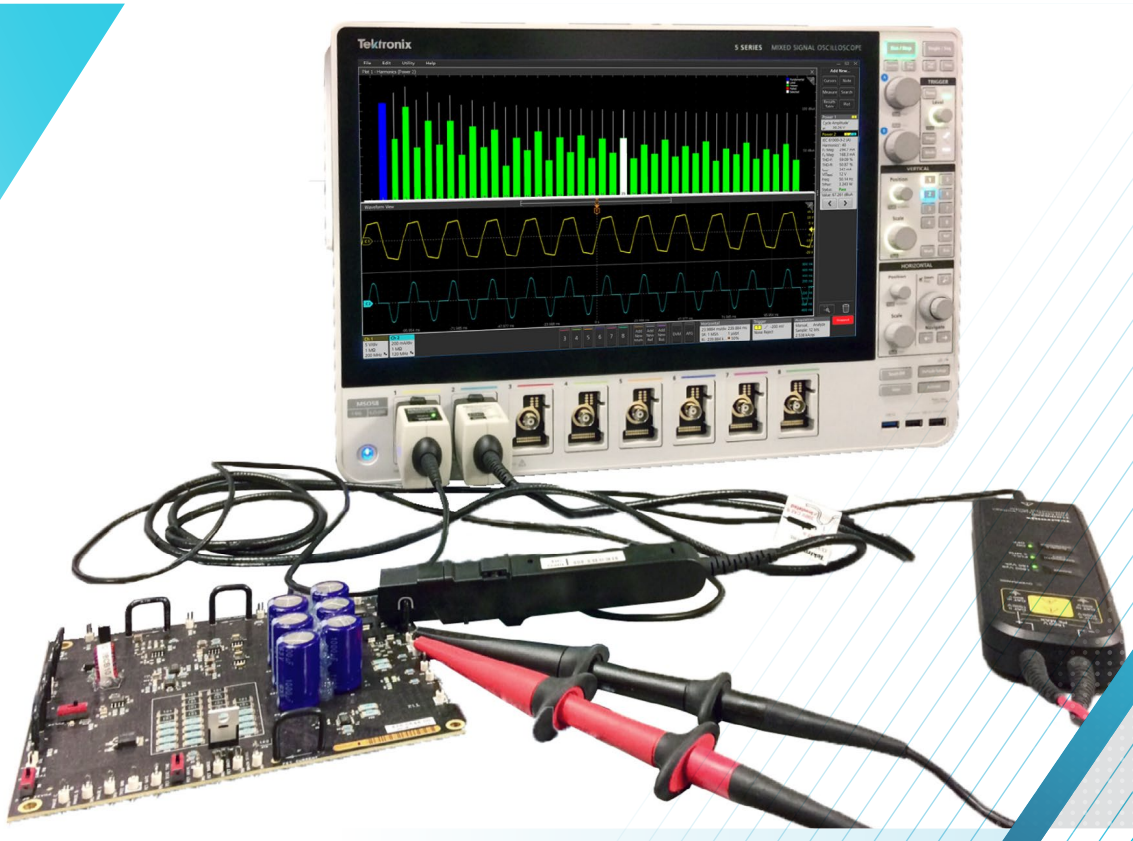
使用4/5/6-PWR应用软件进行电源测量和分析

应用指南



Tektronix®

引言

当今电源设计人员面临着越来越大的压力，需要实现90%、甚至更高的功率转换效率。推动这种发展趋势的因素，包括延长便携式电子器件中的电池续航时间、物联网以及对功耗更低的“更加绿色的”产品的需求。许多设计正在使用 GaN 或 SiC 开关器件代替硅 FETs 和 IGBTs。一如既往，产品上市时间压力正不断推动着测试速度加快（同时还要非常准确）。

4 系列 B MSO 提供了 FlexChannel® 输入及新型图形用户界面，设计人员可以一次测试多个测试点，从而加快测试速度。高级功率测量和分析选项 (4/5/6-PWR) 为关键功率测量自动完成设置过程，并提供了多种工具，根据电源设计指标和标准评估测试结果。本应用指南将概括介绍怎样使用泰克 4 系列 B MSO 示波器及 4/5/6-PWR 功率分析软件进行重要的电源测量。

本应用指南将概括介绍怎样使用泰克 4 系列 B MSO 示波器及 4/5/6-PWR 功率分析软件进行重要的电源测量。

准备电源测量

为进行准确测量，必须正确设置功率测量系统，精确地捕获波形，进行分析和调试。要考虑的重要课题有：

- 消除电压探头和电流探头之间的时延
- 消除探头偏置
- 对电流探头消磁

消除电压探头和电流探头之间的时延

在使用示波器进行功率测量时，必需测量经过被测器件的电压及流经被测器件的电流。这项任务要求两只单独的探头：一只电压探头（通常是高压差分探头）和一只电流探头。每只电压探头和电流探头都有自己的传播延迟特性，这些波形中产生的边沿可能并没有对准。电流探头和电压探头之间的延迟差称为时延，会导致幅度和定时测量不准确。

由于时延产生了定时延迟，因此它会导致定时差、相位和功率系数测量不准确。许多测量系统可以“自动校准”仪器内部的延迟，但在系统中增加探头时，必须补偿探头放大器和电缆长度的差异。

泰克 4 系列 B MSO 可以补偿从探头尖端到测量系统的延迟，确保进行最准确的定时测量。您可以手动校正探头时延，把探头连接到相同的波形源，然后把延迟加到较快信号的信号路径中，这样就可以在时间上对准信号，而不必以物理方式在较短的探头电缆中增加电缆长度。

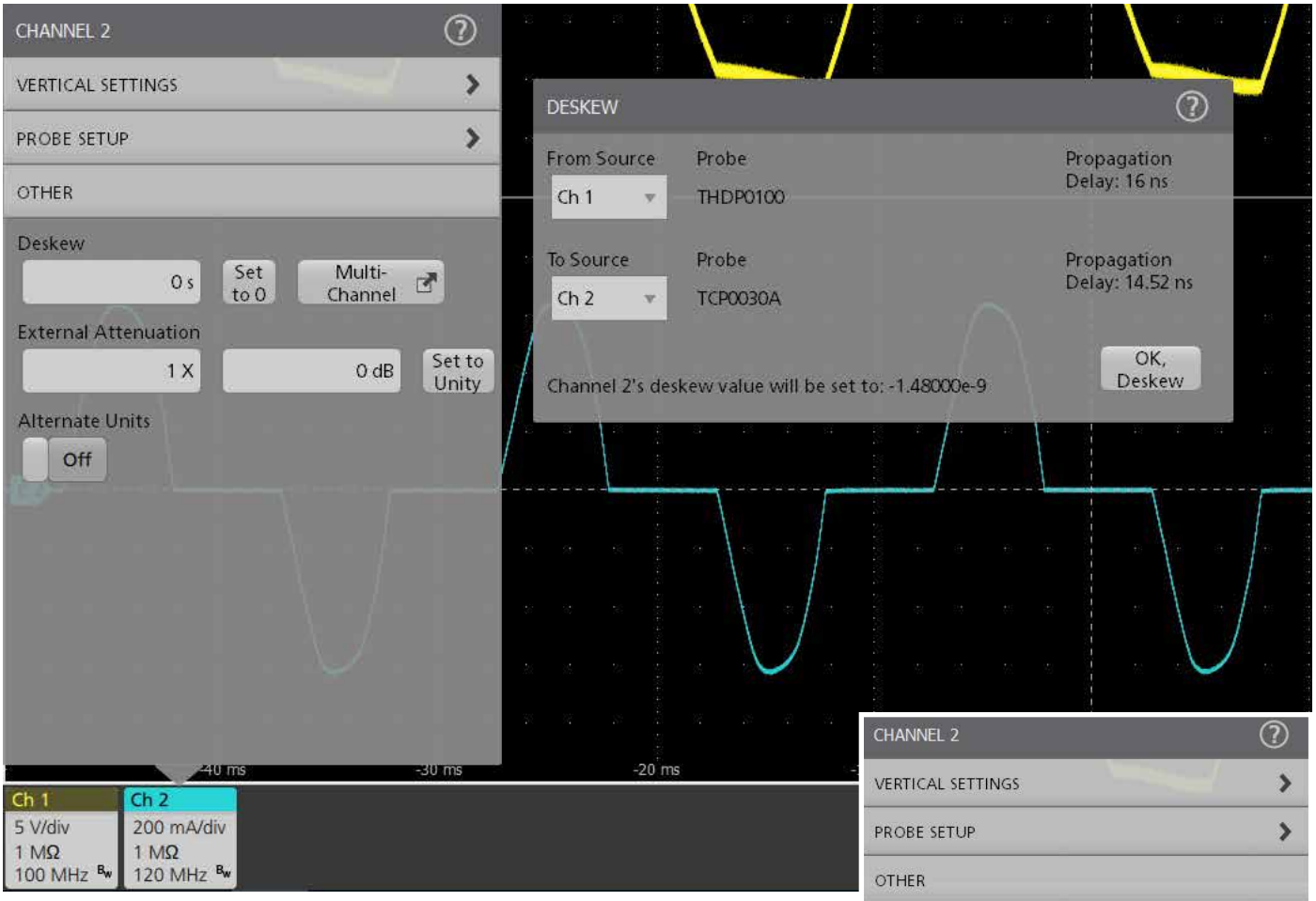


图 1. 在调节前对差分电压探头和电流探头之间的时延进行静态补偿。这些探头有机载内存，存储着标称传播延迟。

4 系列 B MSO 还提供了单键“静态”时延校正功能。图 1 是两个 TekVPI® 功率探头之间的时延实例。示波器从探头中读取标称传播延迟，计算出两只探头之间的延迟差约为 1.48 ns。您只需按 OK，Deskew 按钮就会调节信号之间的相对定时。

图 2 显示了图 1 中使用的相同的测试设置在运行静态时延校正功能之后的结果。如果使用的是非泰克探头，您需要手动校正电压和电流波形时延，配置电流探头设置。

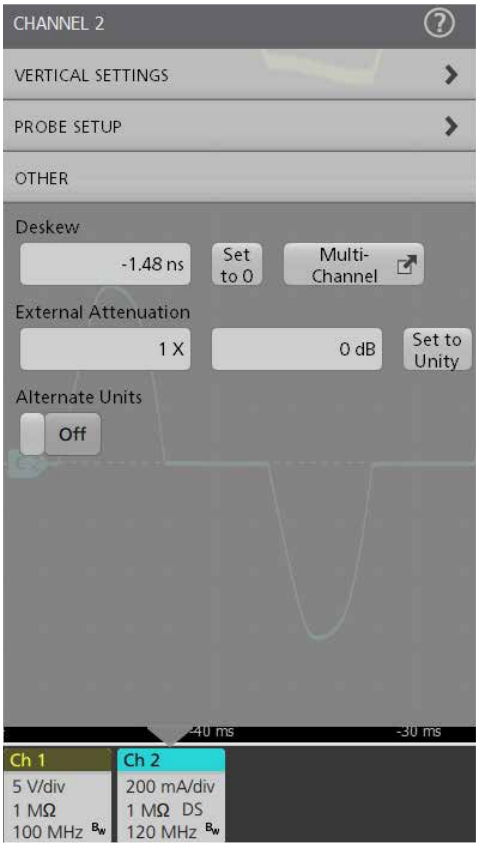


图 2. 调节后静态时延补偿。注意根据探头中存储的传播延迟，已经增加了 -1.48 ns 的时延校正。

消除探头偏置

差分探头可能有很小的电压偏置。这个偏置可能会影响精度，应先消除这个偏置后再继续测量。大多数差分电压探头有内置 DC 偏置调节控制，因此去除偏置相对简单。

类似的，必需先调节电流探头上的偏置，然后才能进行测量。通过把 DC 电流清零到 0A 的中位数值或尽可能接近 0A，可以调节电流探头偏置。TekVPI 探头，如 TCP0030AAC/DC 电流探头，内置了自动 Degauss/AutoZero（消磁 / 自动清零）程序，只需按探头补偿盒上的按钮，就可以完成操作，如图 3 所示。

图 3. 泰克 TCP0030A AC/DC 电流探头拥有 Degauss/AutoZero(消磁 / 自动清零) 功能。

对电流探头消磁

消磁功能会消除变压器磁芯中任何残留的 DC 流量，这可能是由大量的输入电流引起的。这种残余流量会导致偏置误差，应消除这种误差，提高测量的准确度。

泰克 TekVPI 电流探头提供了一个消磁警告指示灯，会警告用户执行消磁操作。消磁警告指示灯非常重要，因为电流探头会随着时间推移产生漂移，可能会明显影响测量。

解决宽带隙测试挑战

直到最近，半桥开关电路上管的开关测量几乎都是不可能实现的。任何相对于开关节点的测量，包括高侧 VDS 和经过电流并联装置的电压，都会遭受明显共模电压信号冲击差分信号导致的失真。这个问题在宽带隙器件中变得更加严重，比如 GaN 和 SiC 晶体管，因为开关频率提高了，必须优化全新设计。IsoVu 探头无可比拟的共模抑制功能以及高级功率测量和分析自动化功能，为优化最新 GaN 和 SiC 设计提供了杰出的解决方案。

