使用 PV8922A 和 DG9000A 提升光伏逆变器 MPPT 效率

目录

一、光伏发电和光伏逆变器趋势.....	1
二、多输入光伏逆变器 MPPT 综合效率测试.....	3
2.1 MPPT 的定义.....	3
2.2 MPPT 的测试.....	5
2.2.1 静态 MPPT 测量.....	6
2.2.2 动态 MPPT 测量.....	8
2.3 PV8922A/DG9000A 助力 MPPT 性能优化.....	10
2.4 附录- PV8922A/N8957APV 测量精度 及 MPPT 误差对比表.....	14

一、光伏发电和光伏逆变器趋势

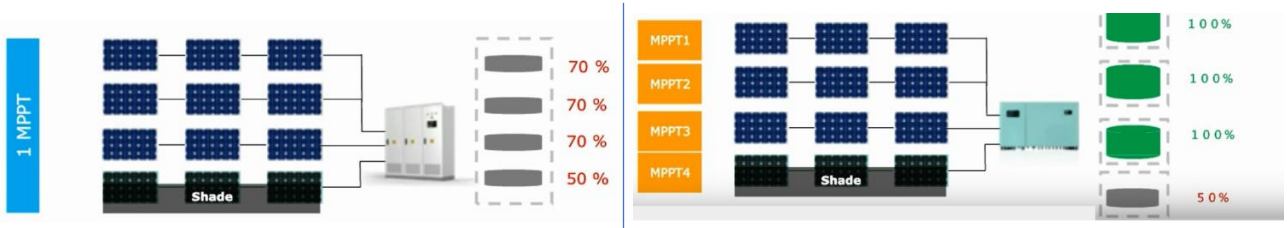
近年来，环境污染、气候变暖和全球能源危机倍受关注，同时人们对能源需求在日益增大，许多不可再生资源面临着枯竭，从而加剧了能源危机。因此，可再生能源成为各国能源发展的战略选择，而风电和光伏发电又成为重中之重，全球风电，光伏装机容量一路高歌猛进。



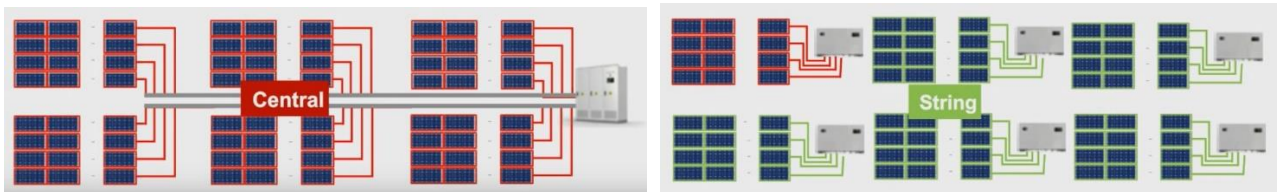
根据“全球太阳能需求监测”报告，随着光伏电池、逆变器等主要部件成本的进一步降低，最近投标的光伏发电项目平均PPA(Purchase Price Allocation, 合并对价分摊)已经能够与煤炭天然气成本竞争，同时系统平衡成本仍将占大型光伏电站项目成本的很大份额。效率改进，高效组件和 1500V 系统将提供 BOS (Balance of System, 光伏组件外的开支，如土建，工程安装，项目设计，工程验收等费用) 成本节省，帮助太阳能赢得与其他发电系统的竞争。



光伏屋顶和大型光伏电站是目前主要的两种光伏发电模式，光伏屋顶通常使用微型逆变器直接并网，而光伏电站则需要将成千上万个光伏电池，通过集中式大型逆变器（MW 级）或者将光伏电池分成若干组，每组或多组通过组串式逆变器（15-100KW）汇流后并入电网。

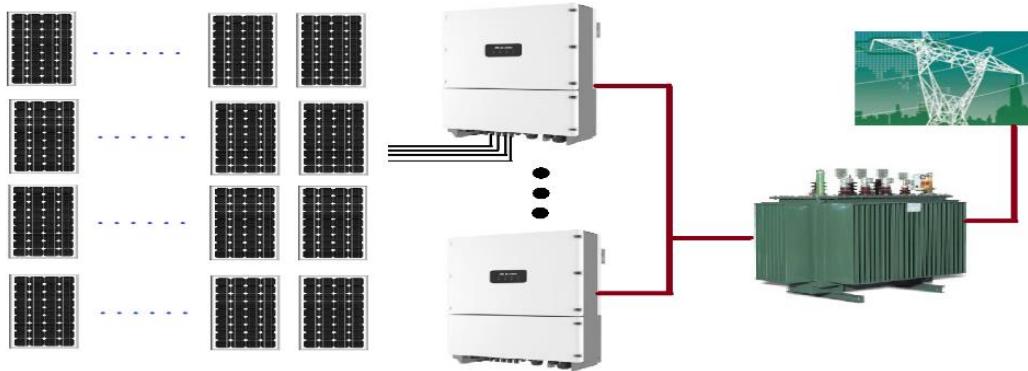


如上图所示，当由部分光伏电池出现遮挡或问题时，集中式逆变器系统整体效率会受到影响，而组串式系统中只有受到遮挡的部分效率降低。



另外一个问题，当系统出现问题时，如逆变器宕机，集中式整体系统对当地电网将产生巨大的供电缺口，影响企业生产和居民的正常用电。而组串式采用分布式逆变器，个别逆变器出现异常，不会造成集中式类似的验证供电影响。

以下为采用 1500V / 组串式 2.5MW 光伏电站的光伏电池模组、逆变器、汇流箱等硬件数量，以及与 1000V 光伏系统的比较，综合来说，采用 1500V 光伏系统可以节省约 30% 的成本。



2.5MW 光伏电站	1500V 系统	1000V 系统
每个组串数 (280W/p)	30	20
并联子串数	334	501
单串功率 / 逆变器功率 (8串)	8.4KW / 64KW	5.6KW / 44.8KW
逆变器台数/汇流箱台	42 / 21	60 / 30

- ✓ 直流侧输入电压提高，每串连接更多组件（增加 50%）
- ✓ 子串的数量减少了 167 个
- ✓ 逆变器的数量减少 18 个
- ✓ 汇流箱的数量减少了 9 个
- ✓ DC（直流）侧线缆使用量减少，同时，电气设备（汇流箱、直流柜、[逆变器](#)）的单位功率密度提升，安装、维护等方面工作量也减少，在一定程度上促进了光伏系统成本的降低。

