

優化電源完整性測試

Raymond 曾國鈞
技術經理



這些設備都離不開電源

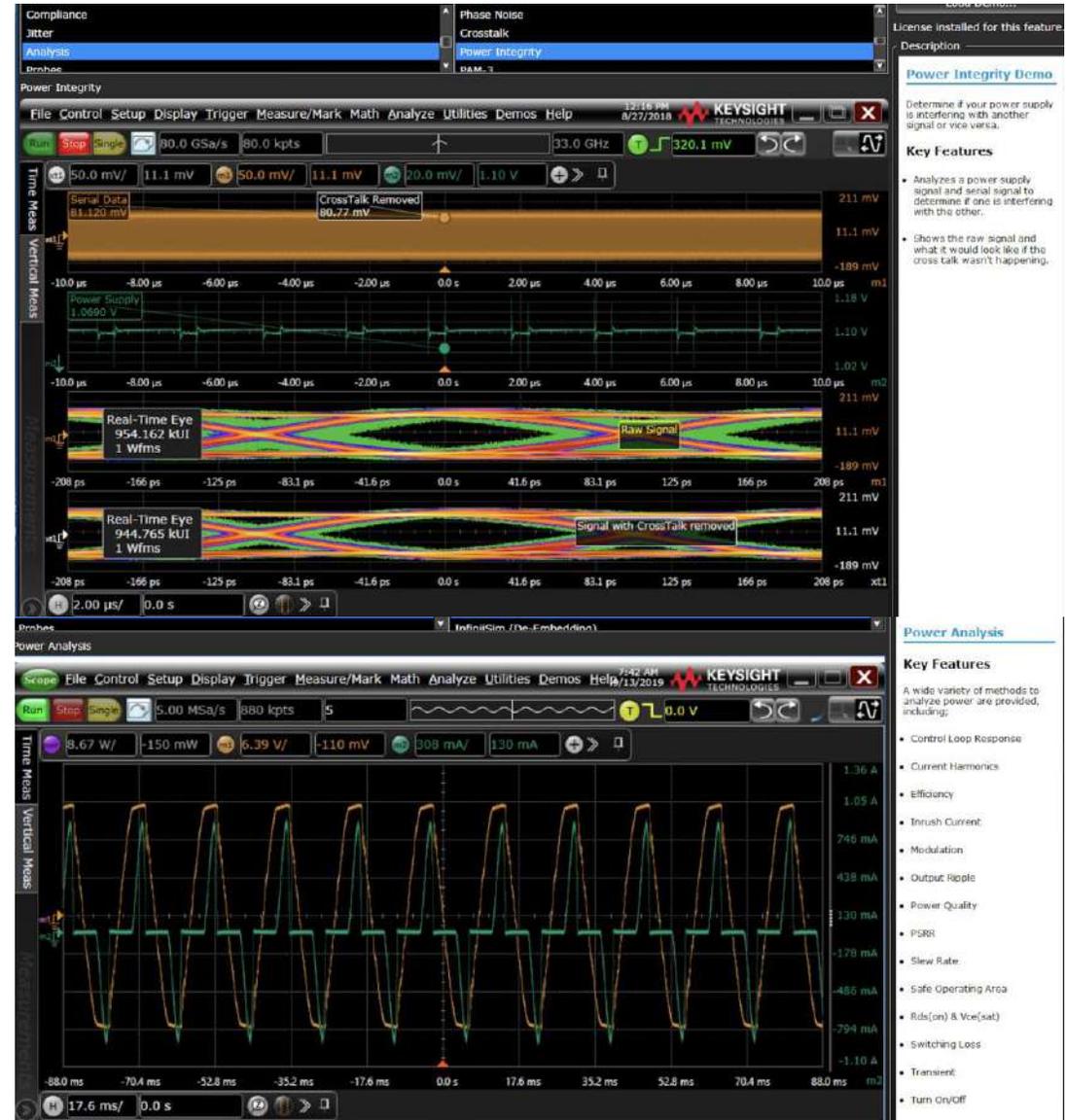
電源轉換技術用於我們社會的各種行業



內容大綱

一切為了排除設計中的問題

- 開關電源常規測試專案:
 - 輸入端測試
 - 開關器件測試
 - 輸出端測試
- 熱點問題
 - 如何有效快速重現 issue
 - 開關器件 DS 電壓測試
 - 開關電源控制環路分析
 - EMI 問題調試
- 電源完整性測試要求



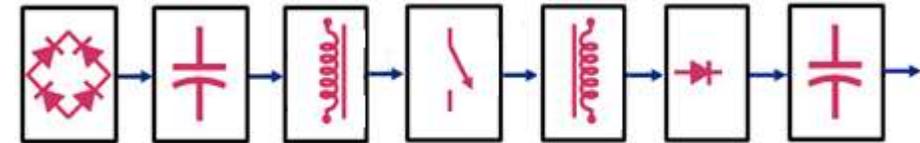
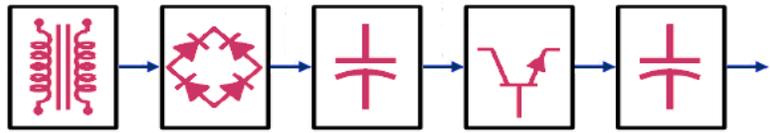
電源基礎

電力電子中所處的角色和發揮的作用

- 提高轉換效率
- 提高功率密度
- 提高可靠性
- 控制 EMI; 符合 EMC要求
- 提高輸出電源完整性
- 減少熱損耗
- 降低成本

電源的“職責”：從輸出端產生穩定的低雜訊的電壓輸出

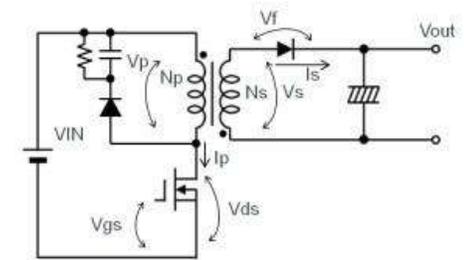
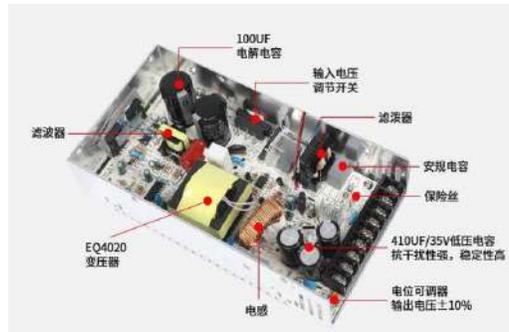
電源的種類：線性電源(series-pass) 和 開關電源 (SMPS)



開關電源 (SMPS)