图 4. 许多电源拓扑要求在存在大的共模信号时测量小的差分电压。例如，半桥开关电路上管的 VGS 和 VDS 通常会相对于地电平上下移动几百或几千伏的电压。IsoVu™ 隔离测量系统可以与 4 系列 B MSO 结合使用，提供超高共模抑制功能。

输入分析

工频测量表征设计对输入变化、设计吸收的电流和功率以及设计的工频电流失真的反应。某些测量如功耗是关键指标。其他测量如功率因数和谐波，可能会有法规限制。

功率质量测量

在 4/5/6-PWR 中，功率质量测量是一套标准功率测量。它们通常在 AC 线路输入上执行，但也可以应用到器件的 AC 输出上，如功率逆电器。这些测量包括：

- 频率
- RMS 电压和电流
- 波峰因数 (电压和电流)
- 有功率、无功功率和视在功率
- 功率因数和相位

进行测量

通过使用差分探头测量系统的工频电压，使用电流探头测量系统的工频电流，可以简便地进行功率质量测量。也可以使用相同的设置，来测量电流谐波。

图 5. 功率质量测量绘制了丰富的 AC 线路图画。上方波形是工频电压，电流是红色波形，瞬时功率是橙色波形。结果标签（右上方）显示了工频特点摘要，上方区域的结果表可以激活，提供更详细的数据和统计信息。

测量结果

- 频率：电压波形的频率，单位为 Hz
- V_{RMS}：显示的电压波形的均方根值
- I_{RMS}：显示的电流波形的均方根值
- 电压波峰因数：电压的峰值幅度除以电压的 RMS 值
- 电流波峰因数：电流的峰值幅度除以电流的 RMS 值
- 有功率：测量的系统的实数功率，单位为瓦特 (W)
- 无功功率：临时存储在电感或电容单元中的虚数功率，用 Volt-Amperes-Reactive (VAR) 表示
- 视在功率：测量的复合功率的绝对值，单位为伏安 (VA)
- 功率因数：有功率与视在功率之比
- 相位：有功率与视在功率之间的角度，单位为度

谐波

当非线性器件使流入电路的电流失真时，就会发生电流谐波。线性电路只在基础工频吸收电流，但非线性电路在基础频率的倍数上吸收电流，每个谐波有不同的幅度和相位。

在电流与谐波流经配电系统的阻抗时，会产生电压失真。热量会在线缆和变压器中积聚，在连接到电网的开关电源数量提高时，电网上的谐波失真也会提高。

因此，业内已经设计了多项标准，限制非线性负载对功率质量的影响。业内已经开发了 IEC61000-3-2 和 MIL-STD-1399 之类的标准，来限制谐波。

IEC61000-3-2 标准限制的是注入市电电源系统的电流谐波。它适用于每一相输入电流最高 16A、连接到公共低压配电系统 (230V AC 或 415V AC 三相) 的所有电气和电子设备。该标准进一步分成 A 级 (平衡三相设备)、B 级 (便携式工具)、C 级 (照明设备和调光装置) 和 D 级 (拥有独特的电流波形要求的设备)。

MIL-STD-1399 对设备（负载）提出了技术规范和测试要求，以保持兼容舰载 AC 功率系统，从计算机和通信设备直到空调。

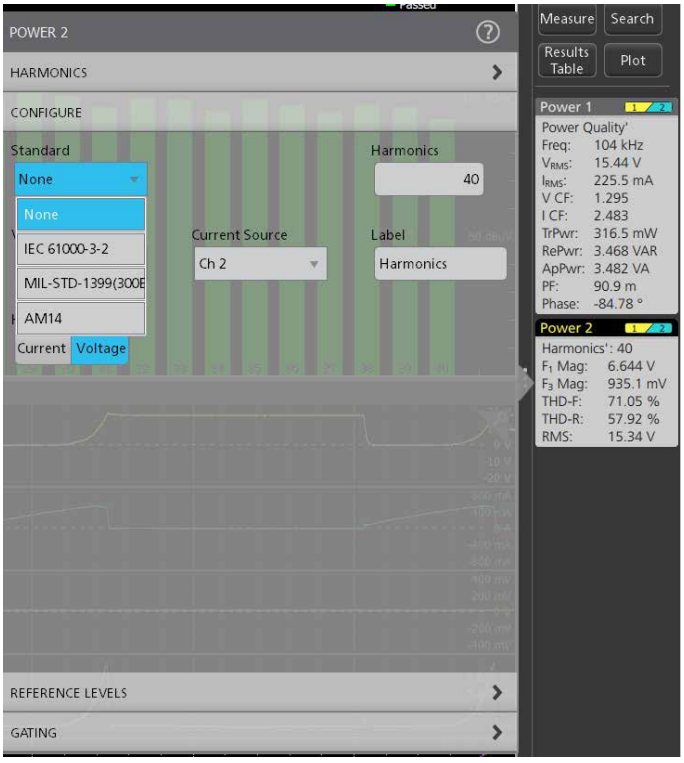


图 6. 设置基本电流谐波分析只要求几个简单的设置。这个实例显示了针对行业标准进行预一致性检查的设置

4/5/6-PWR 分析应用可以简便地测量电流谐波。它可以以表格方式和图形方式显示测量结果。设计人员还可以在认证之前，迅速比较器件性能与满足的标准，因为认证通常会耗费大量时间，而且成本非常高。在示波器中提供测量功能，不仅可以加快调试速度，还可以帮助避免最后再为了满足法规要求而改变设计。

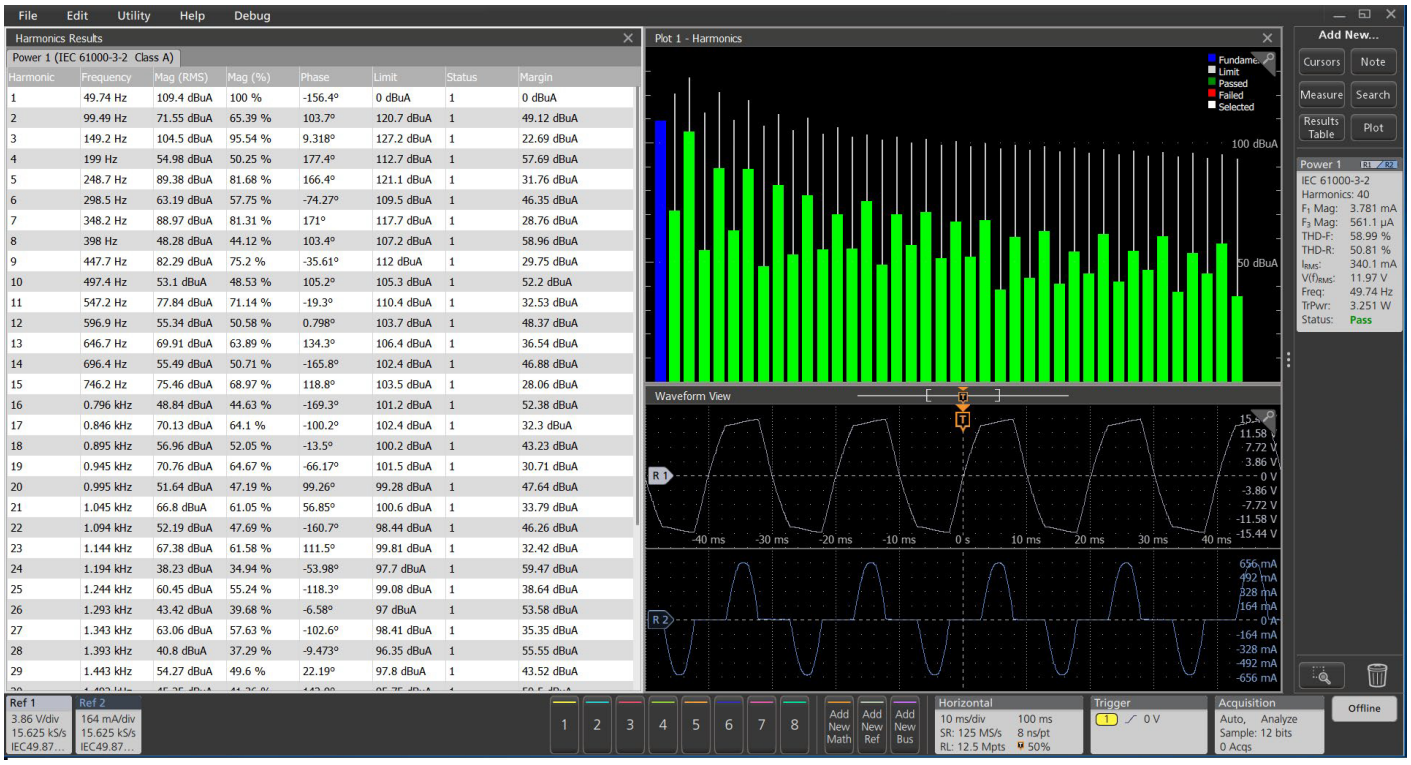


图 7. 使用 4/5/6-PWR 获得的谐波结果。右下方可以看到非正弦电流波形及谐波。谐波条形图用分贝显示了谐波内容。奇数谐波最明显，但完全落在 IEC 61000-3-2 极限范围内。

进行测量

使用差分电压探头测量工频电压，使用电流探头测量工频电流。

如果您想比较设计中的谐波与 IEC 61000-3-2 标准中的极限，那么必须确定工频，必需选择等级类型。在 C 级和 D 级标准中，还需要把输入功率、功率因数和基础电流输入到系统中。分析软件包将加载预先确定的极限表，对比测得谐波与极限，然后将显示预一致性测试结果，如图 8 所示。

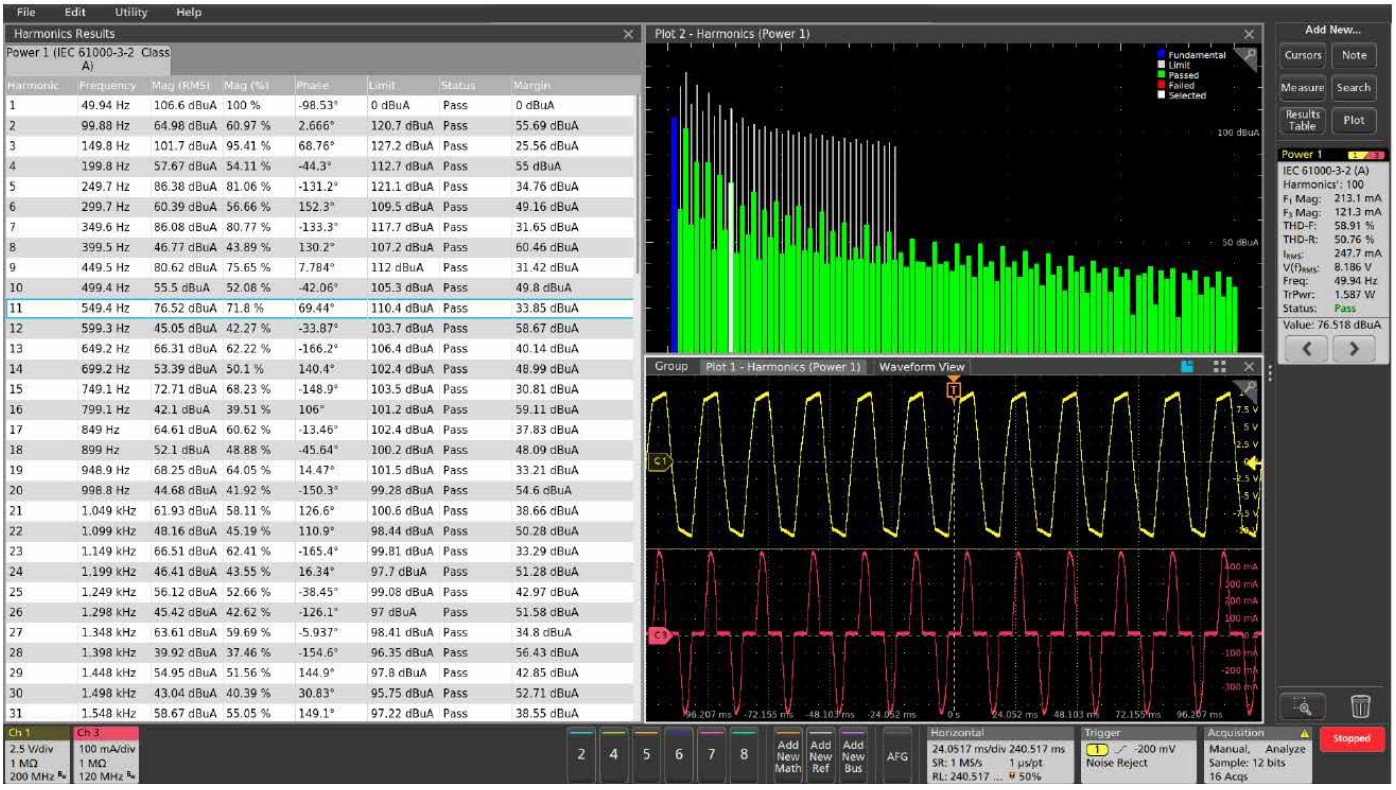


图 8. 可以以图形方式显示最多 400 个谐波。表中显示了 IEC 61000-3-2 预一致性测试结果。根据设置，分析软件包将加载预先确定的极限表，对比每个测得的谐波与极限。