1500V 光伏发电系统，度电成本可降低 30%

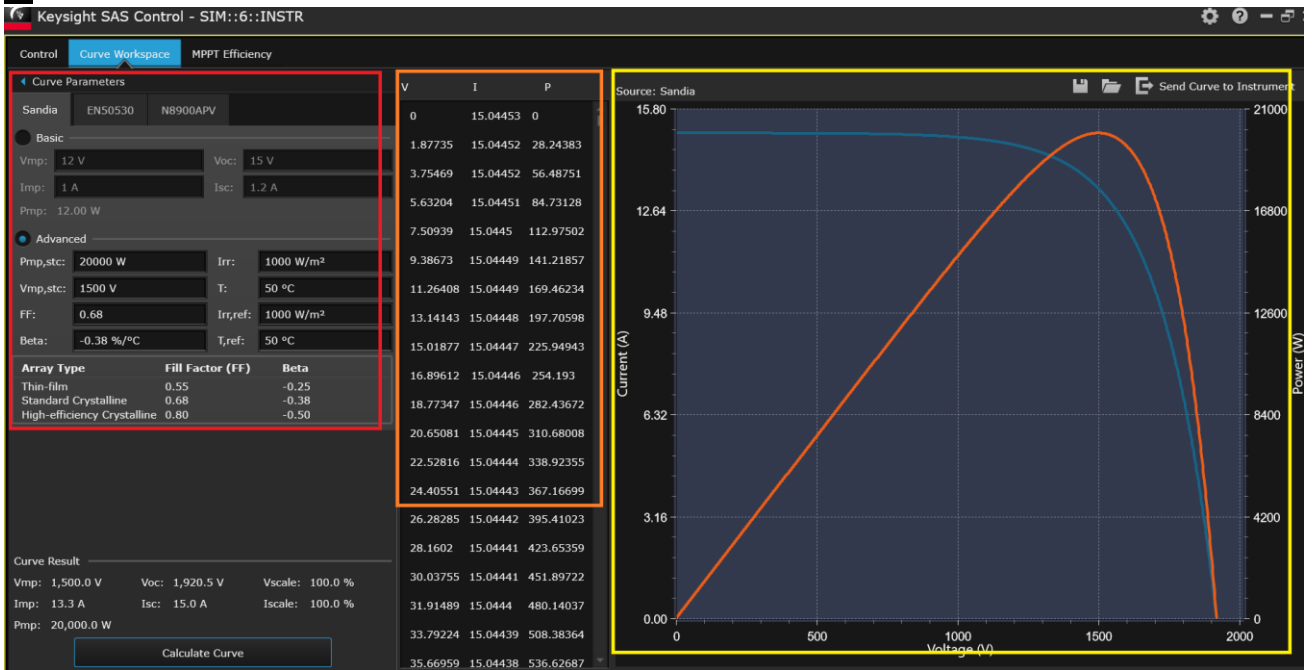
二、多输入光伏逆变器 MPPT 综合效率测试

2.1 MPPT 的定义

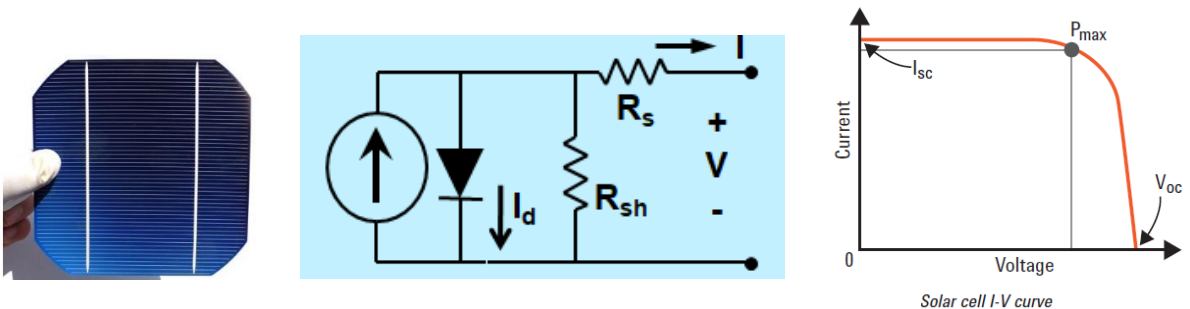
MPPT (Maximum Power Point Tracker) 是光伏逆变器评价的关键性指标, 性能优异的光伏逆变器 MPPT 效率高达 99.9% 以上。

我们先通过几张图来了解光伏电池的输出特性和什么是 MPPT?

下图是 Keysight DG9000A 多路光伏模拟器软件中编辑光伏电池组输出 IV 和 PV 曲线和列表的界面。图中分成三个部分: 光伏模组参数输入区 (红色), V/I/P 数据列表区 (橙色), I-V, P-V 曲线区 (黄色)。



光伏电池通常是采用硅基材料制作, 典型的有单晶硅、多晶硅电池, 其等效电路如下:



在光伏电池的 I-V 曲线上, 最重要的三个点 (不包括 0, 四个参数 $I_{sc}/V_{oc}/I_{max}/V_{max}$):

短路点: 电压 = 0V, 电流 = I_{sc}
开路点: 电压 = V_{oc} , 电流 = 0A
最大功率点: 电压 = V_{max} , 电流 = I_{max} , 功率 = P_{max}

同时，曲线上其他点的电压和电流关系公式为：

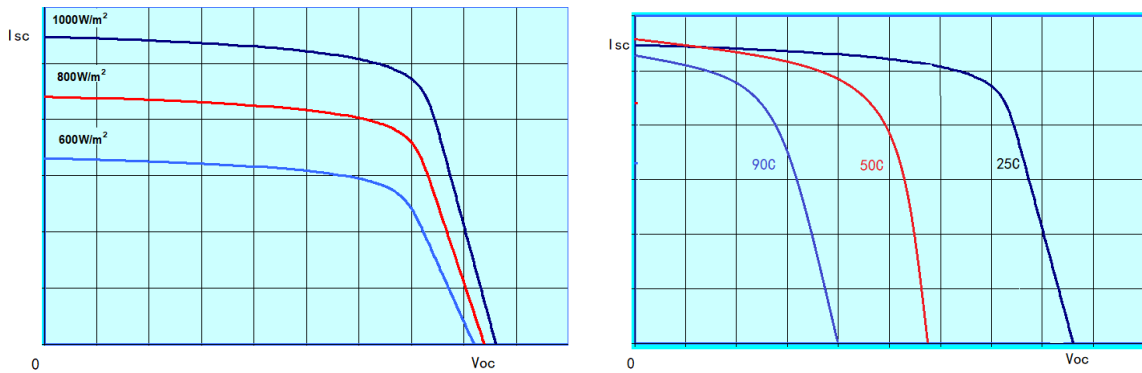
$$V = \frac{V_{oc} * \ln \left[2 - \left(\frac{I}{I_{sc}} \right)^n \right] - R_s * (I - I_{sc})}{1 + \frac{R_s * I_{sc}}{V_{oc}}}$$

按照公式，光伏模拟器只需要知道 I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} ，就可以计算出从 0V 到 V_{oc} 所有电压和电流值，同时绘制出光伏电池的曲线。典型的 n 值为 1024，也有些光伏模拟器取 $n=256$ 或 $n=4096$ 。