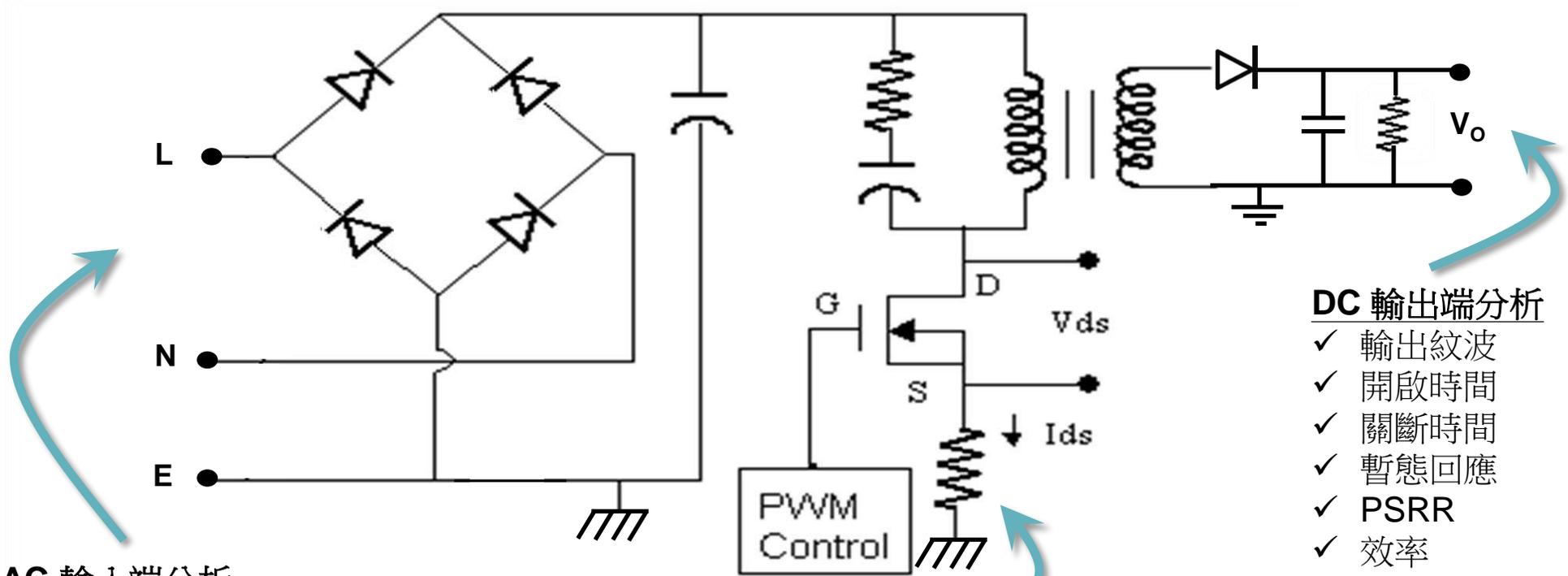
電晶體工作在開/關/開/關的狀態，開關頻率通常在 20 – 200kHz

- + 效率更高
- + 功率密度更高
- + 可做降壓也可升壓
- 調變產生更多紋波和雜訊



開關電源測試與量測

電源測試的主項目



AC 輸入端分析

- ✓ 電源品質
- ✓ 電流諧波
- ✓ 浪湧電流

開關器件分析

- ✓ 功率/能量損耗
- ✓ 調變分析
- ✓ di/dt, dv/dt分析
- ✓ SOA安全工作區

DC 輸出端分析

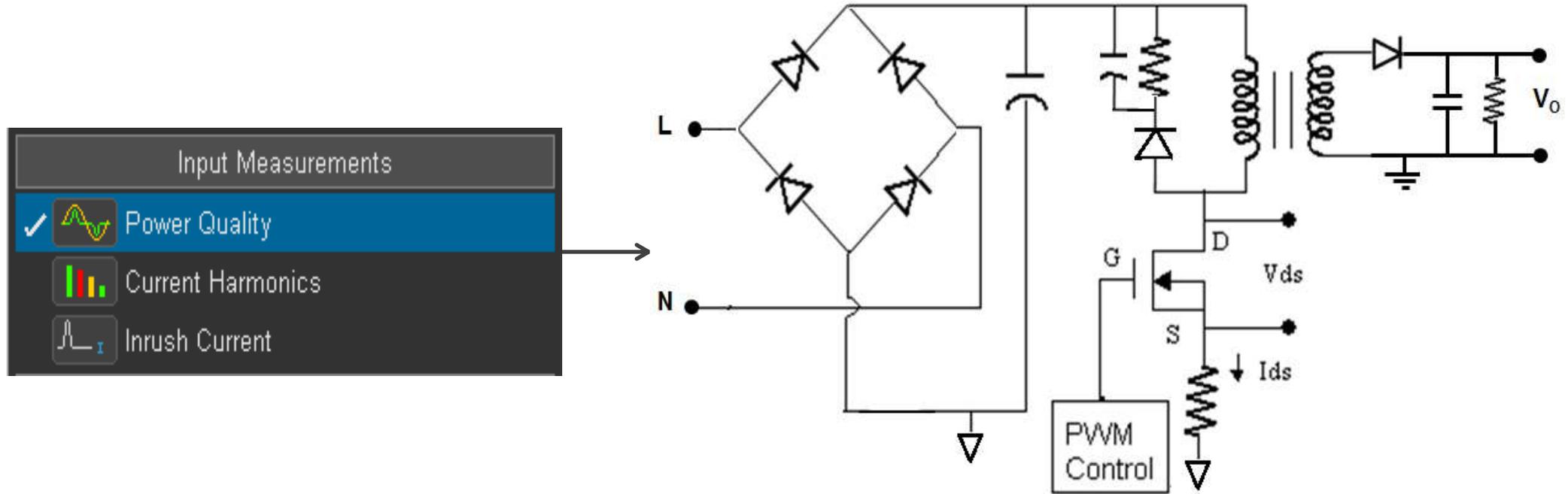
- ✓ 輸出紋波
- ✓ 開啟時間
- ✓ 關斷時間
- ✓ 暫態回應
- ✓ PSRR
- ✓ 效率

頻響分析

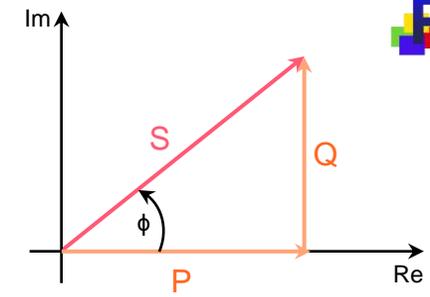
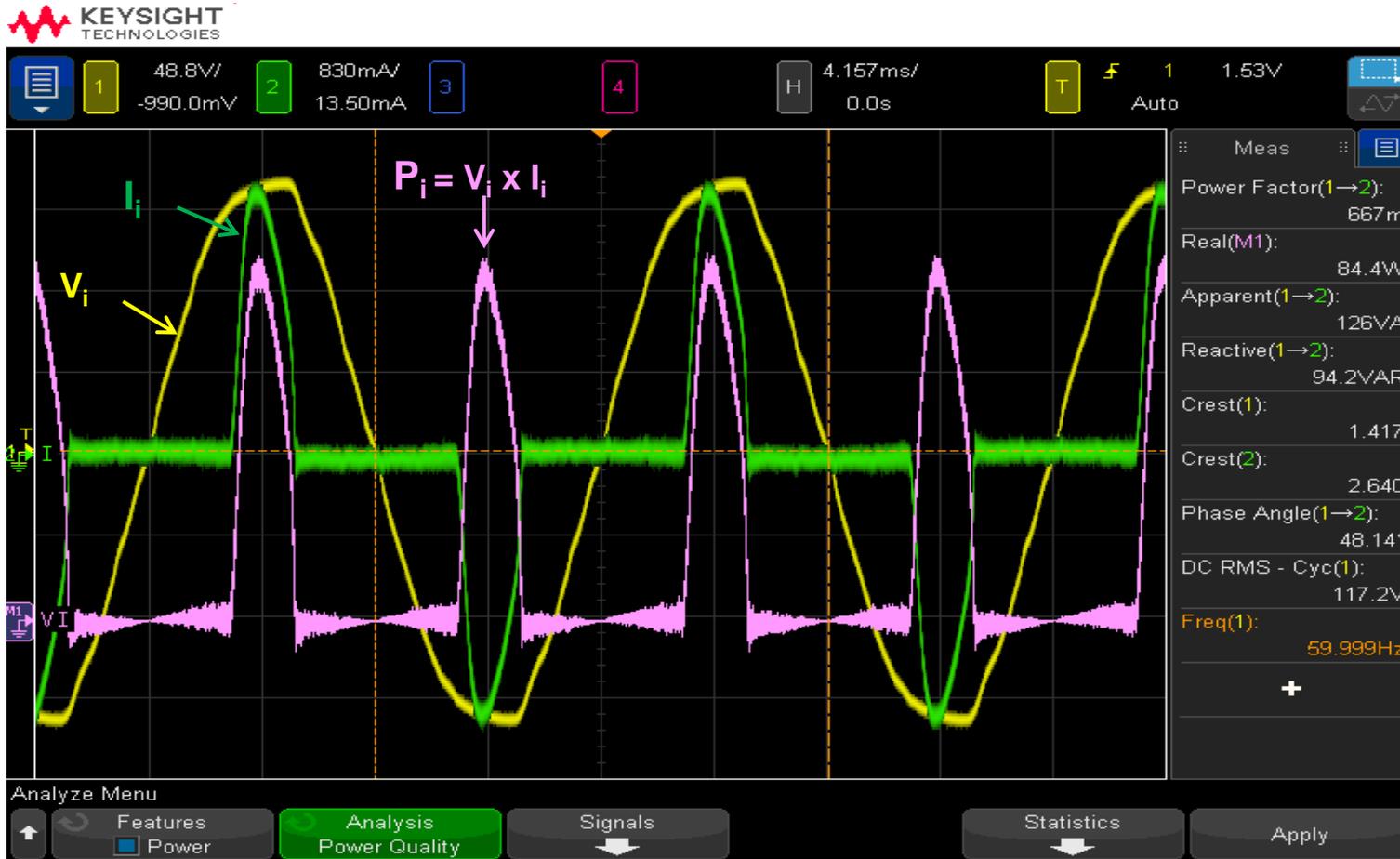
- ✓ 電源紋波抑制比 (PSRR)
- ✓ 控制環路回應 (BODE)