测量结果

- Results 标签显示了选择的谐波标准、基础谐波和三阶谐波幅度、THD-F、THD-R、RMS 值和通过 / 未通过状态。
- 可以选择各个谐波，测量值在结果标签、柱状图和结果表之间链接起来。
- 谐波表包括：
  - o 选择的谐波标准
  - o 谐波数和频率
  - o 幅度 (RMS)：谐波测得的 RMS 幅度值，单位为 dBµA 或 A
  - o 幅度 (%)：相对于基础频率的谐波测得幅度
  - o 相位：相对于频率基准的谐波相位，单位为度
  - o 极限：指定标准规定的谐波极限
  - o 状态：预一致性测试通过 / 失败状态
  - o 裕量：实测值与极限之差
- 电流谐波可以用分贝微安 (dBµA) 或安培 (A) 为单位显示

图 9. 对通道 7 上的电流执行自动浪涌电流测量和电容测量

浪涌电流和输入电容

通常，浪涌电流会在首次通电时出现。电源转换器在其输入电容充电时会汲取相对较高的电流。初始浪涌之后，除非发生其他系统变化，否则电流将维持在稳定状态。浪涌电流测量可提供有关电源设计的重要信息，包括保护器件的尺寸。在极端情况下，浪涌电流会导致交流线路电压骤降。

此功率分析软件支持自动浪涌测量。功率分析软件会识别浪涌区域并在显示器上标注，最后计算该区域内的浪涌电流。

由于示波器会对电压和电流波形进行数字化处理，因此软件还可通过积分电流找到电荷，然后使用等式 c=q/v 测量系统的输入电容。除了分析电源启动的特性之外，动态电容测量还有助于分析切换装置中的栅极充电行为。与其他电容测量技术相比，我们使用即时电流和电压波形测量工作条件下的总电容。

浪涌电流和输入电容直接相关，且两者均可提供重要的详细信息，让工程师充分了解电源转换器的启动特性。

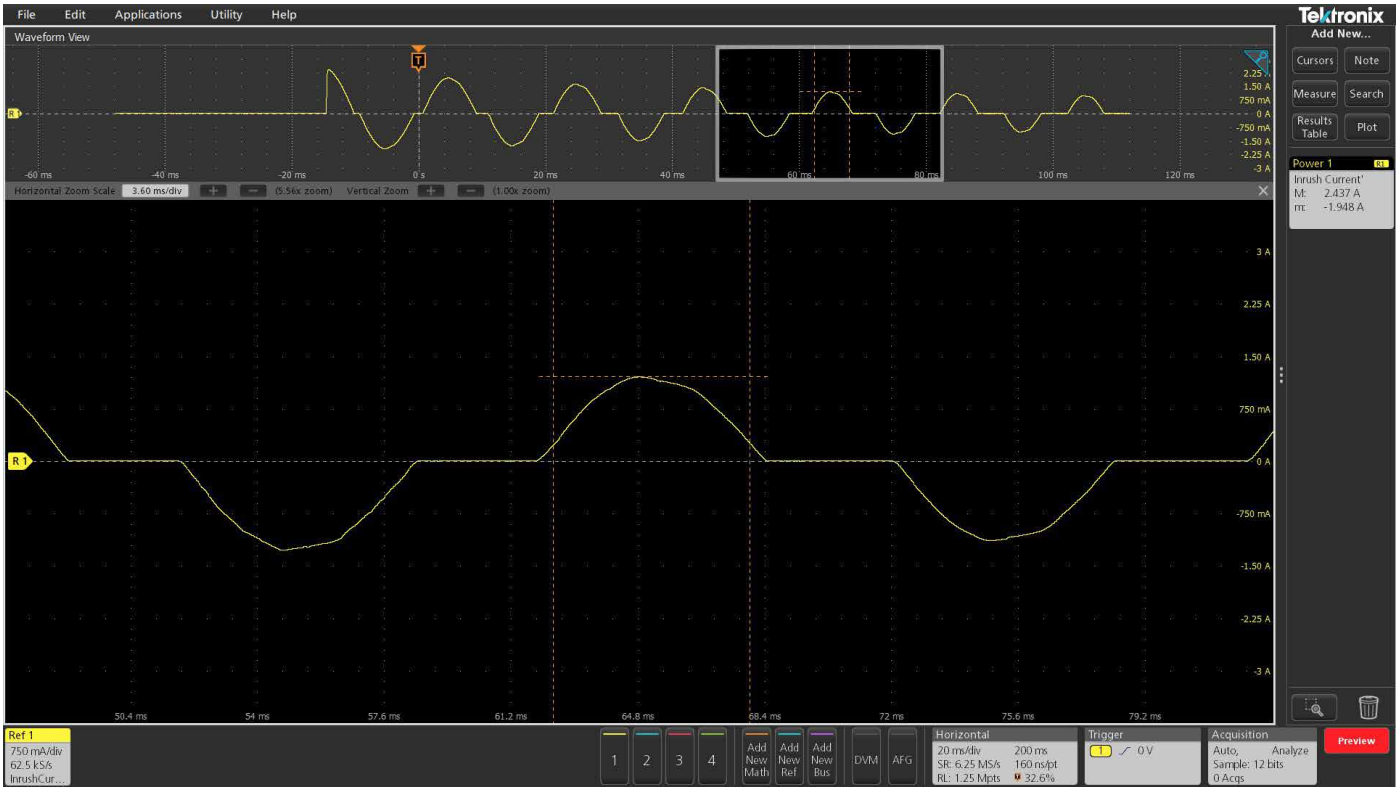


图 10. 电源接通时会发生浪涌。电流波形在达到稳定状态之前呈现出逐渐减小的峰值。

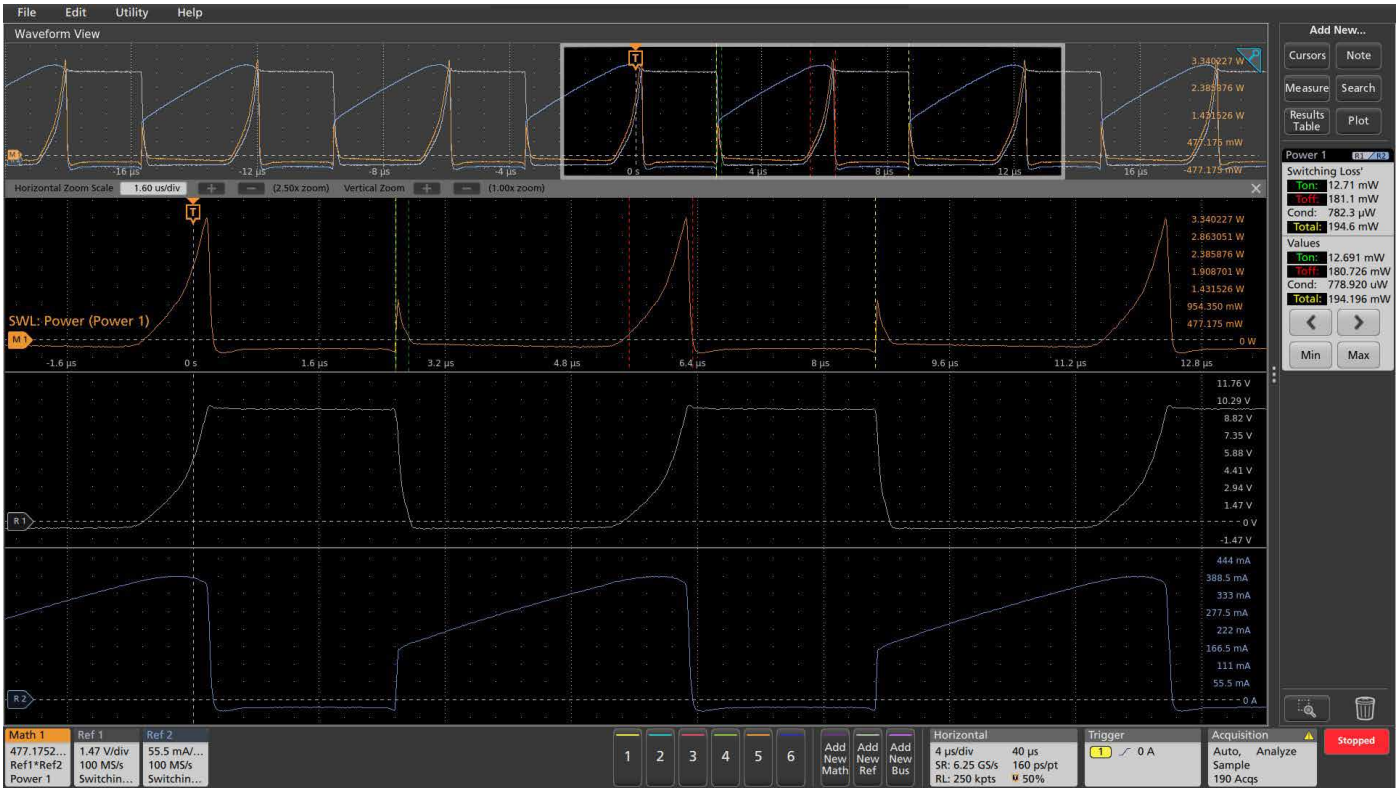


图 11. 使用 4/5/6-PWR 进行开关损耗测量。把瞬时功率的电流和电压相乘，可以得到上方轨迹（橙色）。损耗测量在瞬时功率波形上执行。每个损耗区域都用带颜色的标记标出，标记与测量标签对应。底部波形是开关上的电压和流经开关的电流。

开关分析

电源开关阶段的测量确认转换器是否正确运行，量化损耗来源，确认器件在正常范围内工作。

开关损耗测量

在各种物理电容器和寄生电容器充电时，会发生开通损耗，电感器会产生磁场，会发生相关的瞬态电阻损耗。同样，在开关电源关断时，即使市电已经拔下，仍会有能量放电并与各种元件交互，因此也会发生损耗。

进行测量

为了进行开关损耗测量，示波器必须测量经过开关上的电压和流经器件的电流。开关损耗结果如图 11 所示。

测量结果

- Ton：每个周期开通功率和能量损耗值的均值
- Toff：每个周期关断功率和能量损耗值
- Total：每个周期总平均功率损耗和平均能量值
- 左右箭头按钮可以遍历开关周期，放大查看问题区域
- 还可以在结果表中查看测量数据。这个表格会显示所有开关周期的累积测量结果，迅速进行复核。

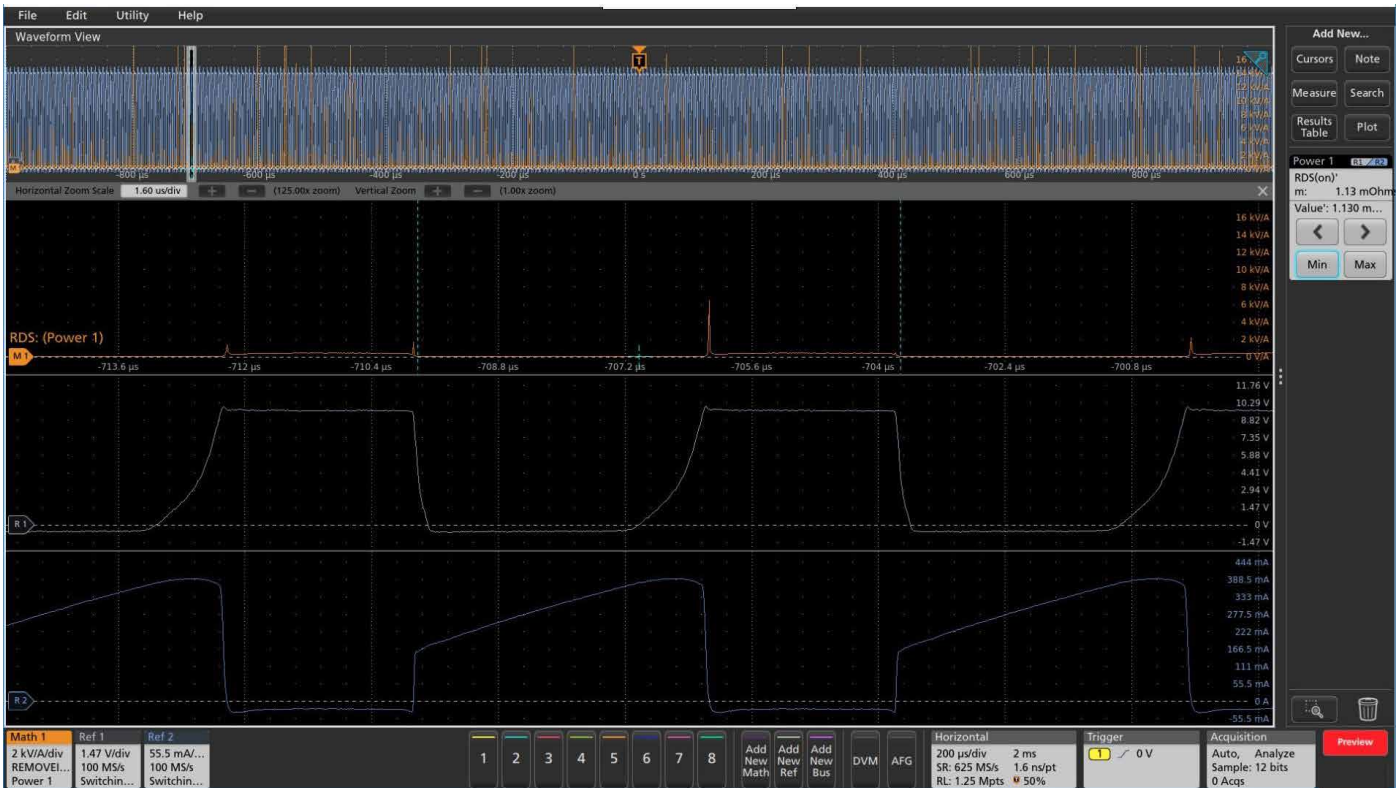


图 12. Rds (on) 测量 Ch1（黄色）波形是 FET V_{DS} 电压，Ch2（青色）波形是 FET 电流。波形会在相位上呈现反相的状态，以正确指示导通区域中的电流更大。“数学”功能将会绘制 RDSon 值，且结果标签会显示根据数学波形计算的最小 RDSon 值。在图示这种情况下为 1.13mOhms。