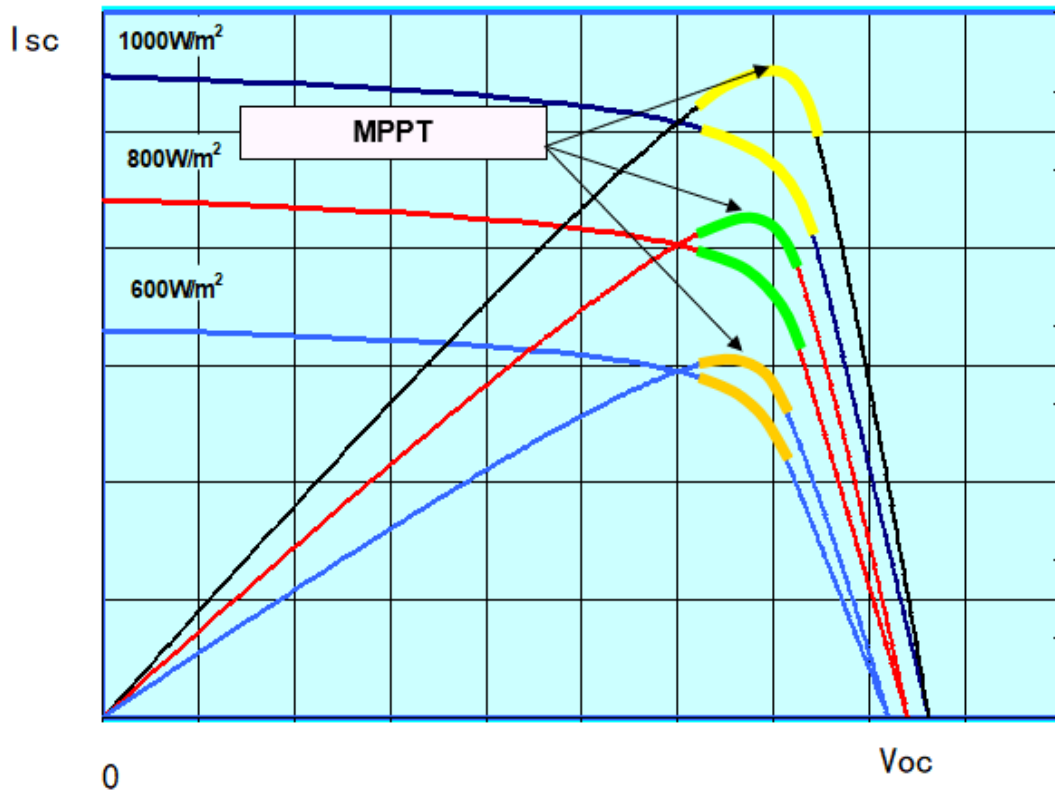
I-V table with n current and voltage pairs

Current	0	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	. . .	I_{n-1}	I_{sc}
Voltage	V_{oc}	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	. . .	V_{n-1}	0

光伏电池的输出 I-V 曲线受光照强弱 (I_{sc} 变化显著)、温度高低 (V_{oc} 变化显著) 变化非常巨大。

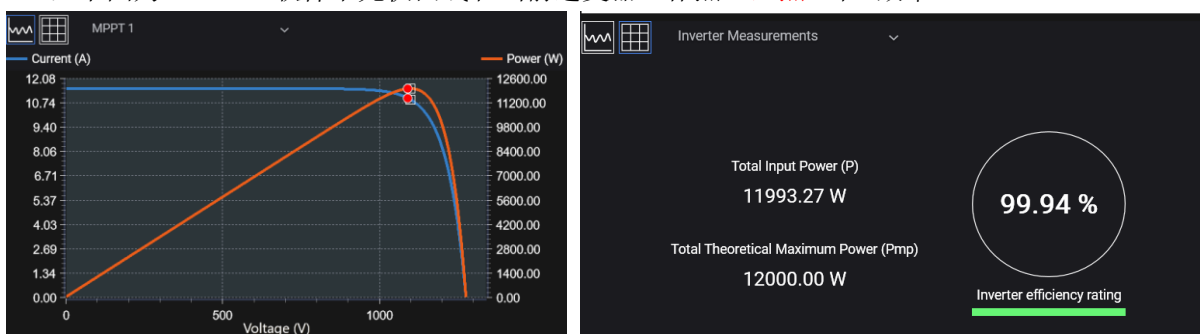


因此，为了保证投资效益，光伏发电系统必须时刻保持在最大的功率输出，这就是最大功率追踪 MPPT!

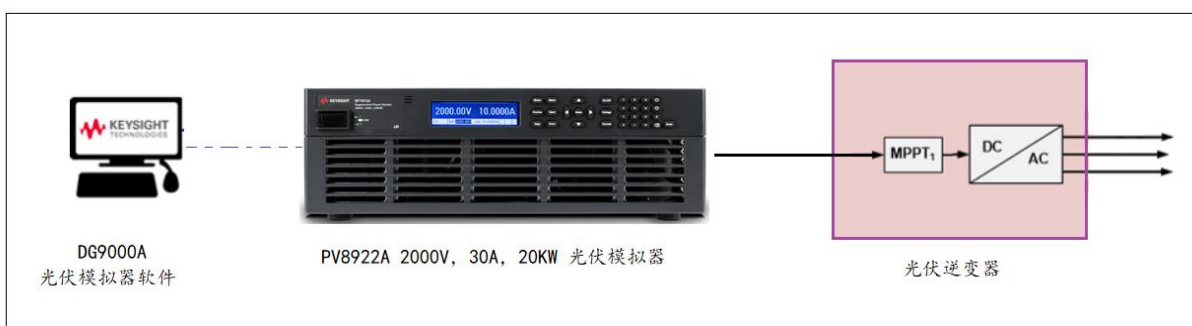


2.2 MPPT 的测试

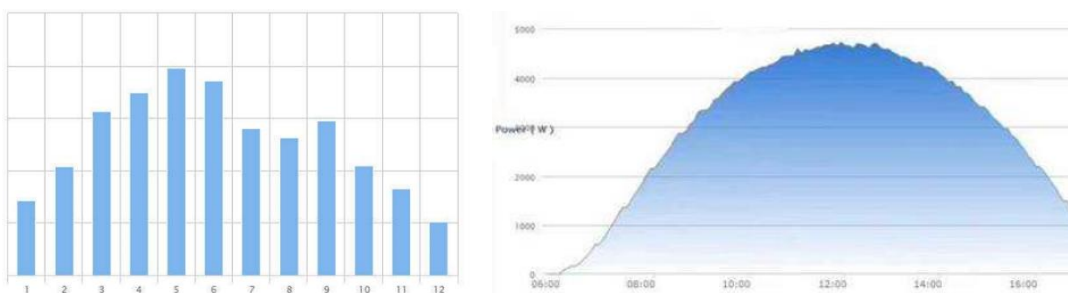
如上所述，MPPT 测试就是要验证光伏逆变器是否能够追踪和时刻保持在光伏电池最大的功率点 P_{max} ，下图为 DG9000A 软件中光伏曲线和当前逆变器工作点（红点）和效率。



MPPT 测试时需要使用可以模拟光伏特性的电源（通常之为光伏模拟器，如是德科技的 E4360A, N8957APV, PV8922A 等），并配合模拟器控制和测量软件完成复杂的综合 MPPT 效率测量。



考虑到太阳光照射到光伏电池随季节和气候的变化，甚至一天内早、中、晚光照强度和角度变化的影响，必须测试光伏逆变器在各种条件下的 MPPT 效率。因此，光伏逆变器行业协会将 MPPT 测试分成 **静态 MPPT** 和 **动态 MPPT**，给每种状态不同的权重（系数），计算出综合加权 MPPT 效率值。