輸入端分析

- 電源品質: 實際功率, 無效功率, 視在功率, 相位角, 功率因素, 波峰因數
- 電流諧波: Pass/fail 測試, 最高 40次諧波 (IEC 61000-3-2, RTCA DO-160E)
- 浪湧電流: 當開關電源第一次開啟時, 測試開機瞬態電流



輸入端測試: 電源品質



P (實際功率) = P_i over N cycles

S (視在功率) = $V_{RMS} \times I_{RMS}$ over N Cycles

PF(功率因素) = P/S

Q (無效功率) = $S \times \sin(\phi)$

CF_V (波峰因數) = V_{PK} / V_{RMS}

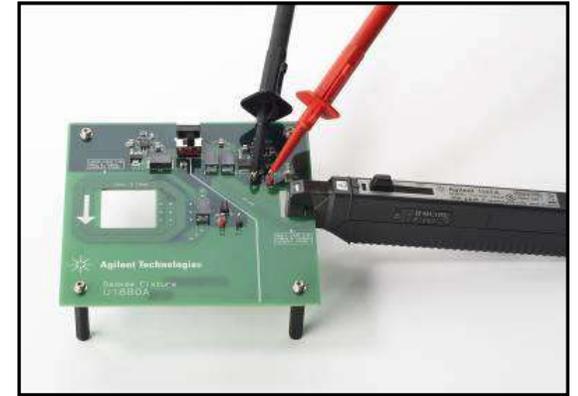
CF_I (波峰因數) = I_{PK} / I_{RMS}

ϕ (相位角) = $\text{ACOS}(P/S)$

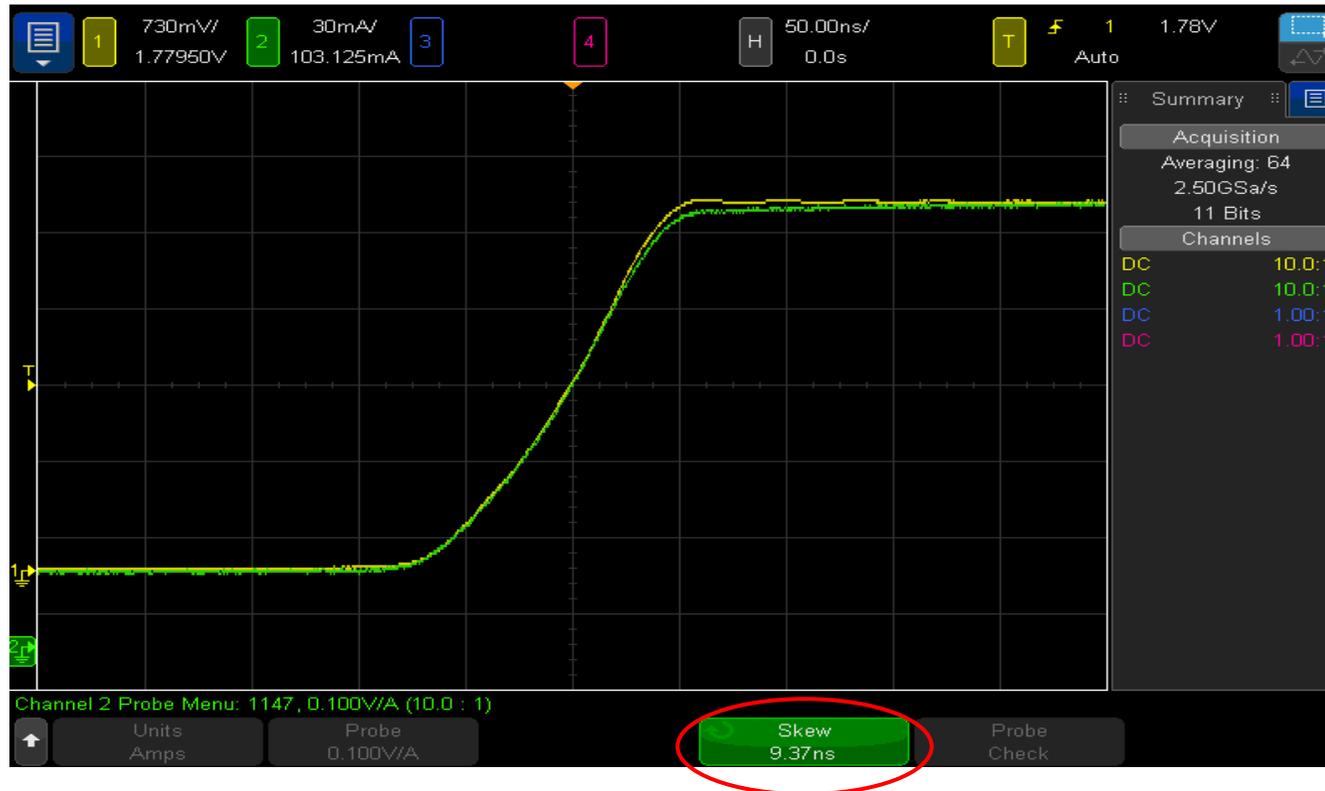
- 電壓探棒: 量測 $240V_{RMS}$ 電壓需要高壓差動探棒, 測試範圍大約 $700V_{pp}$.
- 電流探棒: 典型的電流探棒為霍爾感應式電流探棒.

電壓/電流探棒時延校準

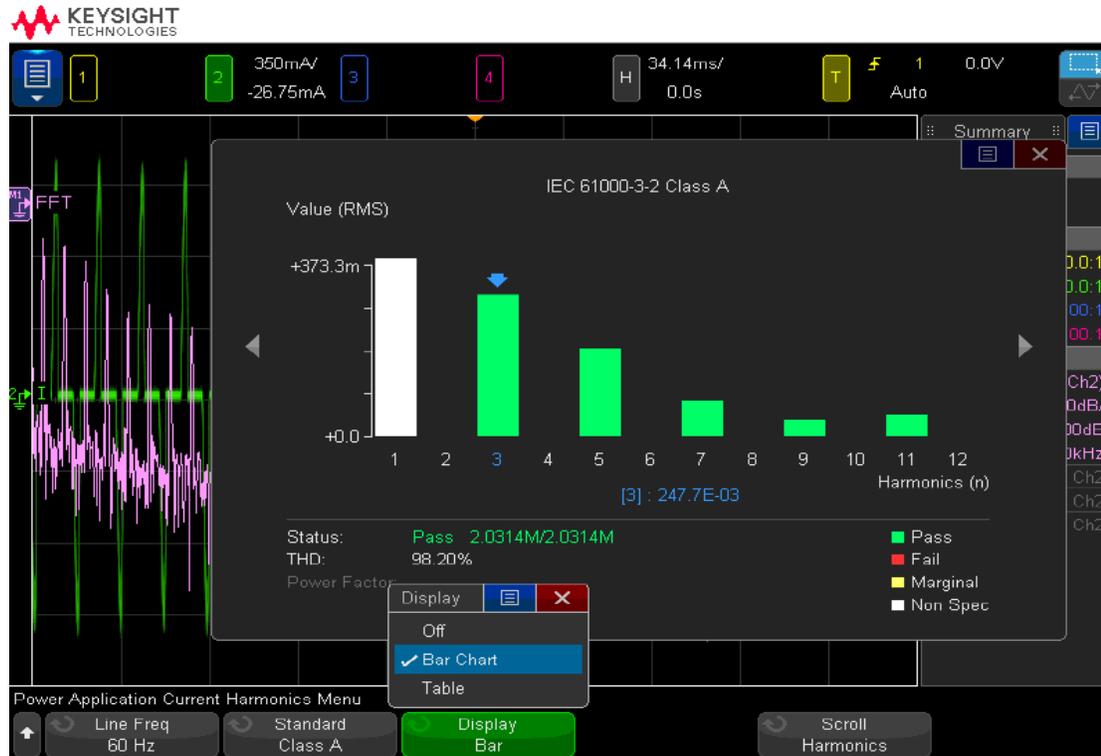
- 功率評估需要同時進行電壓和電流的精確量測
- 電壓/電流通道(V*I)的時延校正對於精確的功率量測非常重要
- U1880A 時延校準夾具和功率分析套裝軟體配合使用, 可以對電壓/電流探棒做自動時延校準, 以提高功率損耗測試的精準度.