Rds (on)

当开关器件处于导通状态并正在传导电流时，此测量可分析漏极至源极电阻特性。动态导通电阻是指器件导通时两端的电压与流经装置的电流之比。您可以使用游标选通功能准确地测量 RDS (on)，这是导致开关器件损耗的重要原因。

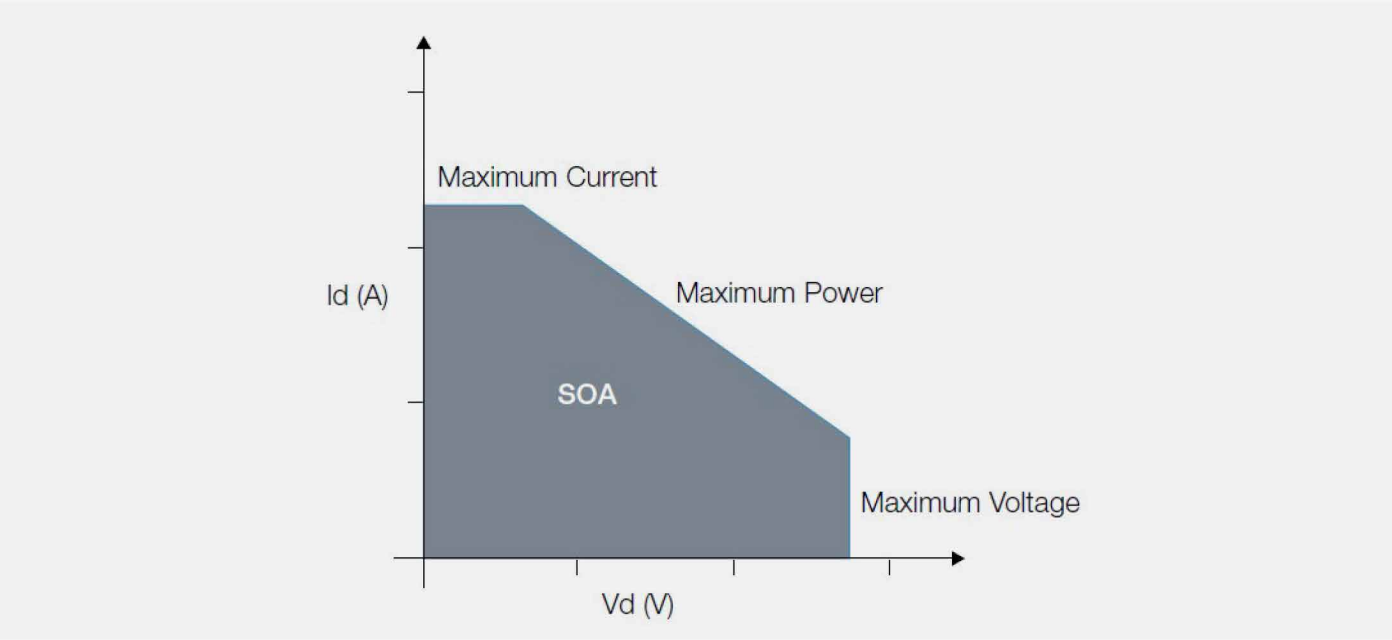


图 13. 晶体管的安全工作区 (SOA) 图。

安全工作区

开关晶体管的安全工作区 (SOA) 决定着电压一定时可以安全流经晶体管的电流。SOA 通常在 BJT、MOSFET 或 IGBT 开关晶体管的产品技术资料中作出规定。它表示为 V_{CE} (对 FET 为 V_{DS}) 相对于 I_{CE} (或 I_{DS}) 关系图，描述了晶体管在不劣化或不损坏的情况下可以工作的范围。

功率分析软件可以把器件产品技术资料中的 SOA 上传到 4 系列 B MSO 中，然后您可以在实际器件上，测量电压和电流。示波器记录 V-I 图，可以指明任何参数是否超出 SOA。

进行测量

在电源中运行晶体管时，确定晶体管的 SOA 的主要挑战之一，是在各种负载场景、温度变动和工频输入电压变化下准确地捕获电压和电流数据。4/5/6-PWR 自动实现数据捕获和分析，简化了这一任务。测量要求探测开关晶体管上的电压和流经的电流。

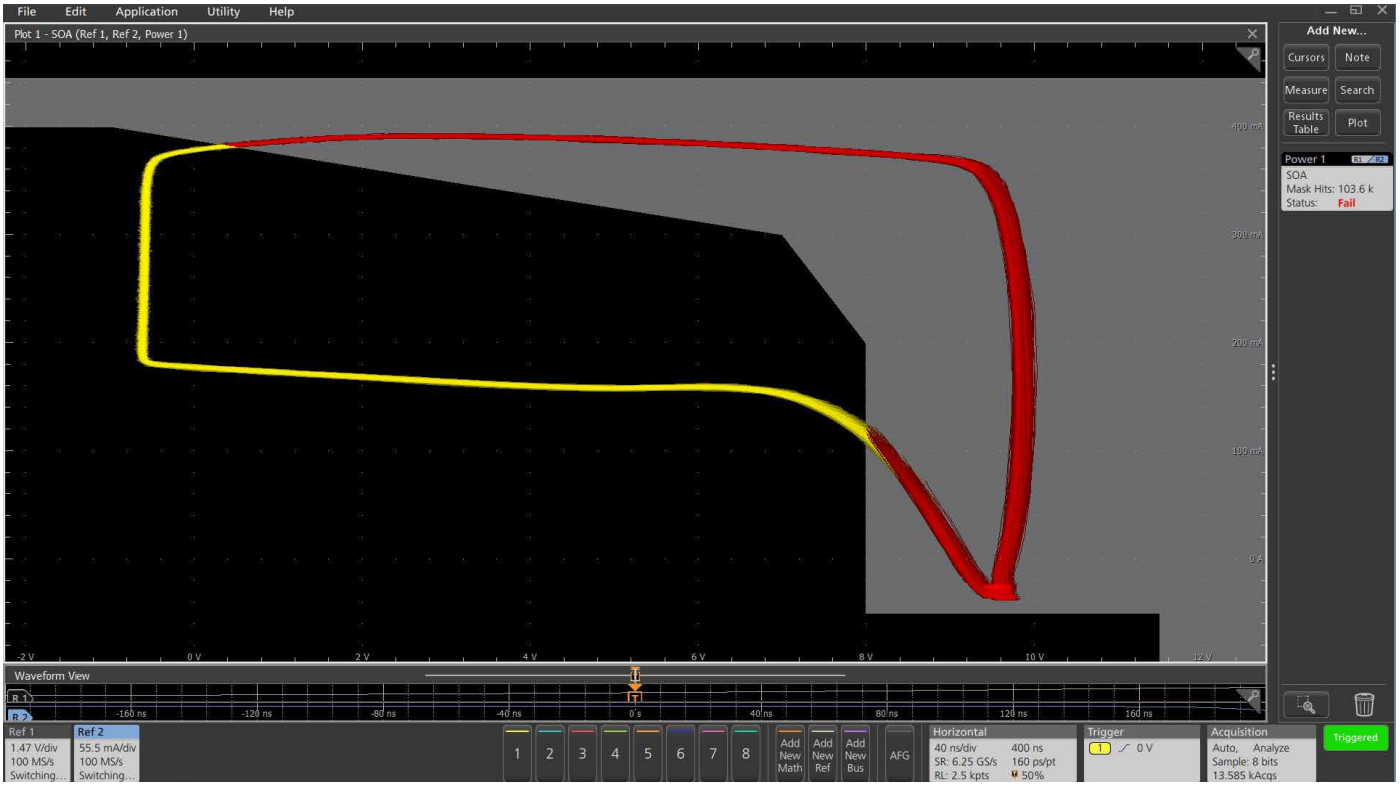


图 14. 使用 4/5/6-PWR 进行 SOA 测试。如果数据点落在模板区域内，那么它们是黄色的，表示“通过”；如果落在模板区域外面，那么它们是红色的，表示“未通过”。在本例中，V-I 曲线落在 SOA 外面，表明开关器件受到的压力过大。

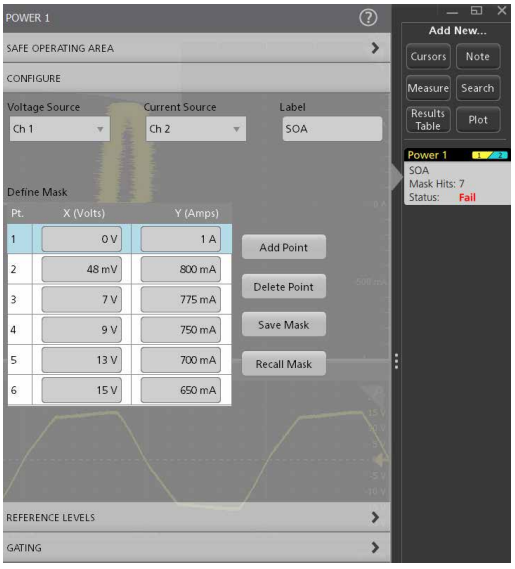


图 15. SOA 模板编辑器窗口。模板由一套（电压，电流）坐标确定，坐标来自开关器件产品技术资料，也可以由用户自己确定。

下一步是设置 SOA 模板，如图 15 所示，SOA 模板编辑器允许输入晶体管的 SOA 极限，极限在晶体管产品技术资料中确定，或由您自己的标准确定。

测量结果

在设置完成后，会显示 SOA 测试结果，如图 14 所示。电压和电流波形在 XY 模式下在一条记录中绘制。示图显示了一个采集周期的所有数据。

结果标签显示了器件落在 SOA 模板外面的次数，给出了测试通过 / 未通过结果。

磁性分析

电感器和变压器用来为开关电源及线性电源中的存储器件加电。某些电源还在输出上，在滤波器中使用电感器。考虑到其在功率转换器中的重要作用，表征这些磁性器件对确定电源的稳定性和整体效率具有至关重要的作用。

4/5/6-PWR 中的磁性分析功能自动完成以下几组测量：电感、磁性损耗和 B-H 参数。

电感

电感器的阻抗会随着频率提高，较高频率的阻抗要高于较低频率的阻抗。这种特点称为电感，单位用亨利为表示。可以使用配备功率分析软件的示波器自动测量器件的电感。

进行测量

4/5/6-PWR 应用对测量期间的电压求积分，然后除以电流变化，计算出电感值。它探测经过磁性器件的电压及流经磁性器件的电流，来进行测量。电感测量结果与图 14 中多种其他测量一起显示。黄色 (Ch1) 波形是经过电感器的电压，青色波形 (Ch2) 是流经电感器的电流。另外还显示了 B-H 曲线。

测量结果

- 电感：器件或电路的电感值

磁性损耗

分析磁性功率损耗是全面分析开关电源损耗的基本组成部分。两种主要磁性损耗是磁芯损耗和铜缆损耗。铜缆线圈的电阻会在电源中产生铜缆损耗。磁芯损耗与磁芯中的漩涡电流损耗和磁滞损耗有关。磁芯损耗与 DC 通量无关，但受到 AC 通量摆幅和工作频率的影响。

进行测量

4/5/6-PWR 能够计算单线圈电感器、多线圈电感器、甚至变压器中的磁性损耗。

在单线圈变压器中，会连接一只差分探头，测量经过主线圈的电压。电流探头则测量流经变压器的电流。然后示波器和功率测量软件可以自动计算磁性功率损耗。然后会显示磁性功率损耗结果，如图 16 所示。

测量结果

功率损耗：由于磁性元件导致的总功率损耗

磁学属性 (B-H 曲线)

磁性通量密度 B 指磁场的强度，单位为特斯拉，它决定着磁场在运动电荷上施加的力。磁场强度或场强 H 指磁化力，单位为 A/m。材料的磁导率 m 的单位为 H/m，衡量的是材料由于应用的磁场而产生的磁化程度。