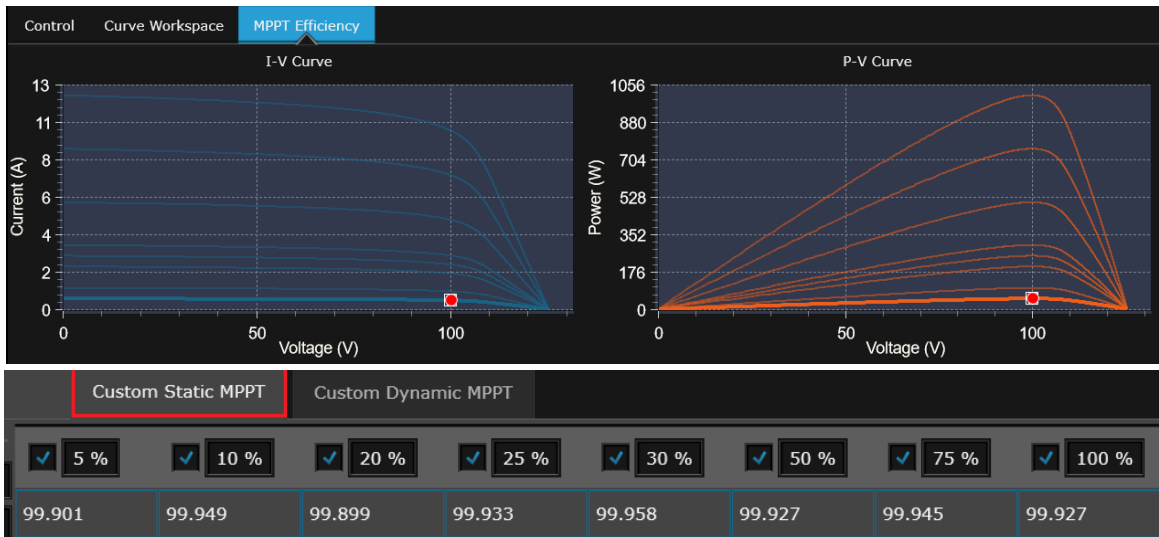
如下表为 CGC 定义的各种光照强度对应的系数，负载点 = 1.0 表示最强光照条件下，对应的权重系数为 0.15 (15%)，0.75 光照强度的权重为 37%。

中国太阳能资源区光伏并网逆变器加权效率的权重系数表

权重系数	a_{ccc-1}	a_{ccc-2}	a_{ccc-3}	a_{ccc-4}	a_{ccc-5}	a_{ccc-6}	a_{ccc-7}
	0.02	0.03	0.06	0.12	0.25	0.37	0.15
负载点	MPP-1	MPP-2	MPP-3	MPP-4	MPP-5	MPP-6	MPP-7
	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50	0.75	1.00

2.2.1 静态 MPPT 测量

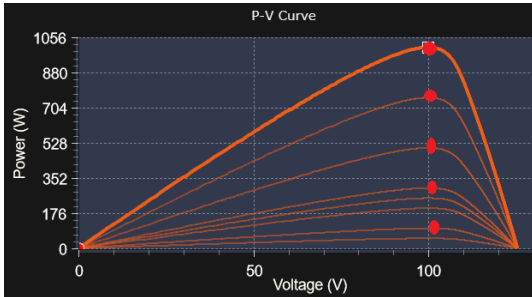
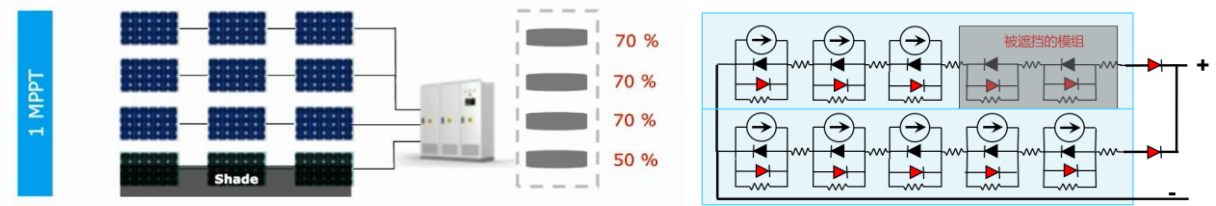
下图为 DG8900 软件 MPPT 效率测试界面，按照标准要求，依此模拟和测量光伏电池在 5%，10%，20%，30%，50%，70%，100% 时的 MPPT 效率，然后按照标准权重系数计算出加权效率。



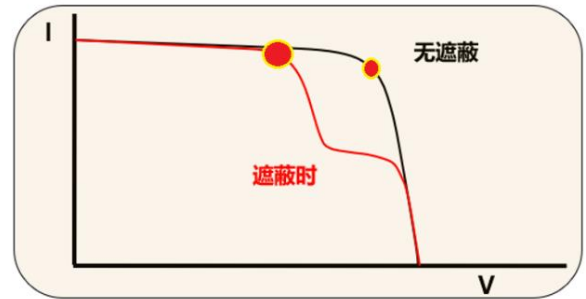
为了方便研发工程师快速和全面的评估逆变器在各种光照条件下，DG9000A 软件提供了光照强度缩放 (SCALE) 功能。工程师可以一键式设置到任意的光照强度，如下图调整到 5% (即 50 W/m²)。



以上讨论的标准中对光伏逆变器静态 MPPT 效率的测试，然而现实中的光伏电池模组场景要比标准定义复杂的多。如上文提到的部分光伏电池遮挡或顺坏时，集中式逆变器效率会整体大大下降，此时光伏电池阵列输出的合成曲线不同于光照强度下降，最大功率点 P_{max} 对应的电压 V_{max} 会很大变化。

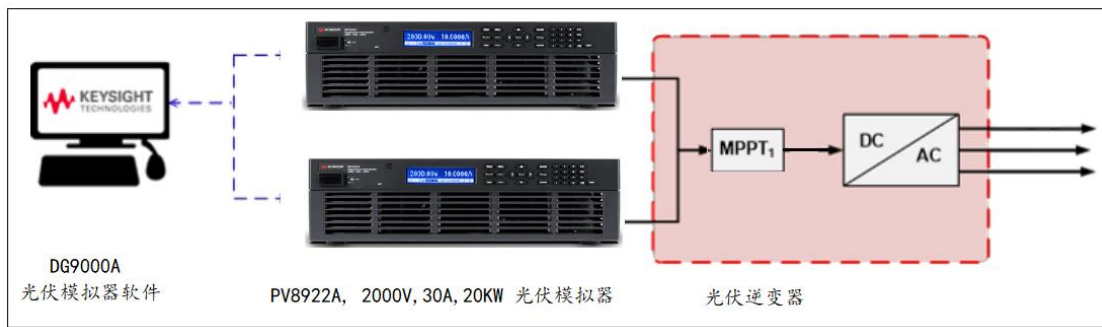


光照强度变化时的 V_{max} 变化

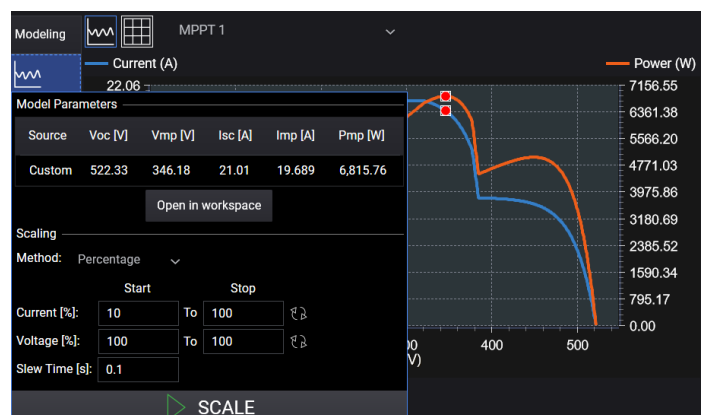
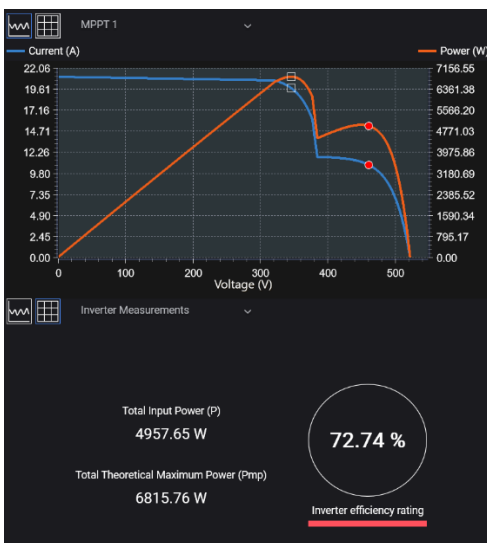