校準後!



輸入端量測:電流諧波



- 對電流波形做 FFT 分析.
- 按照 IEC61000-3-2 (A, B, C, D)標準比對FFT波形的奇次/偶次諧波幅度
- 量測最多 40th諧波
- 提供每個諧波 Pass/Fail 自動提示
- 顯示方式可以在圖表顯示/長條圖顯示方式切換

表 1

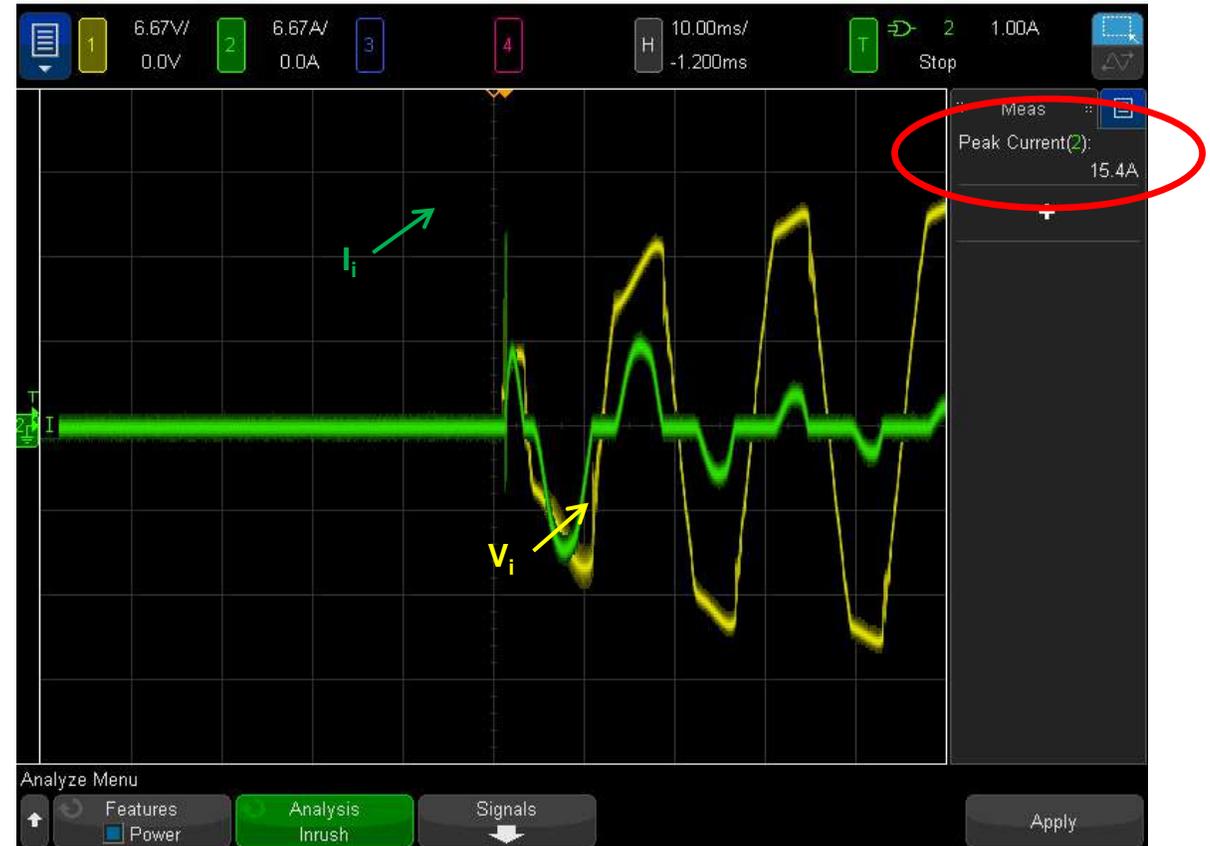
EN61000-3-02 标准	范围
A 类	平衡三相设备、家用电器、工具，不包括便携式工具、白炽灯的调光器、音频设备
B 类	便携式工具、电弧焊接设备 (非专业电焊机)
C 类	照明设备
D 类	个人计算机和显示器，驱动功率小于或等于 600W

- 支援 RTCA DO-160E 航空電源標準.
- 支援 50/60/400Hz 工頻電流

輸入端量測:浪湧電流

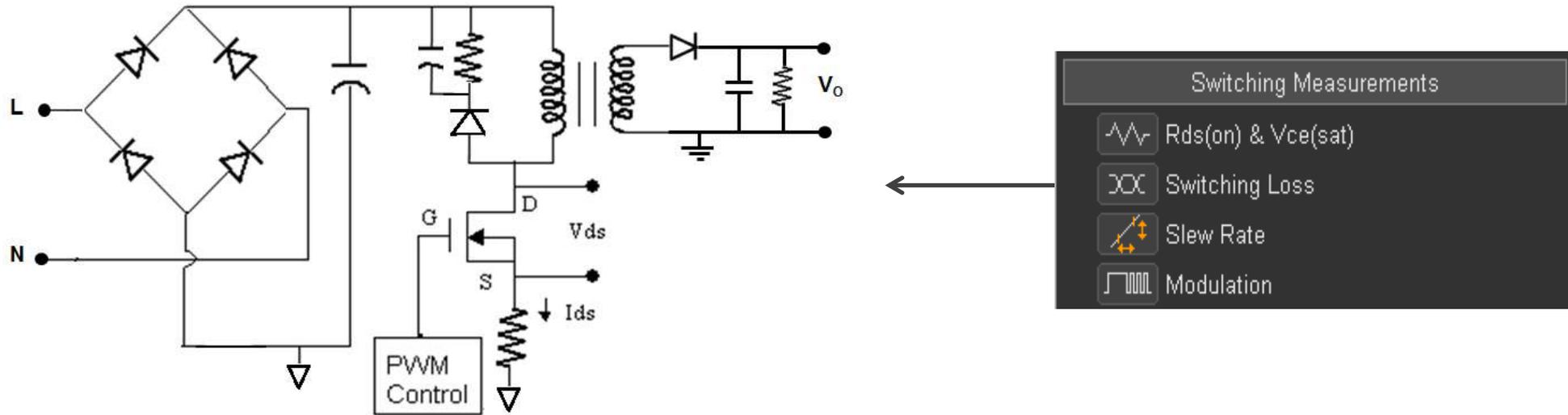
量測實例:

- 當電源初次開機時, 輸入端的濾波電容相當於瞬間短路, 會產生一個很快上升時間的衝擊電流.
- 示波器設置為 “峰值檢測” 模式, 同時做單次捕獲.
- 觸發第一個邊沿(可以是電流或電壓波形的上升沿或下降沿).
- 示波器量測電流的峰值幅度.