磁长和磁芯周围的线圈数等物理特点有助于确定磁性材料的 B 和 H。B-H 曲线图通常用来检验开关电源中磁性成分的饱和度（或匮乏度），用来衡量磁芯材料单位容量中每个周期损耗的能量绘图。绘图会针对场强 H 绘制磁性通量密度 B 的曲线。由于 B 和 H 都依赖磁性元件的物理特点，如磁长和磁芯周围的线圈数，因此这些曲线决定着元件磁芯材料的性能包络。

进行测量

为生成 B-H 图，要测量经过磁性元件的电压和流经的电流。在变压器中，主要是经过初级线圈和次级线圈的电流。必须先在配置面板中输入电感器的圈数 (N)、磁长 (l) 和磁芯的横截面面积 (Ae)，然后功率分析软件就可以计算 B-H 曲线图。

高压差分探头连接到示波器的通道 1 上，经过变压器的初级线圈。测得的这个电压是磁性元件中磁感应 B 的结果。通道 2 使用电流探头测量流经初级线圈的电流。如果需要，电流探头还用来测量流经通道 3 和通道 4 上次级线圈的电流。然后功率分析软件使用示波器通道 2、3、4 的数据计算磁化电流，然后使用磁化电流值，确定 H 成分。

磁学属性结果如图 16 所示。

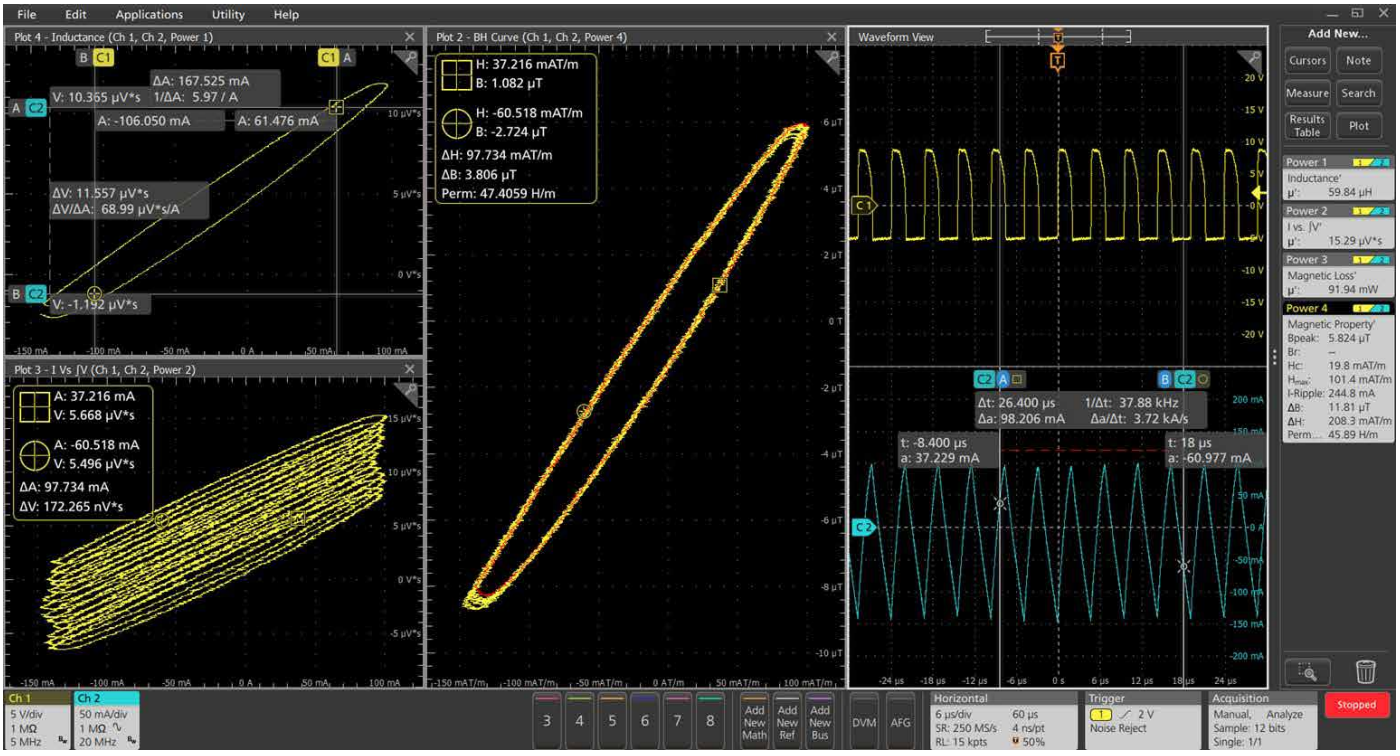


图 16. 电感器上的磁性测量。Ch1(黄色) 波形是经过电感器的电压，Ch2(青色) 波形是流经电感器的电流。B-H 曲线在显示器中心显示。电感、磁性损耗和磁学属性显示在右面的结果标签中。

测量结果

- △B: 通量密度变化。
- △H: 场强变化。
- 磁导率: 材料的磁化程度。
- Bpeak: 磁性元件中感应的最大磁性通量密度。
- Br: 曲线上 H = 0、且 B 仍为正值的点，这称为元件的剩磁，是衡量元件顽磁性的一个指标。剩磁越高，材料保留磁化的程度越高。
- Hc: 曲线上 B = 0、且 H 是负值的点。这代表着导致 B 达到零所要求的外部场。这个 H 值称为抗磁力。抗磁力小，意味着元件可以简便地去磁。
- Hmax: H 轴和磁滞环横截面上 H 的最大值。
- 纹波: 电流的峰峰值。

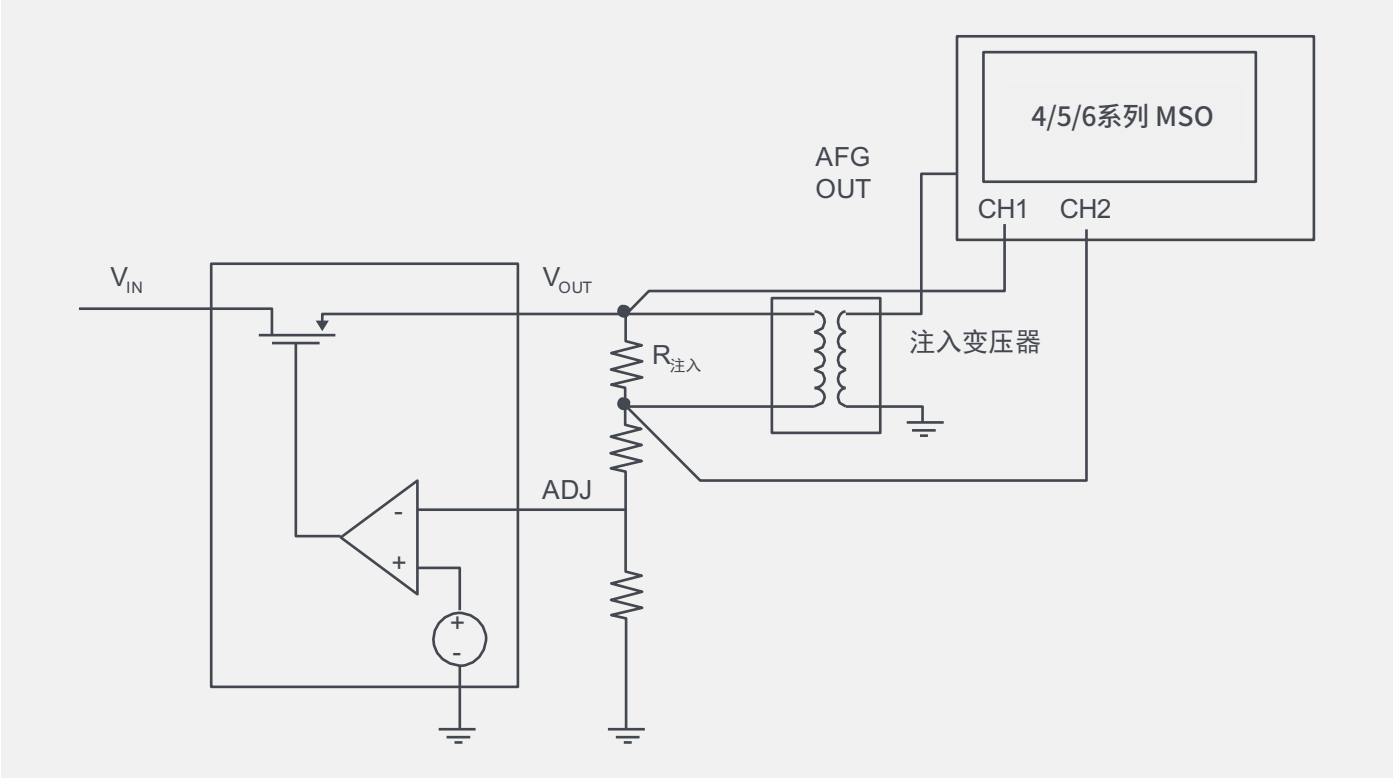


图 17. 隔离变压器 / 注入变压器用于将接地信号源与浮动注入电阻隔离。

频率响应分析

控制环路频率响应

控制环路频率响应分析（通常称为伯德图）有助于分析电源控制回路的频率响应特性。伯德图表示在一定频率范围内计算出的反馈环路的增益和相位偏移，进而提供有关控制环路速度和电源稳定性的重要信息。这可以使用矢量网络分析仪（VNA）进行测量，但还可以使用示波器和函数发生器进行测量。

为了测量电力系统的响应，必须将已知信号注入反馈回路。对于此测量，使用 4/5/6 系列 MSO 中的任意波形 / 函数发生器(AFG)选配来产生指定频率范围内的正弦波。

直流 - 直流转换器或 LDO 必须在其反馈回路中配置一个较小的（5-10Ω）注入电阻器 / 终端电阻器，以便将来自函数发生器的干扰信号注入回路中。

在注入电阻两端连接一个在具有宽频宽范围内具有平坦响应的注入变压器，并将接地信号源与电源隔离。Picotest J2101A 注入变压器的频率范围为 10Hz-45MHz，与 4/5/6 系列 MSO 的函数发生器选配吻合。建议使用低电容、低衰减的无源探头（例如 TPP0502）进行电压测量。这样可以在 6 系列 MSO 上以 500 µV/div 的垂直灵敏度进行测量，在 4/5 系列 MSO 上以 1 mV/div 的垂直灵敏度进行测量。

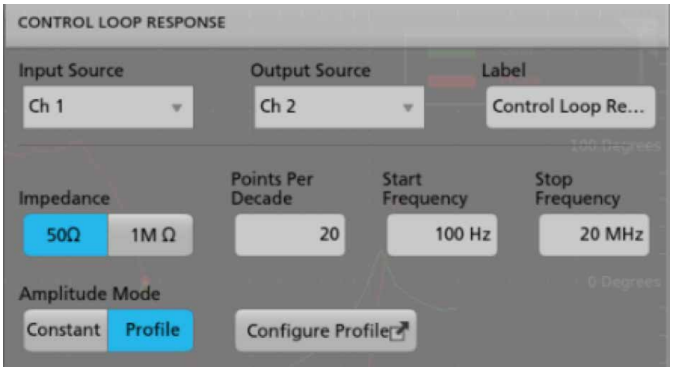


图 18. 起始和终止频率、振幅和 10 倍频率范围的频率点数决定了发生器将注入控制环路的激励。

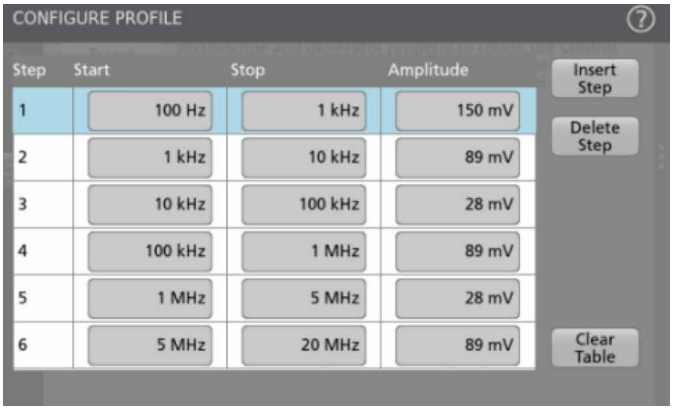


图 19. 振幅自定义曲线可用于改善测量的信噪比（SNR）。此方法支持在 DUT 对干扰敏感的频率上应用较低的振幅，而在 DUT 对干扰不太敏感的频率上应用较高的振幅。

建立连接后，配置激励扫描。4/5/6-PWR 软件支持恒定振幅和振幅自定义扫描。恒定振幅扫描在所有频率下均维持相同的振幅。振幅自定义扫描支持在定义的频带指定不同的振幅。振幅自定义扫描可用于改善测量的信噪比（SNR）。