局部遮挡时的 V_{max} 变化

DG9000A 光伏模拟器软件可以控制多台 PV9822A 光伏模拟器，每一台模拟器输出不同的 I-V 曲线，并输入到同一个 MPPT 电路，实现复杂的光伏曲线 MPPT 测试。



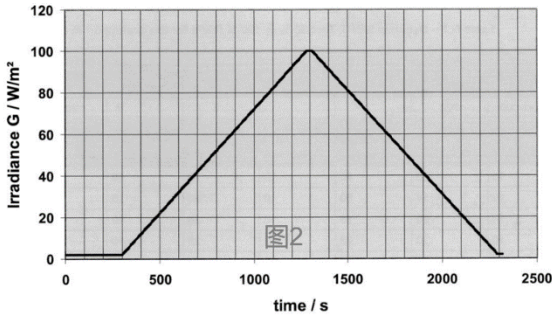
如下图所示，如果上述集中式光伏逆变器保持在无遮挡时的工作电压，只能获得大约 72% 的 MPPT 效率。再配合上述曲线缩放 (SCALE)，可测量在具备光伏模组异常时系统的静态效率。



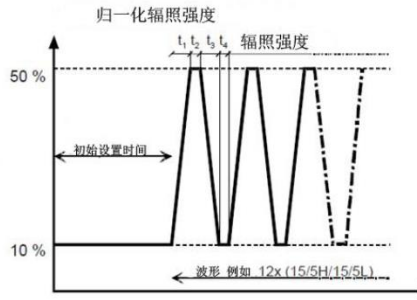
2.2.2 动态 MPPT 测量

动态 MPPT 评估在光照强度动态变化的过程中光伏逆变器 MPPT 追踪性能，标准定义了以下三种不同光照变化过程的测试：

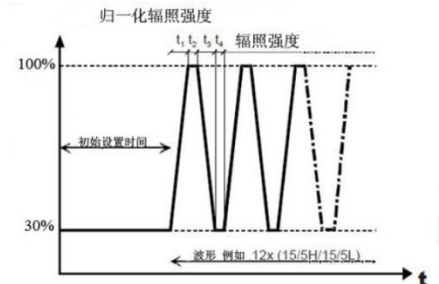
- A 晨曦和日落过程 (0-10%)，耗时 2320 秒
- B 冬春季节和晌午/傍晚 (10%-50%)，耗时 15939 秒
- C 夏秋季节/午时 (30-100%)，耗时 6987 秒



晨曦和日落过程辐照强度变化



低和中等辐照强度变化



中等和高辐照强度变化

除了光照强度幅值的变化范围，标准还定义的不同的变化斜率和驻留时间，循环次数，等待时间，使得动态 MPPT 成为一个非常耗时的测试项目。表格为 C 中等和高辐照强度变化测试过程详细参数定义，总测试耗时 6987 秒（约 2 小时）。

30%→100%标准辐照度条件下的动态最大功率点跟踪试验步骤

辐照度区间 W/m ²	区间大小 W/m ²					等待时间 S	
300-1000	700					300	
循环次数	斜率 W/m ² /s	上升时间 t ₁ S	驻留时间 t ₂ S	下降时间 t ₃ S	驻留时间 t ₄ S	持续时间 S	$\eta_{MPPT_{dyn}}$
10	10	70	10	70	10	1 900	
10	14	50	10	50	10	1 500	
10	20	35	10	35	10	1 200	
10	30	23	10	23	10	967	
10	50	14	10	14	10	780	
10	100	7	10	7	10	640	
						总测试时间: 6 987	

10 次循环 X (上升时间 70S + 驻留时间 10S+ 下降时间 70S+驻留时间 10S) + 等待时间 300S = 1900S

DG8900A 光伏模拟器软件的动态 MPPT 功能，按照 EN50530 标准依此测试上述 B/C/A 辐照变化过程时的 MPPT，并自动保存过程中的详细功率，MPPT 效率等数据。

EN50530 Dynamic MPPT	Custom Static MPPT	Custom Dynamic MPPT							
100-500	10	10	40	10	40	10	1500		
100-500	10	14	28.6	10	28.6	10	1071		
100-500	10	20	20	10	20	10	900		
100-500	10	30	13.3	10	13.3	10	767		
100-500	10	50	8	10	8	10	660		
300-1000	10	10	70	10	70	10	1900		
300-1000	10	14	50	10	50	10	1500		
300-1000	10	20	35	10	35	10	1200		
300-1000	10	30	23.3	10	23.3	10	967		
300-1000	10	50	14	10	14	10	780		
300-1000	10	100	7	10	7	10	640		
10-100	1	0.1	980	30	980	30	2320		

Estimated Time: 07:00:46

Time Running: 00:00:00

Status: **Completed**

Progress:

Start Test

Measurements

- Log
- Vmp: 100.00 V
- Imp: 10.05 A
- Pmp: 1005.28 W
- Voltage: 101.6 V
- Current: 9.87 A
- Power: 1003.39 W
- Meas Energy: 2.6917 Wh
- MPP Energy: 2.6936 Wh

如上所述，严格按照 EN50530 标准定义的参数执行，对研发工程来说花费的时间太长了，影响逆变器研发和调试进度，甚至耽误新项目和产品的上市时间。 DG8900 软件支持用户自定义动态 MPPT 测试功能，改功能允许用户增减测试项目，修改辐照强度变化幅值区间，上升/下降/驻留时间，循环次数，还可以设置温度同步变化范围。

研发和测试工程师可以通过优化测试参数，加速测试进度，同时还可以测量评估标准尚未定义，而实际场景存在的性能评估。

EN50530 Dynamic MPPT	Custom Static MPPT	Custom Dynamic MPPT								
<input checked="" type="checkbox"/> Enable	From (W/m ²)	To (W/m ²)	From (°C)	To (°C)	# Cycles	Ramp Up (s)	Dwell High (s)	Ramp Down (s)	Dwell Low (s)	
<input checked="" type="checkbox"/>	100	500	25	25	2	800	10	800	10	
<input checked="" type="checkbox"/>	200	900	25	50	3	800	10	800	10	

Add Test Step

Insert Test Step

Remove Test Step

2.3 PV8922A/DG9000A 助力 MPPT 性能优化

光伏发电作为绿色环保的新能源主要技术之一，受到全球各国的高度关注，特别是在各国达成巴黎气候协定之后，发达国家以及部分发展中国家都采用政府补贴方式建立了很多光伏电站工程。近年来，随着光伏电池、逆变器等关键组件效率的提升以及成本的下降，大型的光伏发电项目平均 PPA 已经能够与煤炭天然气成本竞争，同时政府补贴也在逐渐的退坡甚至取消。