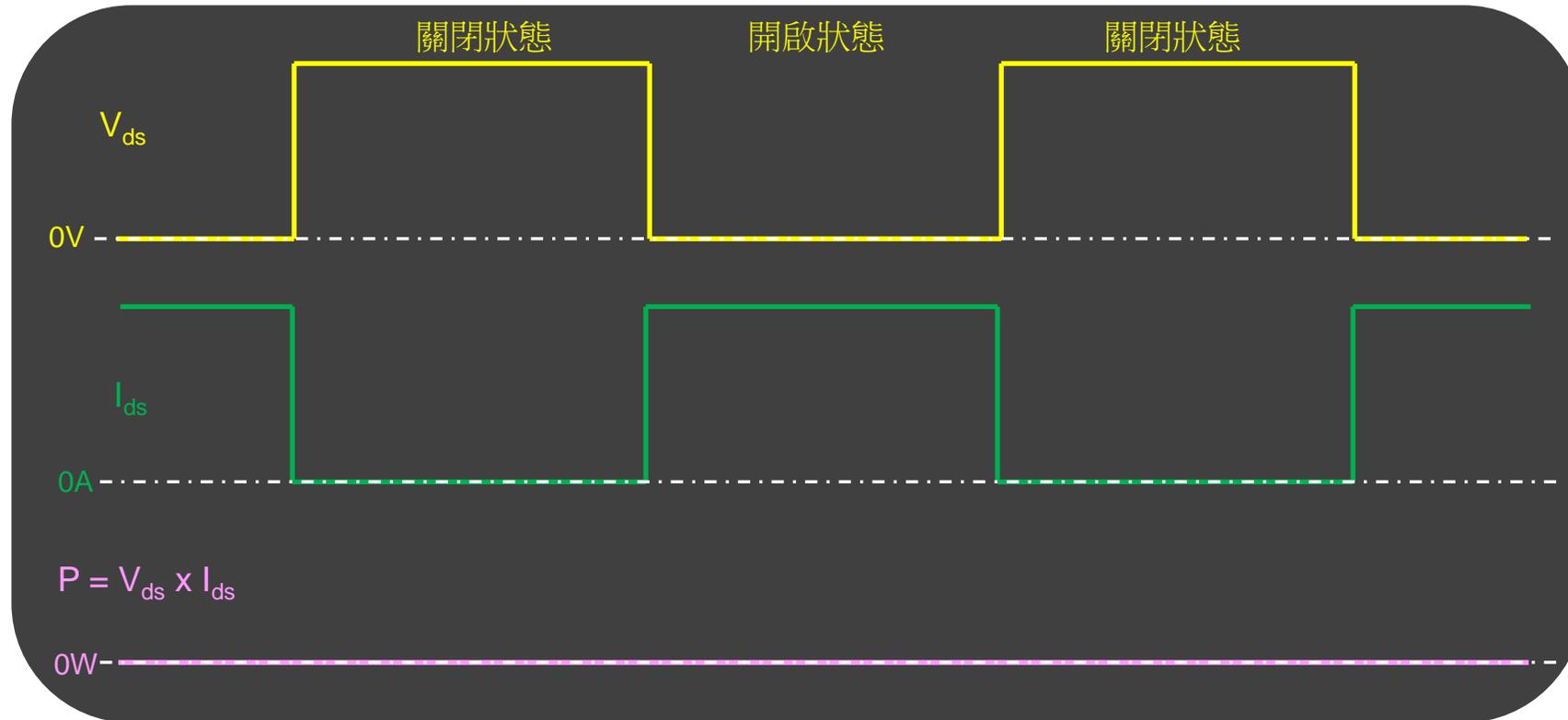
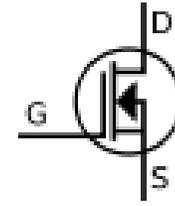
開關器件分析

- **開關損耗**: 量測一個開關週期內的功率/能量損耗.
- **Rds(on) 導通電阻**: 量測功率器件 FET 在導通階段的有效電阻.
- **dI/dt, dV/dt 測試**: 測試電流/電壓信號瞬間變化速率.
- **調變分析**: 測試電壓信號的占空比或頻率隨時間變化的趨勢圖.



開關器件分析：開關損耗

理想世界



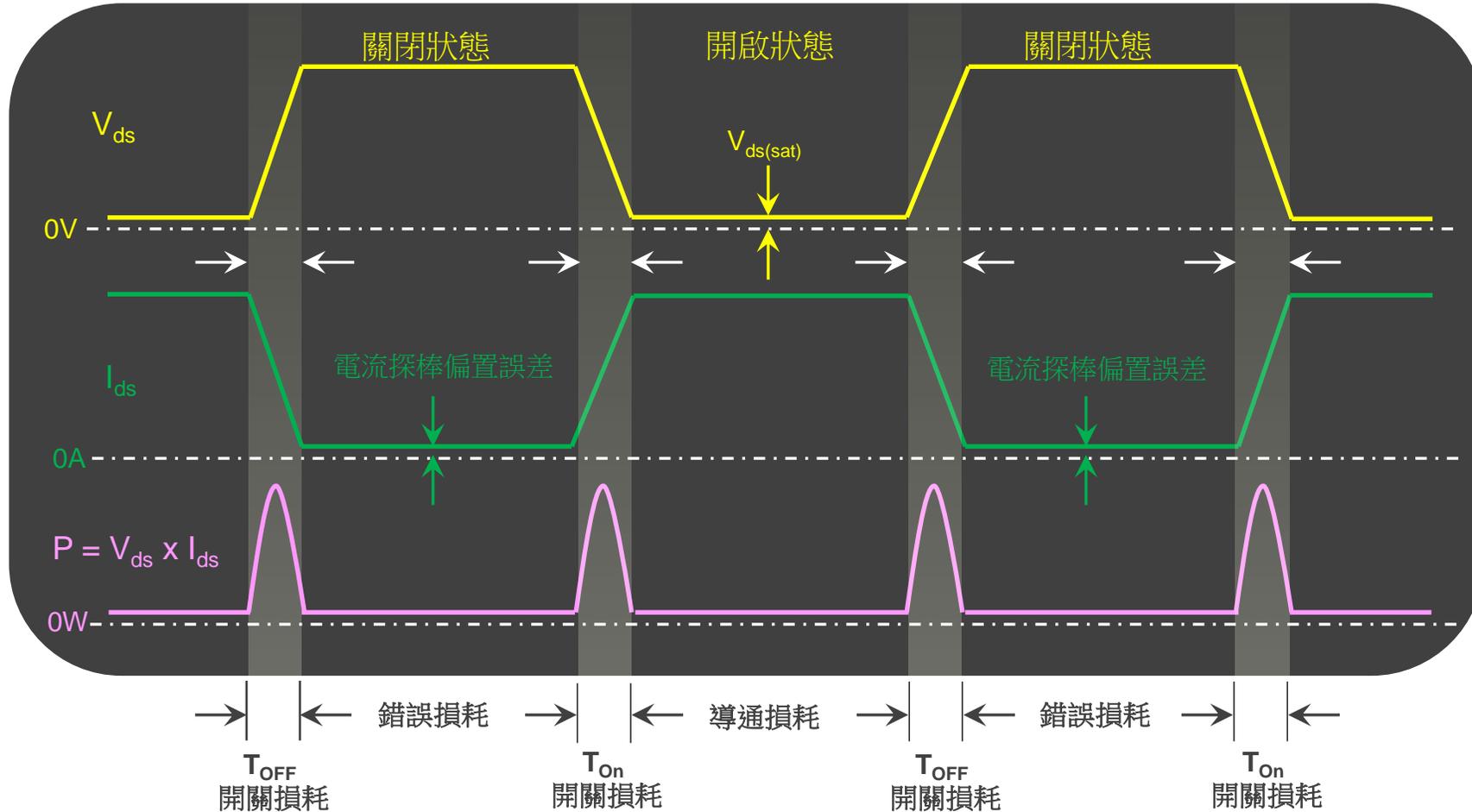
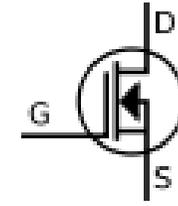
$$\text{開啟狀態損耗 (導通階段)} = I_{ds} \times 0 = 0W$$