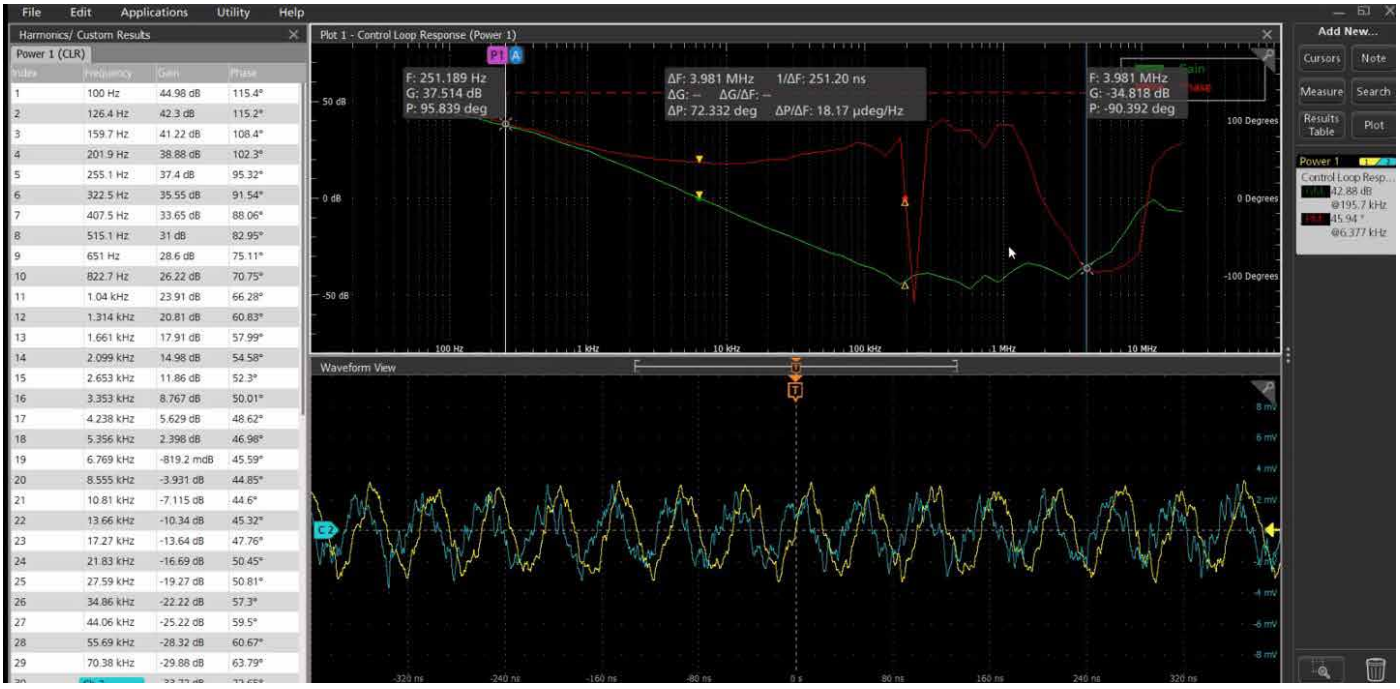


图 20. 软件计算的增益（绿色迹线）为 20 log（Vout/Vin）。红色轨迹表示注入信号和输出之间相对于 -180°的相位偏移。在增益曲线跨过 0dB 时测量相位裕度（PM）。当相位曲线跨过零度标记时测量增益裕度（GM）。该表显示了各频率的增益和相位。

相位裕度是在增益交叉频率处测量，该增益交叉频率会出现在增益图跨过 0 db 时。相位图上的对应点给出了相位裕度。

增益裕度是在相位交叉频率处测量，该相位交叉频率会出现在相位跨过 -180 度时。相位是相对于 -180 进行绘制，因此显示为零交叉。在此相位交叉频率处的相应增益值给出了增益裕度。

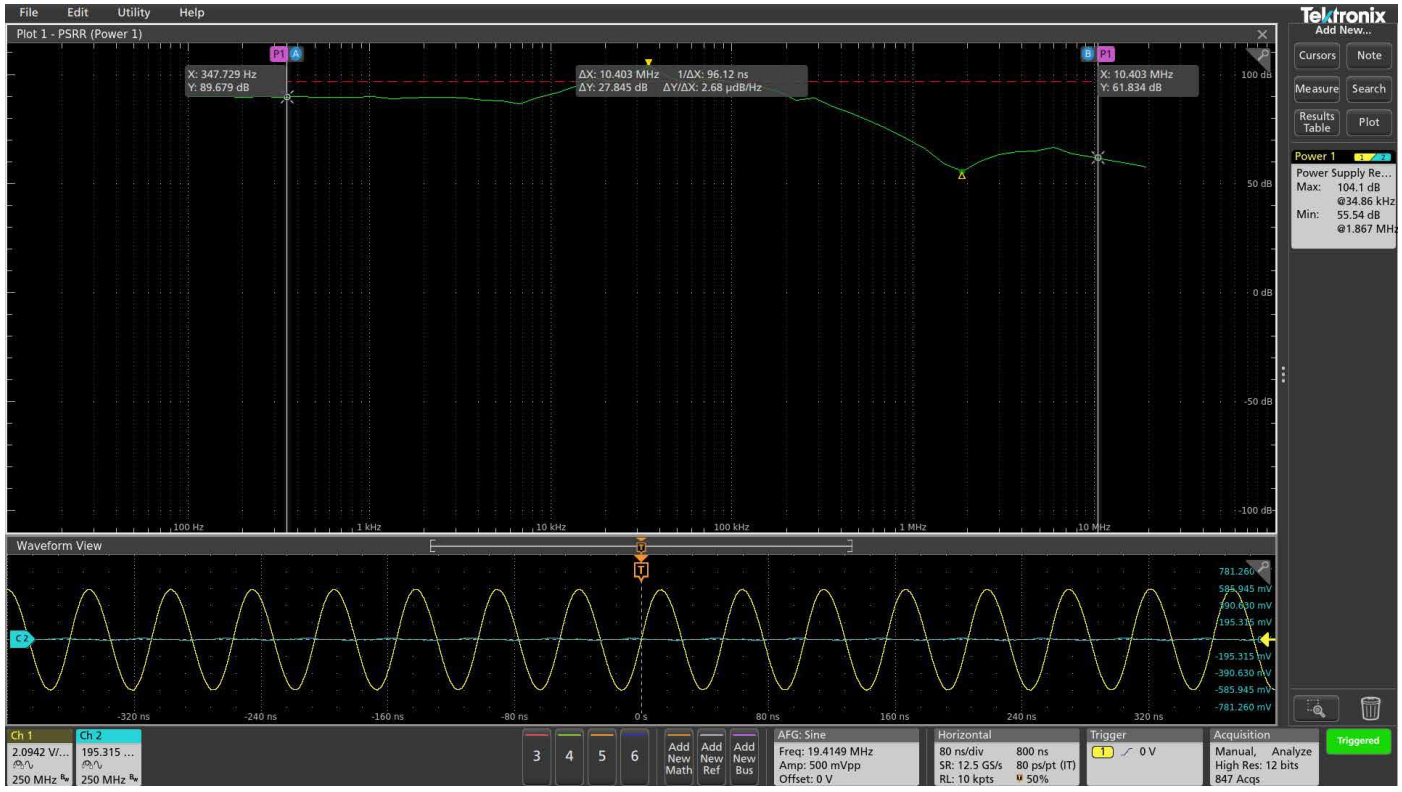


图 21. PSRR 图显示了在电源输出端上的交流（施加至输入端）衰减。

电源抑制比（PSRR）

电源抑制比表示电源能够防止其输入上的交流噪声出现在其直流输出上的能力。为了执行 PSRR 测试，将扫描正弦激励施加到电源的输入端。此测量需要直流＋交流网络求和装置，例如 Picotest 的 J2120A 线路注入器。

4/5/6-PWR 软件可自动进行扫描，并测量每个频率的输入输出信号。此软件会以 20 Log（Vin/Vout）计算频带内每个频率上的衰减比，并在显示器上绘制测量值。

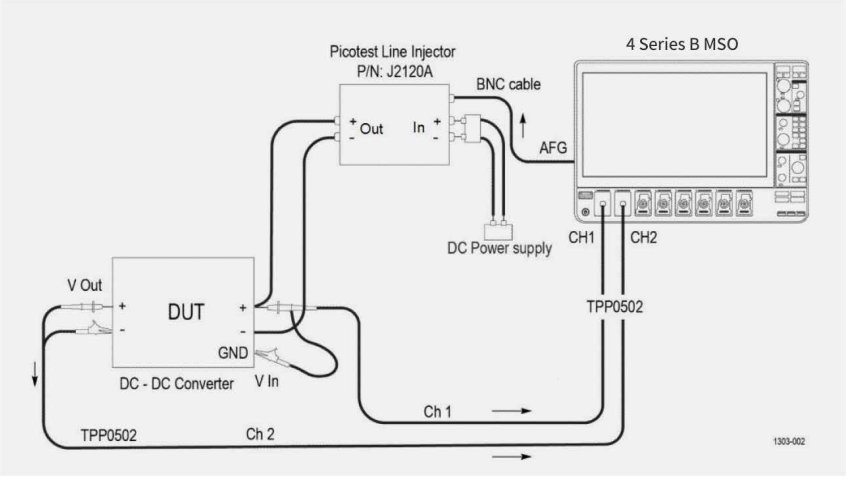


图 22. 线路注入器用于将来自函数发生器的交流电激励加入电源的直流输入。

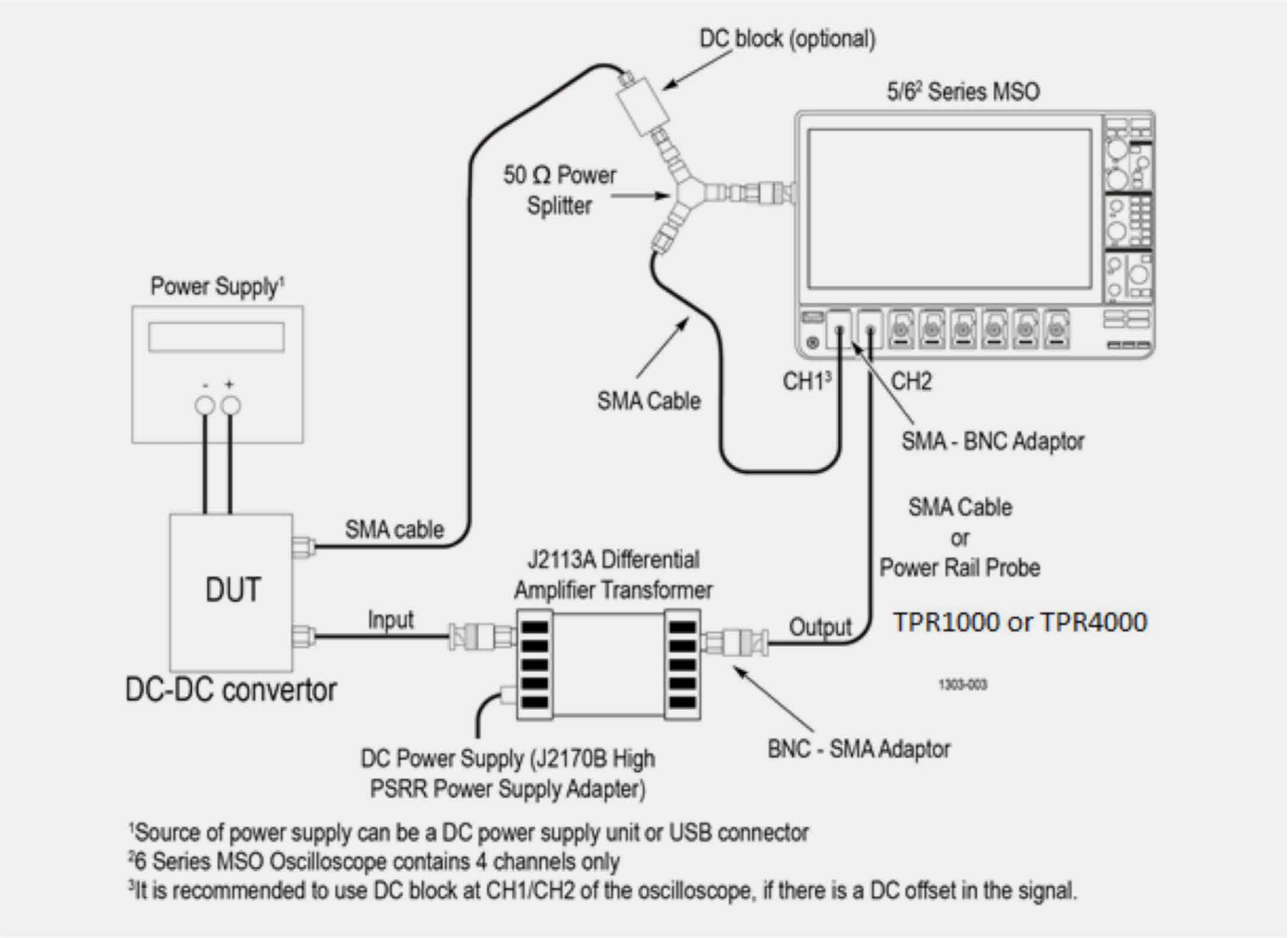


图 23. 阻抗测量设定。电源轨探头在直流和 50Ω 交流输入阻抗下可提供高灵敏度和高阻抗，以实现低负载。或者，可以使 P6150 探头（如果有）或使用带直流阻隔的 SMA 电缆。