如何进一步优化光伏发电系统的成本，改善光伏电站建设和运营的效益，提升光伏电站的竞争力？

单从光伏逆变器的效率来看，领先的光伏逆变器品牌标称的转换效率已经高达 99%，MPPT 效率甚至高达 99.9% 以上。如何进一步提升？

首先、从上述光伏逆变器测试规范 EN50530 的静态和动态 MPPT 测试定义看，只定义了极少数情况下测试场景，目前绝大多数逆变器都具有非常优异的性能，即 MPPT 效率。但不同的逆变器在现实光伏电站的性能迥异，光伏逆变器应该更多匹配光伏电站的光伏电池和辐照情况进行优化——即使同一款光伏逆变器，用在不同光伏电站，可能测试场景和权重应该做相应的调整。

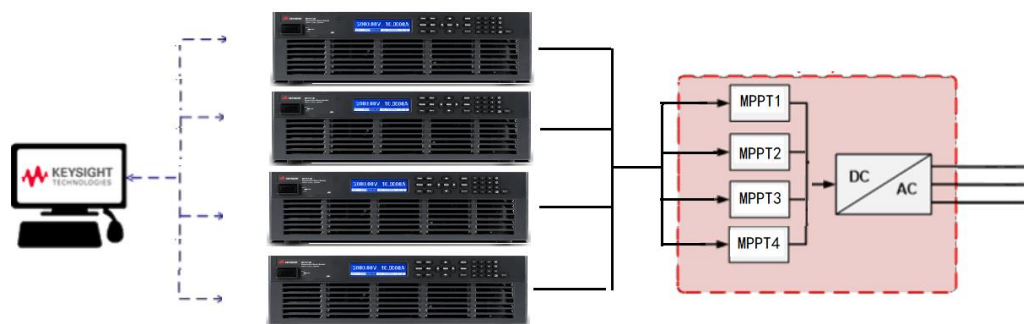
动态 MPPT 效率测试条件

被测逆变器如有多个直流输入端口，则每一个输入端口参数配置应与制造商的要求相一致。对于多路独立 MPPT 控制的逆变器，光伏阵列模拟器输出功率应平均分配到逆变器的每一个输入端口。

辐照度参数变化曲线应满足相应的要求。

为避免因电网电压的大小而影响测试结果，所有测试应在额定电网条件下进行。

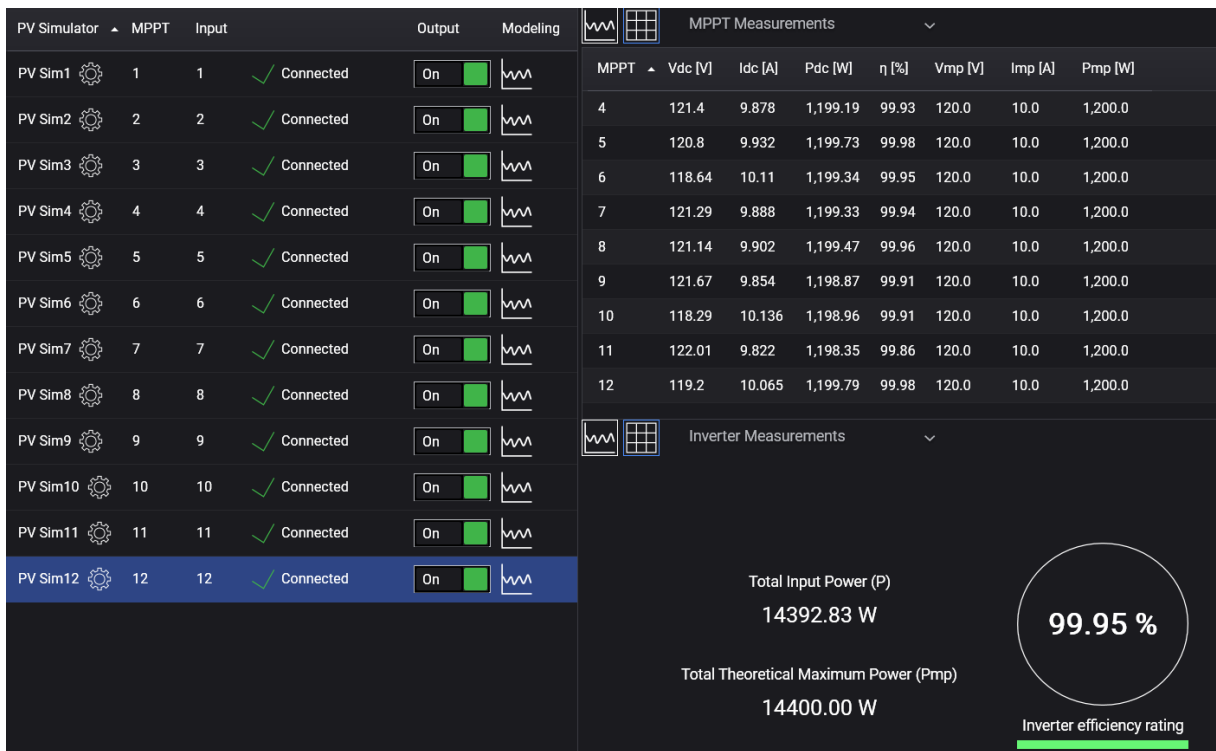
按照标准，如下 4 路 MPPT 光伏逆变器效率测试时，采用的是均匀分配到每路 MPPT 输入的，对应测试连接图为：