$$\text{關閉狀態損耗 (關斷階段)} = V_{ds} \times 0 = 0W$$

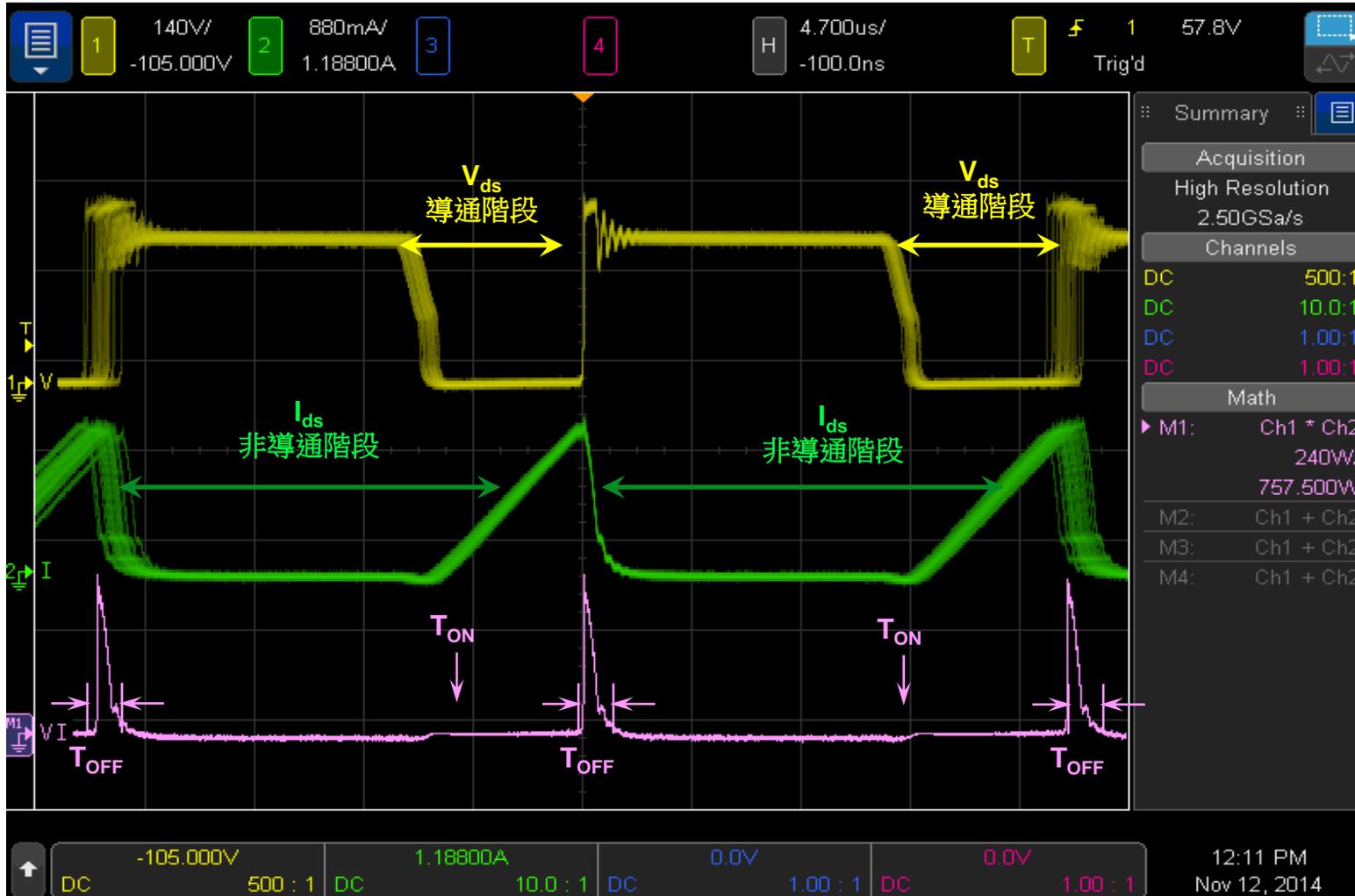
$$\text{總體損耗} = 0W$$

開關器件分析：開關損耗

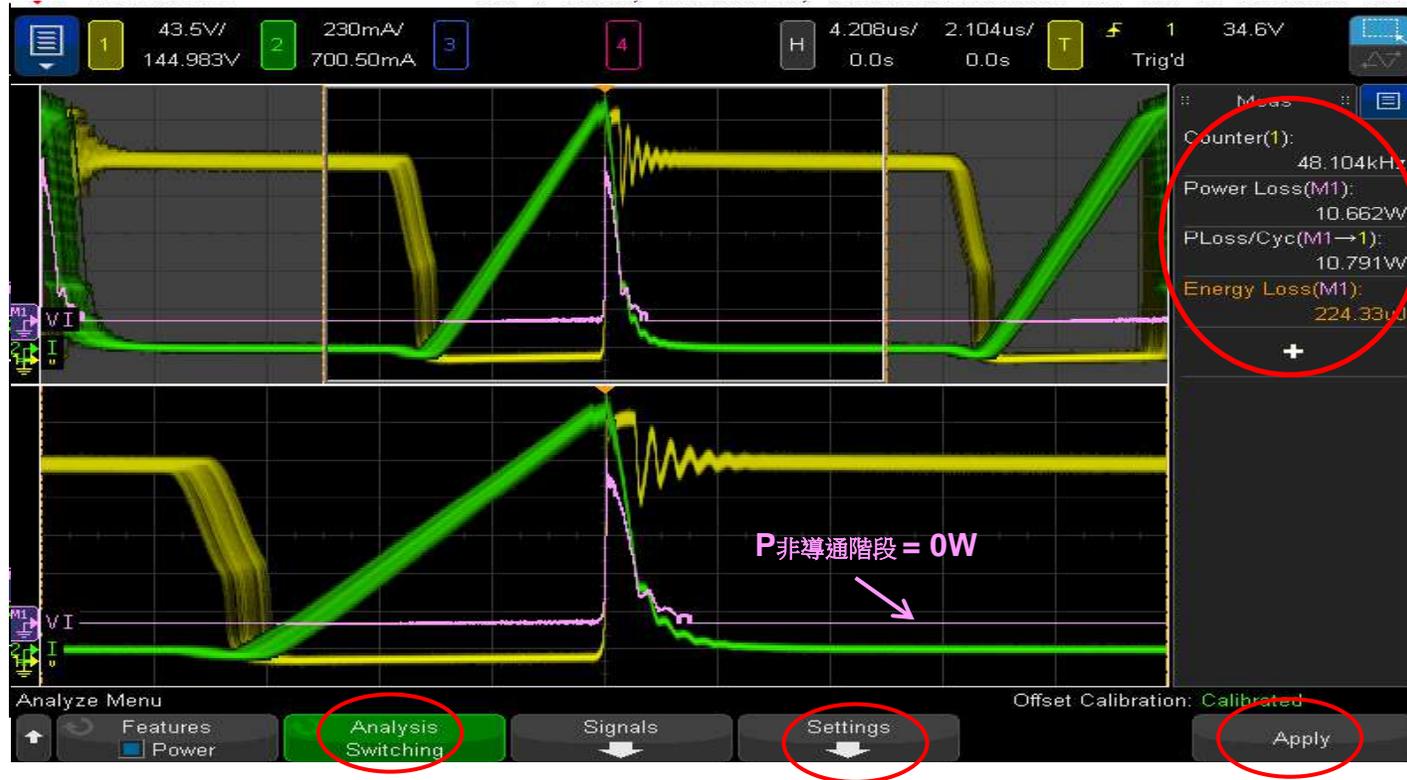
現實世界



開關器件分析:不同的工作階段

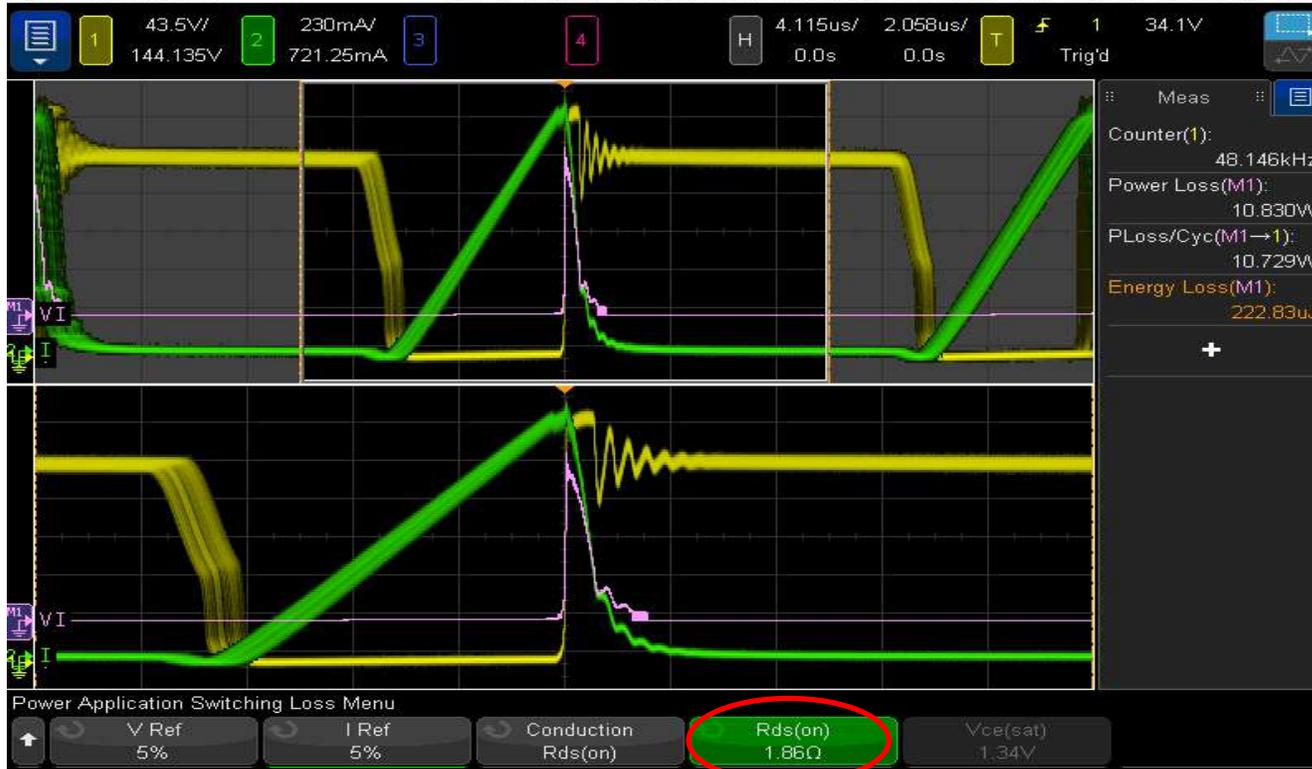


開關器件分析:開關器件功率損耗



- 探棒時延校準可以提高損耗測試精準度.
- 零偏置校準可以提高損耗測試精準度.
- 示波器量測一個開關週期內的能量損耗.
- 通過局部放大可以測試開關週期不同階段的損耗.

開關器件分析:導通電阻



- 示波器量測導通階段的平均電壓 (V_{avg})和平均電流(I_{avg}).
- 導通電阻 $R_{ds(on)} = V_{avg}/I_{avg}$