阻抗测量

分析配电网络的阻抗有助于确定系统内噪声的影响。阻抗曲线表示特定频带上的阻抗值。DUT 可能是 PDN（包括电路板走线和电容器）的组合阻抗，或者是组件或子系统，例如稳压器模块（VRM）。

阻抗测量通常使用 VNA 执行，但是典型的 VNA 无法在低频下进行测量或测量 <10mΩ 的低阻抗值。基于示波器的系统可以量测低至 1Hz 的频率。基于示波器的解决方案还可以在扫描过程中同时显示来自 DUT 的输入和输出信号，因此可以观察到时域变化。

示波器还具有在执行分析时显示时域波形（包括激励信号和响应）的好处。若使用 VNA，则无法使用这些功能。

若要执行测量，必须将接地示波器与 DUT 隔离。在图 23 所示的示例系统中，Picotest J2113A 差动式放大器变压器可用于此目的。50Ω 功率分配器用于将信号从函数发生器发送到 DUT 和示波器上的通道 1。

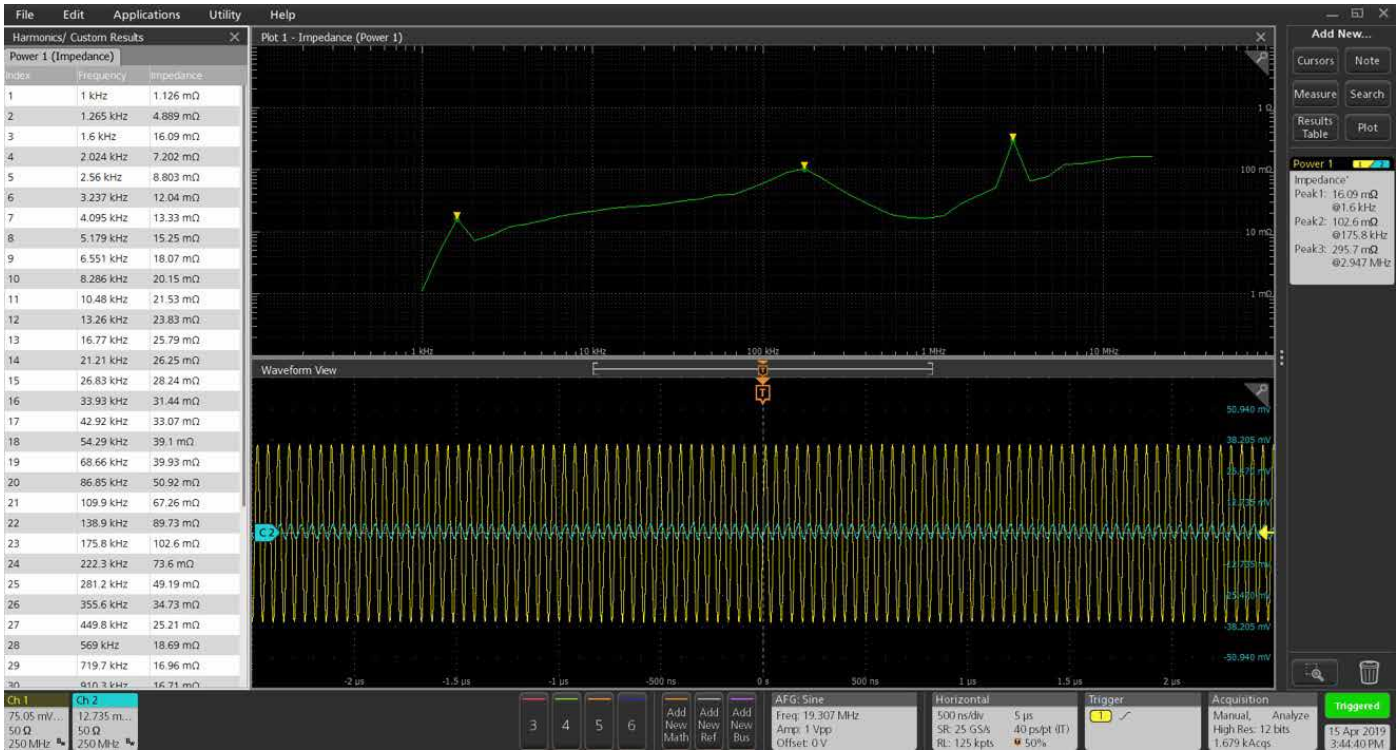


图 24. 阻抗与频率测量图。曲线具有三个峰值，表示阻抗值随频率变化而变化。目标是生成一张平坦的阻抗图，其中的任何峰值均低于目标阻抗。游标可用于测量曲线上的任意点。

输出分析

必须评估任何 DC 电源输出的稳定性和噪声。5-PWR 高级功率测量和分析软件为量化和分类纹波提供了多种工具。

工频纹波和开关纹波

简而言之，纹波是叠加到电源 DC 输出上的 AC 电压，用正常输出电压的百分比或峰峰值电压表示。

电源输出上显示两类纹波：工频纹波度量的是与工频频率有关的纹波，开关纹波度量的是根据确定的开关频率从开关电源输出检测到的纹波数量。

输出工频纹波通常是工频频率的两倍，开关纹波则一般与噪声耦合，在 kHz 频率范围内。把工频纹波与开关纹波分开，是电源表征中最大的挑战之一。功率分析软件大大简化了这项任务。

进行测量

只需使用一只电压探头，就可以测量系统的纹波。差分探头必须连接到系统的输出上，才能测量输出工频和开关纹波电压。

工频纹波和开关纹波的配置标签（参见图 25）非常像。这两种纹波测量都要求选择输入耦合（AC 或 DC）模式、要求的带宽限制（20MHz、150/250MHz 或全带宽）及示波器的采集模式 - 采样、峰值检测或高分辨率（High Res）。在工频纹波测量中，必须确定系统的工频频率：50 Hz 或 60 Hz 或 400 Hz。开关纹波测量要求开关频率指标。

图 25. 4/5/6-PWR 的工频纹波配置标签。

一旦测量配置完毕，会显示结果，如图 26 所示。

测量结果

峰峰值和 RMS 纹波值：这些是系统工频或开关纹波的峰峰值和 RMS 电压。

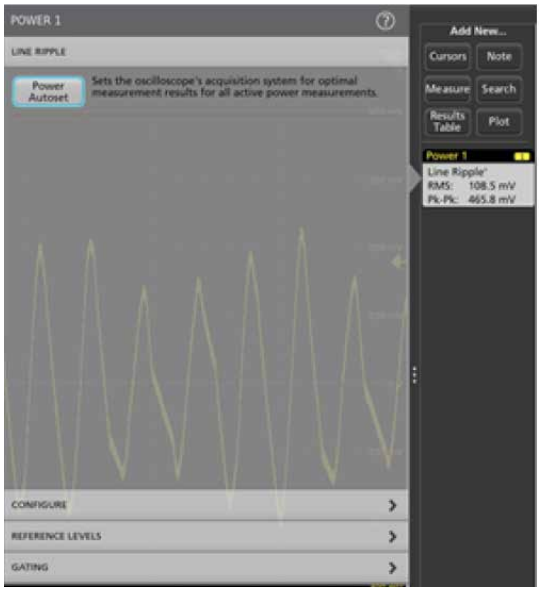


图 26. 使用 4/5/6-PWR 测量开关纹波。

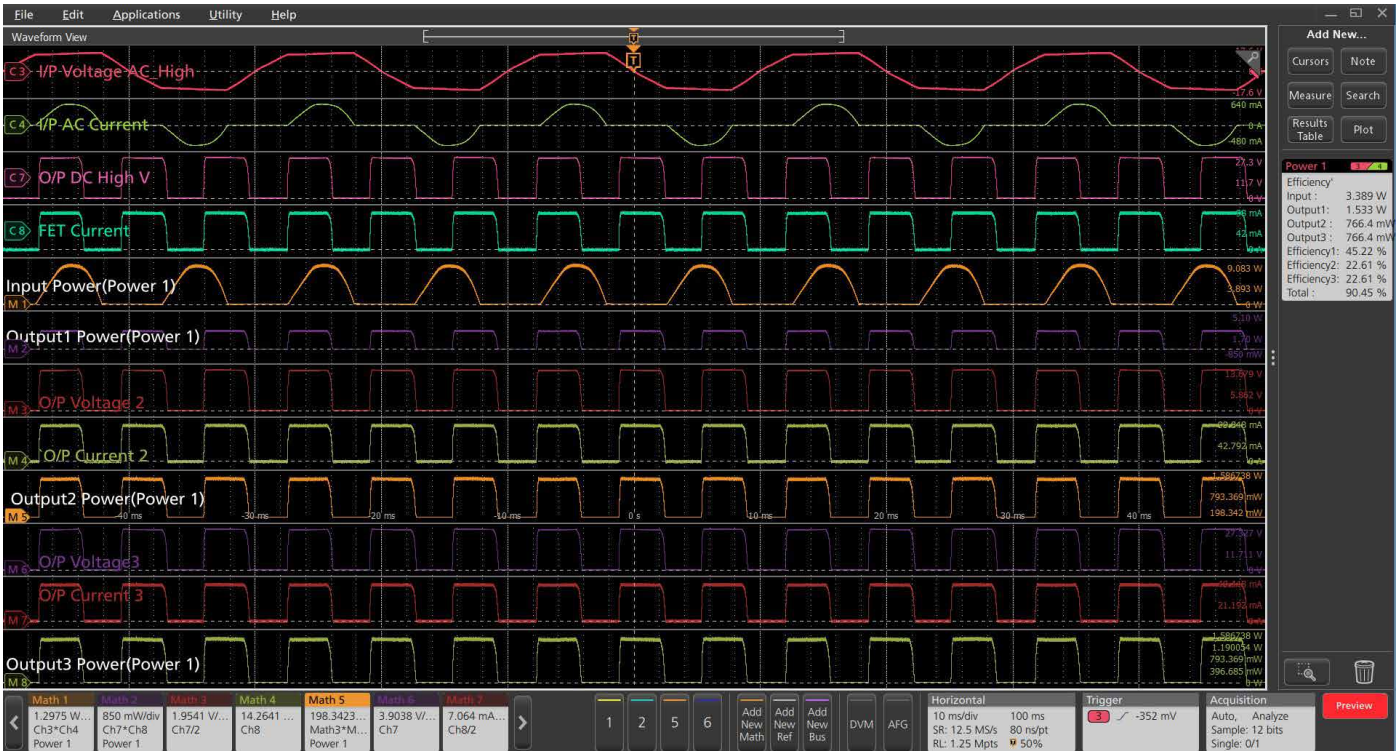


图 27. 使用 5-PWR 进行效率测量。

效率

器件或产品效率高，是当今激烈竞争的市场环境中决定成败的一个关键因素。高级功率测量和分析软件可以简便地测量功率转换 (AC-DC,AC-AC,DC-DC,DC-AC) 产品的效率。对拥有最多 3 个输出的功率产品，高级功率测量和分析软件使得设计人员可以立刻测试整个系统的效率，加快测试和验证速度。

图 27 显示了拥有 1 个输入和 3 个输出的 AC-AC 转换器上的效率测量结果，其中使用演示电路板和数学信号仿真多输出器件。我们测量（在本例中仿真）了每个输入和输出的电压和电流：

- Ch3: 输入电压
- Ch4: 输入电流
- Ch7: 输出 1 电压
- Ch8: 输出 1 电流
- Math3: 输出 2 电压
- Math4: 输出 2 电流
- Math6: 输出 3 电压
- Math7: 输出 3 电流

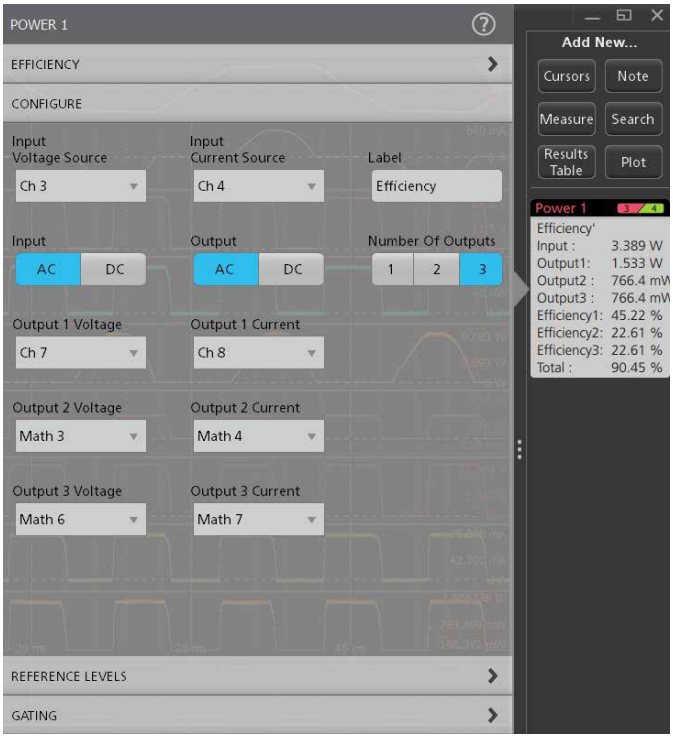


图 28. 效率测量配置允许用户配置信号类型及最多 3 个输出。

注意上例中使用了自定义标签，识别起来非常简便。应用软件根据需要自动创建数学功率波形。在上面的实例中，这些波形都是自动创建的：

- Ch3: 输入电压
- Ch4: 输入电流
- Ch7: 输出 1 电压
- Ch8: 输出 1 电流
- Math1: 输入 1 功率
- Math2: 输出 1 功率
- Math5: 输出 2 功率
- Math8: 输出 3 功率