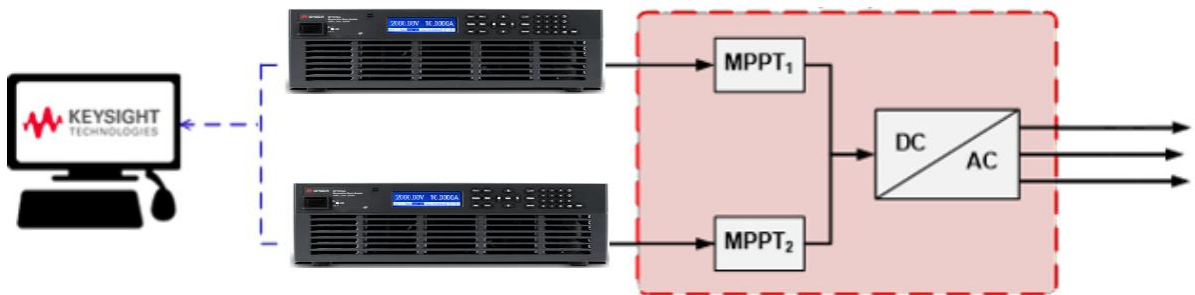
如上文所述，该连接与光伏电池模组部分遮挡或损坏的场景 I-V 曲线变化甚异。



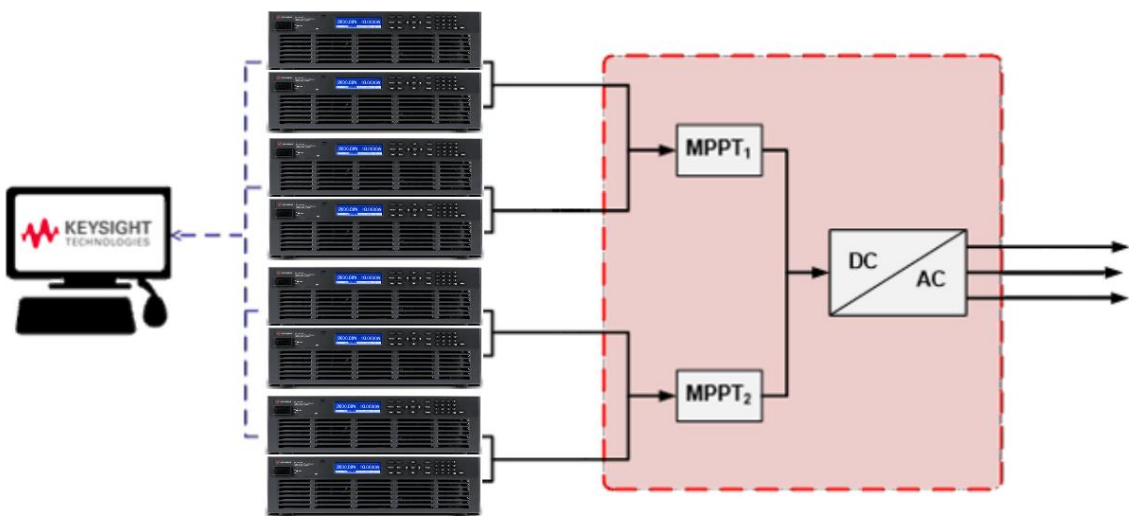
DG9000A 光伏模拟器软件支持多达 12 路独立 MPPT 输入，以及灵活的光伏模拟和 MPPT 的连接方式，研发和测试工程师可以模拟任意的光伏电池矩阵的异常或遮蔽情况。



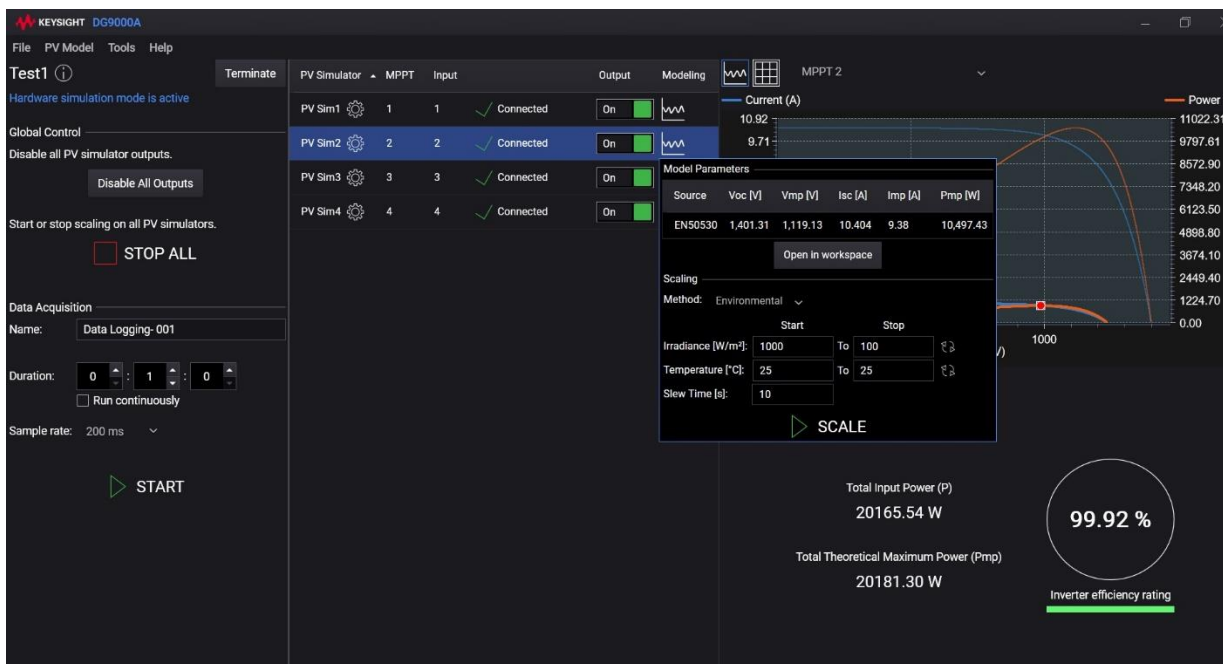
案例 1： 光伏模拟器与逆变器 MPPT 一一对应连接



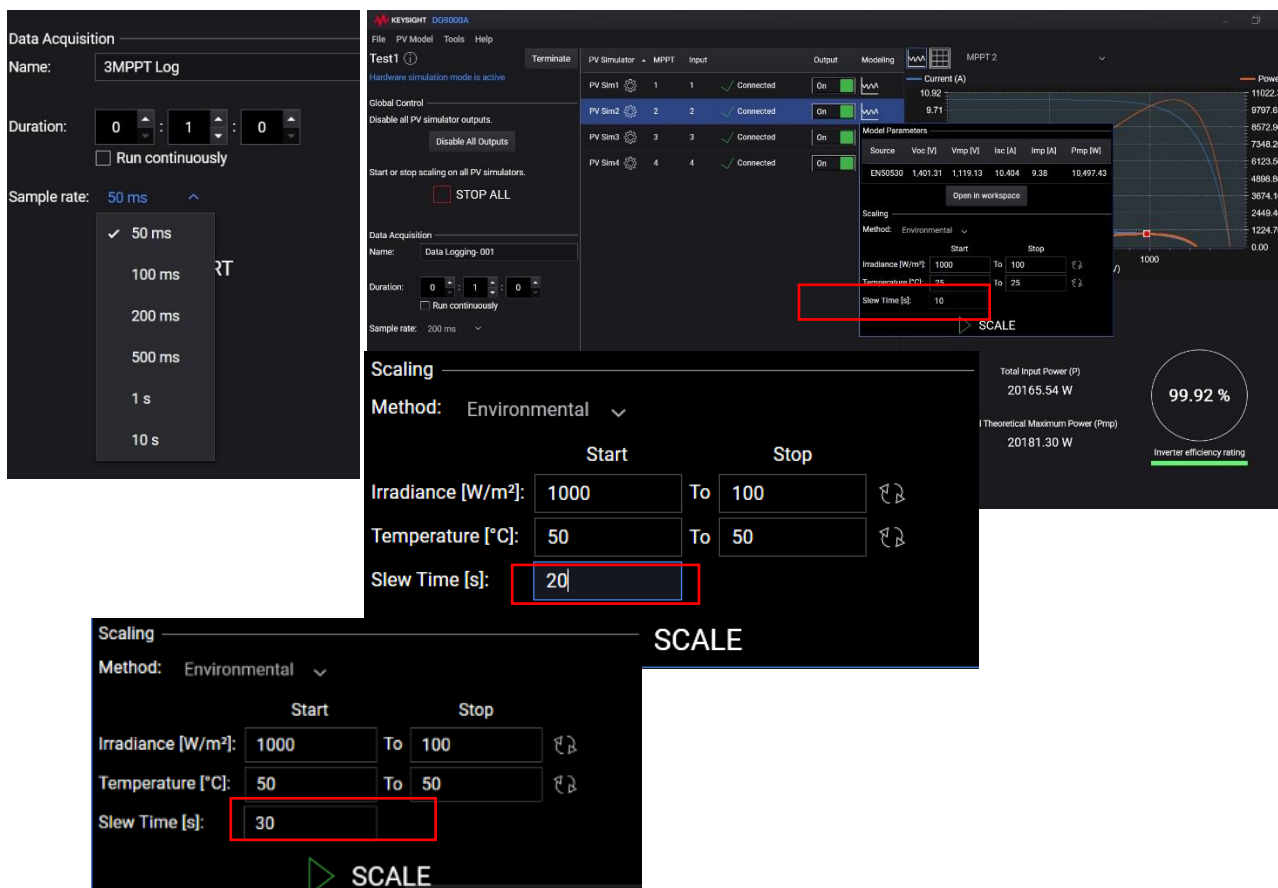
案例 2： 光伏模拟器主从并机后，再同时连接到光伏模拟器的 MPPT，模拟复杂光伏曲线。