- 選擇“使用”導通電阻 $R_{ds(on)}$ 量測損耗
- 不同階段功率損耗計算公式:
 - ✓ 導通損耗 = $I^2 R_{ds}$
 - ✓ T_{off} 關斷損耗和 T_{on} 開啟損耗 = $V \times I$
 - ✓ 非導通損耗 = $V \times 0 = 0$

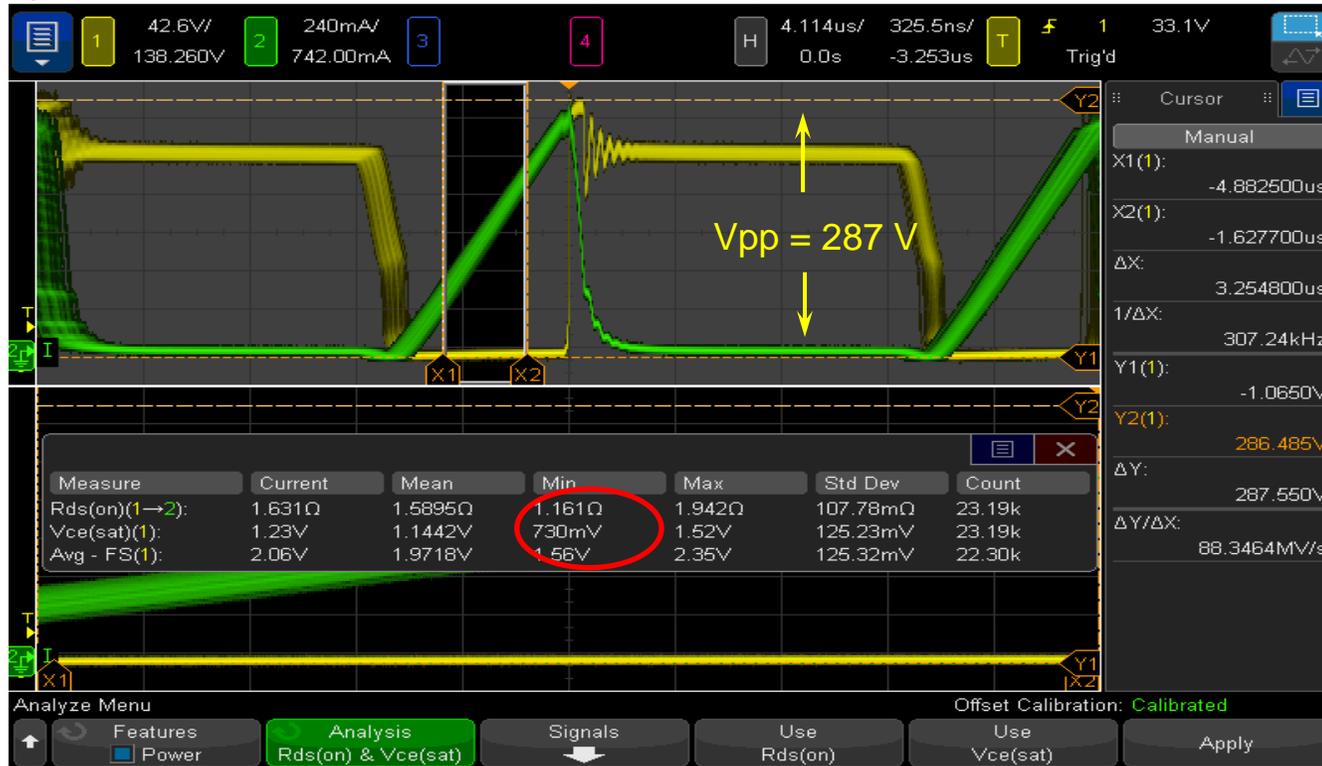
開關器件分析:導通損耗及 Toff關斷損耗

通過局部放大去測試不同階段的損耗

關斷階段損耗



開關器件分析:導通階段電壓 V_{導通}測試誤差來源



- 直覺: 最主要的量測誤差來自於示波器的解析度.
- 實際: 最主要的量測誤差 = 示波器/探棒偏置/位置錯誤.
- 典型探棒偏置/位置錯誤: ± 0.1 divisions
- 例子: 如果示波器檔位設為 40V/格, 那麼誤差 = ± 4.0 V