应用会计算被测器件的各种效率和总效率，在结果标签中显示。还可以打开结果表，用 .MHT 或 PDF 格式保存报告。

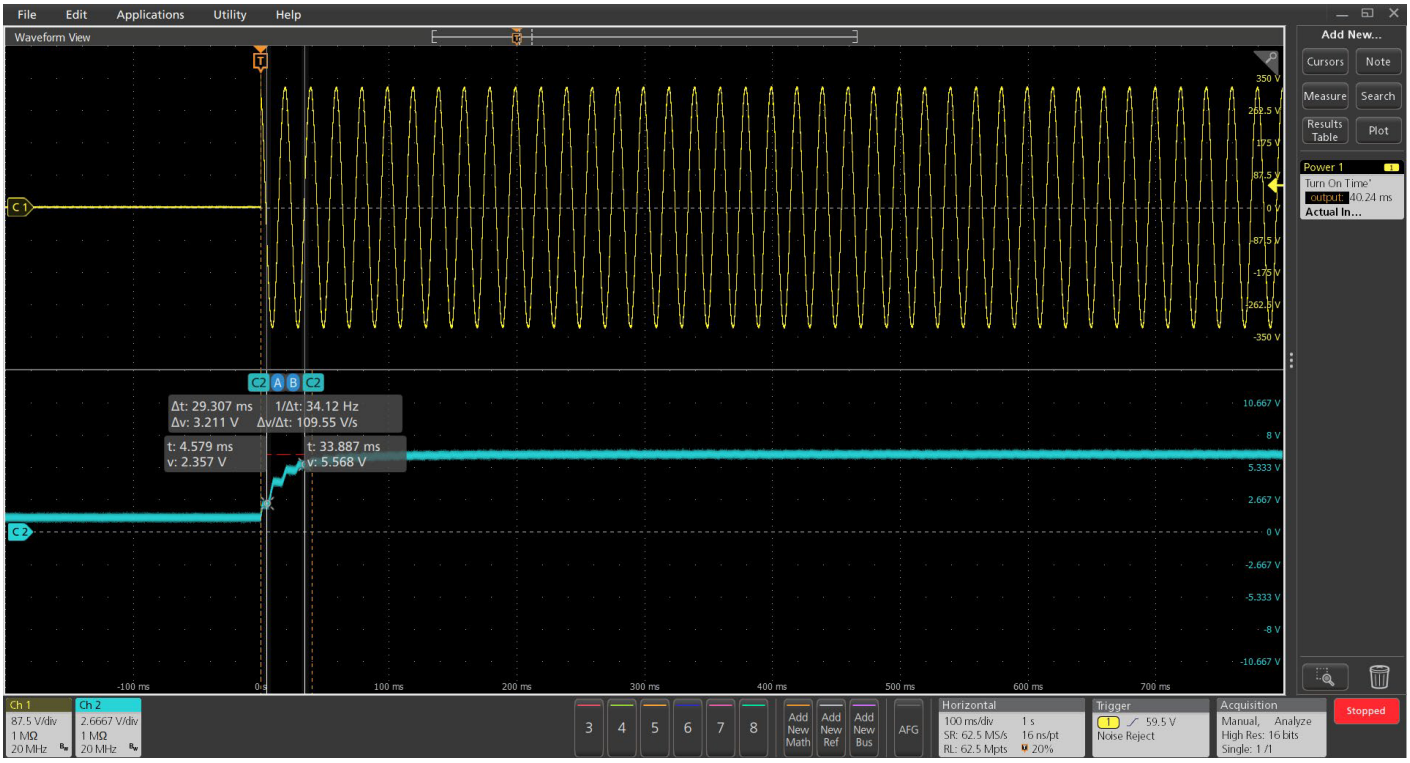


图 29.

导通时间

导通时间是施加输入电压后达到电源输出电压所需的时间。一个通道用于测量输入，示波器的任何剩余通道可用于测量输出。这样可以在一次采集中测量多个电源轨。

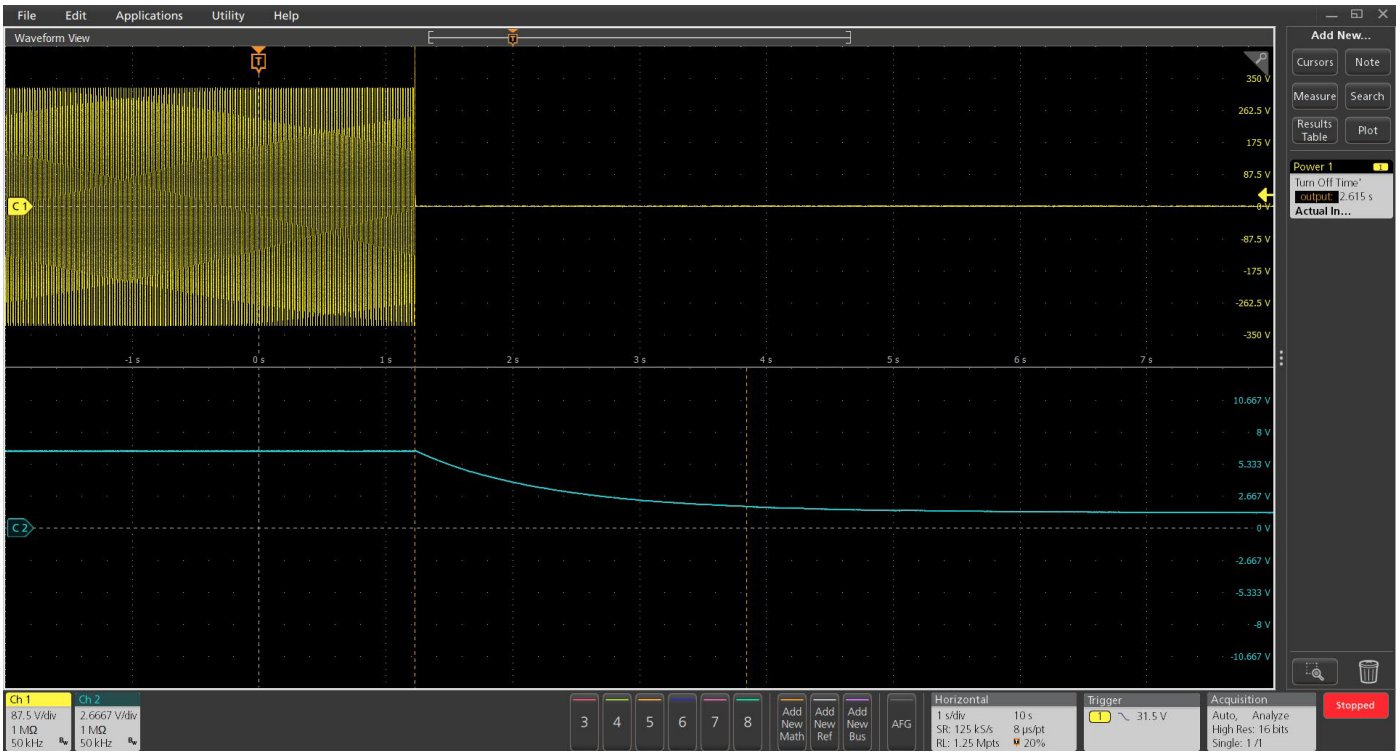


图 30.

关断时间

关断时间是移除输入电压后使电源的输出电压接近于零所需的时间。

交流 - 直流和直流 - 直流导通时间测量技术可扩展至验证多路输出电源的通电和断电顺序。

在导通和关断期间,电源输出的时序和顺序关系着最终产品是否能可靠运作，以及保证装置不间断正常运行。设计人员将会关注如何调整其终端装置，如 UPS 在指定时间内回到稳定状态。例如，电池充电后以连续的方式产生直流输出，而逆变器系统则连续充电至交流干线中。如果电源中断，则电池会为逆变器供电。关断时间很重要，这样电池才能在指定的时间内启动。

Power Measurements Report

Thursday October 26 2017 14:03:53

Setup Configuration

Scope Details

Scope Model Number	Scope Serial Number	TekScope Version	Scope Calibration Status
MSO58	PQ300015	1.4.6	Pass

Probe Details - CH1

Probe Type	Probe Serial Number	Probe Cal Status
THDP0100	C000079	Default

Probe Details - CH2

Probe Type	Probe Serial Number	Probe Cal Status
TCP0030A	C007426	Default

Power Measurement Summary Results

Power1 - PowerQuality'

Measurement	Source	Power Frequency	VRMS	IRMS	VCrest Factor	ICrest Factor	True Power	Reactive Power	Apparent Power	Power Factor	Phase Angle
Power Quality	Ch1 Ch2	103.9kHz	15.34V	224.9mA	1.288	2.454	293.2mW	3.436VAR	3.449VA	85.03m	- 85.12Degrees

Power2 - Harmonics'

Measurement	Source	Standard	Harmonics	F1 mag	F3 mag	THD-F	THD-R	IRMS
Harmonics	Ch1 Ch2	NONE	40	6.617A	893.4mA	70.7%	57.73%	15.25A

Power3 - CycleAmp'

Measurement	Source	Amplitude
Cycle Amplitude	Ch1	18.56V

Power4 - CyclePkPk'

Measurement	Source	Cycle Peak-to-Peak
Cycle Peak-to-Peak	Ch1	20.03V

Power5 - CycleTop'

Measurement	Source	Top
Cycle Top	Ch1	18.47V

Power6 - CycleMax'

Measurement	Source	Cycle Maximum
Cycle Maximum	Ch1	19.56V

Power7 - CycleBase'

Measurement	Source	Base
Cycle Base	Ch1	-92.16mV

Power8 - CycleMin'

Measurement	Source	Cycle Minimum
Cycle Minimum	Ch1	-471.1mV

Power9 - Period'

Measurement	Source	Period
Period	Ch1	9.626us

Power10 - Frequency'

图 31. 报告以 .MHT 或 .PDF 文件格式提供。

生成报告

数据采集、归档和文档管理通常是设计和开发过程中繁琐而又必要的任务。4/5/6-PWR 配有一个报告生成工具，在实践中可以轻松编制测量结果文档。

通过使用示波器的“Save as”(另存为)功能，可以生成、并在示波器屏幕上显示指定布局的报告成品。

小结

通过结合使用 4/5/6-PWR 应用与 5 系列 MSO 示波器，工程师可以迅速进行准确的、可重复的测量，而且设置时间非常短。最重要的是，他们不需要进行手动计算，示波器应用完成了计算工作。通过使用截图和报告，工程师可以简便地提供仪器设置方式、波形和测量结果等完整的文档。

哪款探头适合您的应用?

在与适当的功率探头相结合时，4 系列 B MSO 示波器实现了最好的功率测量性能。4 系列 B MSO 配有 TekVPI 探头接口，在示波器和探头之间实现通信。如需了解具体推荐型号的差分探头和电流探头，包括 IsoVu 隔离探头和 Rogowski 探头及必要的探头转接头，敬请参阅 www.tek.com.cn/accessories

探头类型	说明	
高压差分探头	THDP0100/THDP0200/TMDP0200 高压差分探头是进行通用非参考地电平、浮动测量的最佳选择。这些探头提供了高达 200MHz 的带宽和高达 6000 V 的电压范围。	
	P5200A/P5202A/P5205A/P5210A 高压差分探头是进行非参考地电平、浮动或隔离测量的完美选择。这些探头提供了高达 100 MHz 的带宽和高达 5600 V 的电压范围。	
电源轨探头	TPR1000 和 TPR4000 电源轨探头可提供低噪声、低负载、高带宽和高达 60V 的直流偏移，专门用于测量电源完整性。	

探头类型		
光隔离差分探头	TIVP 光隔离差分探头是准确地解析高带宽差分信号的最佳选择，为测试宽带隙设计提供了理想的解决方案。探头分成 2 米和 10 米 两种长度。 TIVP1 提供了 1GHz 带宽，在存在最高 60kV 的共模电压时，可以测量最高 ±2500Vpk 的 差分信号。TIVP05 和 TIVP02 分别提供了 500MHz 和 200MHz 的带宽，在存在最高 60kV 的共模电压时，可以测量最高 ±2500Vpk 的差分信号。	
电流探头	泰克提供了各种电流探头，包括 AC/DC 电流探头，实现了最高 120 MHz 的带宽及最低 1mA 的同类最优秀的电流钳夹灵敏度。	
	仅 ACRogowski 探头包括 TRCP300（9Hz~30MHz,250 mA~300A 峰值），TRCP600（12Hz~30MHz,500mA ~600A 峰值）和 TRCP3000（1Hz~16MHz,500mA~3000A 峰值）。	
中压差分探头	TDP0500/TDP1000 中压差分探头为进行非参考地电平、浮动或隔离测量提供了最佳选择。这些探头提供了高达 1 GHz 的带宽和高达 ±42V（DC+ 峰值 AC）的电压范围。	