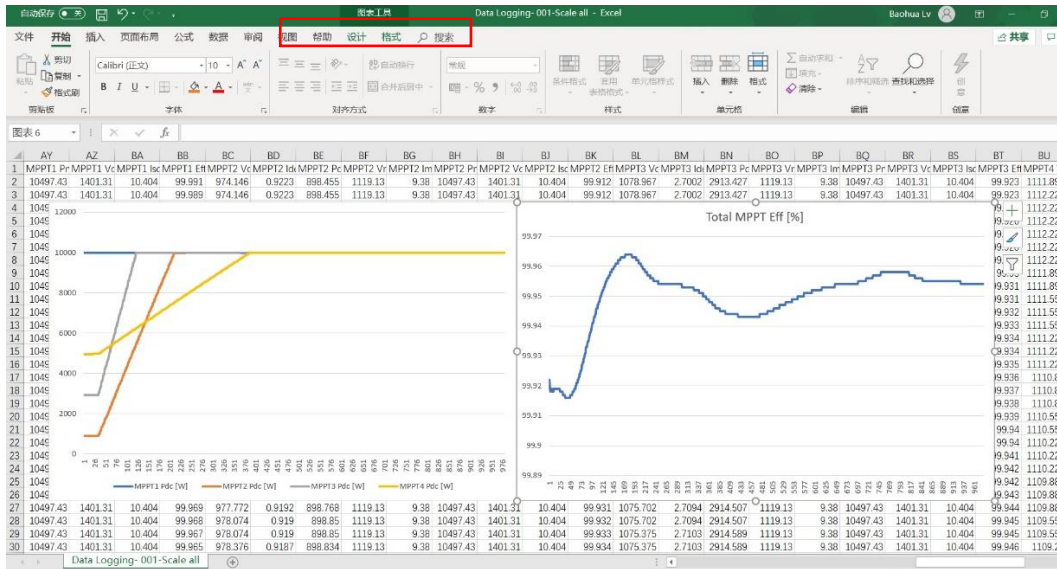


多路 MPPT 曲线同步缩放 (SCALE)，并自动采集 I-V 曲线变化过程中测量值。



数据采集最小间隔为 50ms, 工程师可设定任意的记录时间周期, 如下为 4 路 MPPT, MPPT1 保持不变, MPPT2-4 按照不同斜率变化时, 各 MPPT 效率和逆变器综合 MPPT 效率表。





其次、更高电压标准和更精准的曲线输出和测量精度要求。目前市场上主流的光伏模拟器电压和电流编程和测量精度在 0.1% 到 0.2%，以是德科技 N8957APV, 1500V, 30A ,15KW 光伏电源为例，其电压精度<1.5V (0.1%FS)，电流精度<60mA (0.2%FS)，**你对其测得 MPPT 效率 99.90% 有信心吗？**



N8957APV Photovoltaic Array Simulator

Programming accuracy (23 °C ± 5 °C)	
Voltage	≤ 1.5 V
Current	≤ 60 mA
Measurement accuracy (23 °C ± 5 °C)	
Voltage	≤ 1.5 V
Current	≤ 60 mA

再次，现在大家所说的 1500V 光伏系统中，1500V 是其开路电压 Voc，其最大工作点 Vmax 只有 1100V 左右。如果要最大工作点 Vmax 1500V，Voc 开路电压将高达到 2000V。

Source	Voc [V]	Vmp [V]	Isc [A]	Imp [A]	Pmp [W]	Voltage Scale [%]	Current Scale [%]
Sandia	1,500.4	1,100.0	10.956	9.091	10,000.0	100.0	100.0

Source	Voc [V]	Vmp [V]	Isc [A]	Imp [A]	Pmp [W]	Voltage Scale [%]	Current Scale [%]
Sandia	2,046.0	1,500.0	8.034	6.667	10,000.0	100.0	100.0

是德科技最新的光伏模拟器 PV8922A 2000V, 30A, 20KW，再次刷新光伏模拟器电压和精度指标。高达 2000V 电压等级，**0.04%的电压和 0.03%电流输出和测量精度**，保证光伏模拟器输出更精准的 I-V 曲线和 MPPT 测量精度，助力光伏逆变器 MPPT 和转换效率提升。



PV8922A 2000V, 30A, 20KW

	PV8922A
最大电压	2000V
最大电流	30A
最大功率	20KW
电压输出/测量精度	0.04% + 150mV
电流输出/测量精度	0.03%+2mA
电压纹波Vrms	400mV
电流纹波Irms	15mA
电压分辨率	20mV
电流分辨率	0.6mA
电压上升/下降时间 (空载)	0.2mS / 0.2mS
电流上升/下降时间	0.1mS / 0.1mS
瞬态响应时间	0.3mS

2.4 附录- PV8922A/N8957APV 测量精度 及 MPPT 误差对比表

表格对比了高性能 PV8922A 与 N8957APV 电压、电流，纹波噪声，瞬态响应等多项技术参数指标，并按照静态 MPPT 的负载点（100%，75%，50%，30%，20%，10%，5%）的测量功率精度，即 MPPT 误差。

通过对比，发现 N8957APV 光伏模拟器 MPPT 误差在 0.5%以上，且在 5% 负载点时 MPPT 误差已经达到 4.15%，这将对加权 MPPT 的精度产生重大影响。

而 PV8922A 在 50% 以上负载点时，MPPT 误差小于 0.1%，即使在 5%负载点也只有 0.218%误差。

	PV8922A	N857APV
最大电压	2000V	1500V
最大电流	30A	30A
最大功率	20KW	15KW
电压输出精度	0.04% + 150mV	1500mV
电流输出精度	0.03%+2mA	60mA
电压测量精度	0.04% + 150mV	1500mV
电流测量精度	0.03%+2mA	60mA
电压纹波 Vrms	400mV	400mV
电流纹波 Irms	15mA	26mA
电压分辨率	20mV	61mV
电流分辨率	0.6mA	2mA
电压上升/下降时间（空载）	0.2mS / 0.2mS	30mS/10S
电流源模式	支持	否
电流上升/下降时间	0.1mS/0.1mS	否
瞬态响应时间	0.3mS	1.5mS
电压精度 vs 电压值	V * 0.04% +150mV	1.5V
1500V	0.75	1.5
1000V	0.55	1.5
500V	0.35	1.5
电流精度 vs 电流值	0.03%+2mA	60mA
30A (100%)	0.011	0.06
22.5A (75%)	0.00875	0.06
15A(50%)	0.0065	0.06
9A(30%)	0.0047	0.06
6A (20%)	0.0038	0.06
3A (10%)	0.0029	0.06
1.5A(5%)	0.00245	0.06
功率精度 / MPPT 误差 (Vm=1000V)	【(V+Err) * (I + Err) - Pout】 / Pout (%)	
1000V X 20A = 20KW	0.095	/
1000V X 15A = 15KW (50%)	0.098	0.551
1000V X 9V = 9kW (30%)	0.107	0.818
1000V X 6A = 6KW (20%)	0.118	1.151
1000V X 3A =3KW (10%)	0.152	2.153
1000V X 1.5A = 1.5KW (5%)	0.218	4.156

更多内容，请访问是德科技官方网站 www.keysight.com，或致电是德科技服务热线 800-8100189。