開關器件分析: $di/dt, dV/dt$ 量測

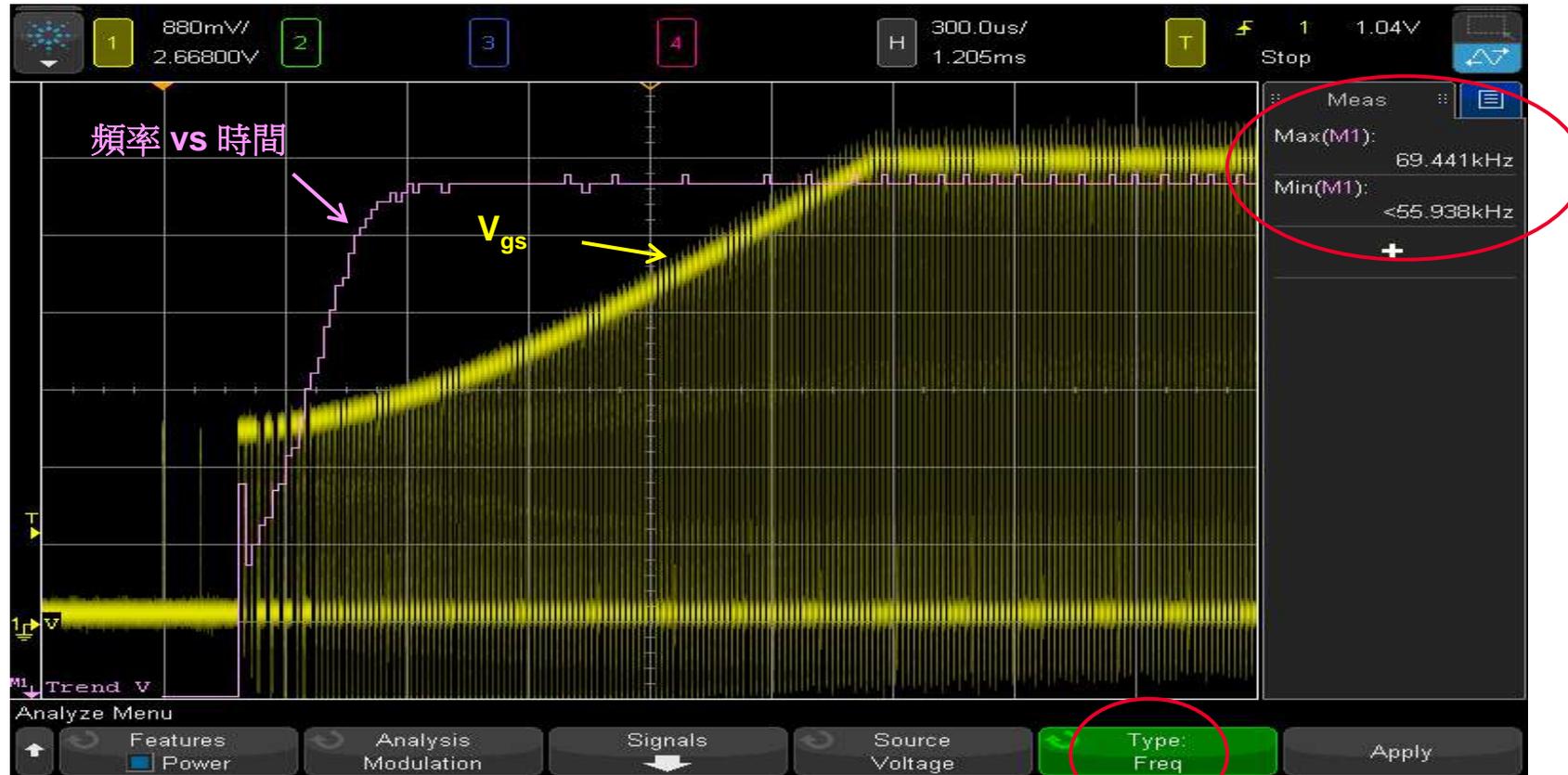
使用示波器的高級數學運算功能量測開關階段 V_{ds} 和 I_{ds} 波形的最大/最小斜率



電壓信號最大斜率

開關器件分析:調變分析

V_{gs} 電壓隨時間變化的趨勢圖

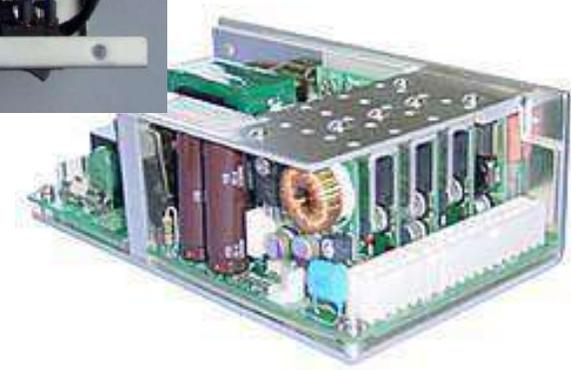
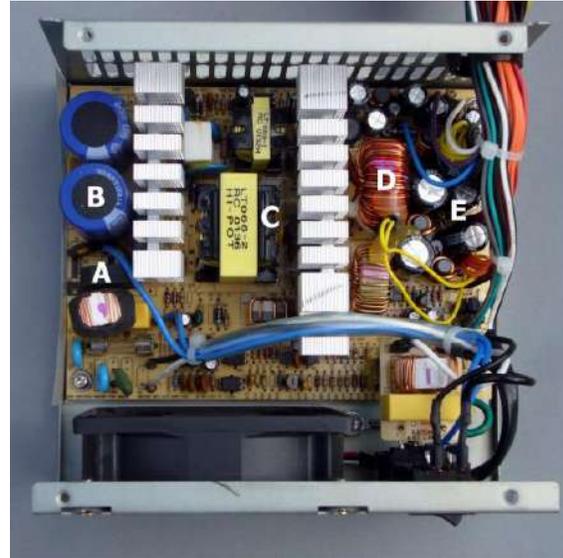


V_{gs} 頻率 vs 時間 @ 起始位置

開關器件在設計上的妥協

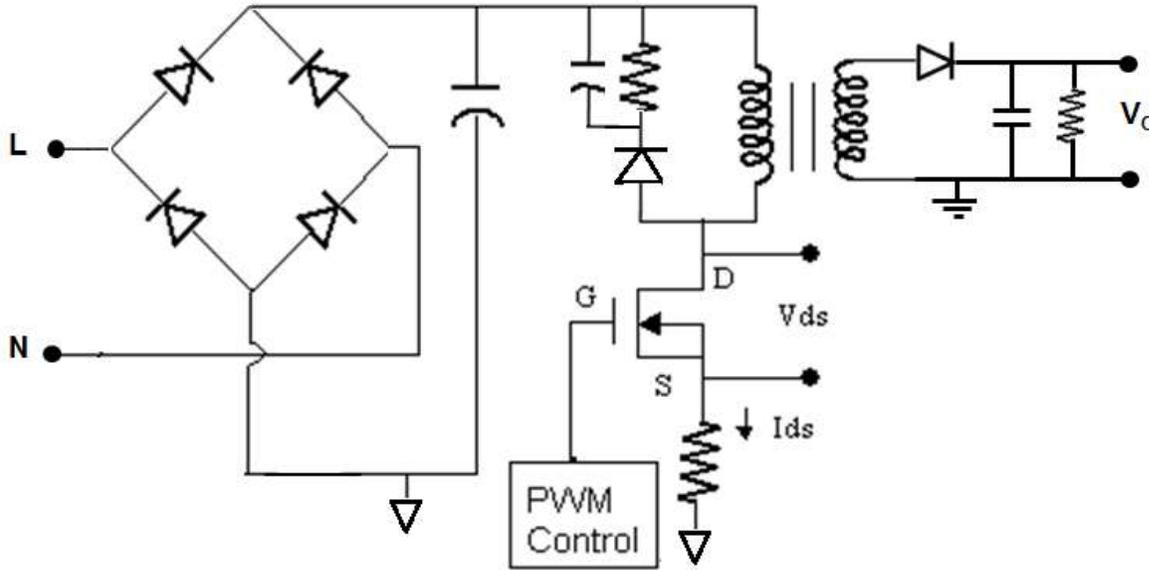
妥協例子:

- 更快的開關頻率:
 - + 設備體積更小
 - + 更高的密度
 - + 更低的成本
 - 更大的 T_{on} 和 T_{off} 開關損耗
- 選用更快上升/下降沿的開關器件:
 - + 更小 T_{on} and T_{off} 開關損耗
 - 更大的輸出紋波
 - 更多的EMI
 - 更高的費用



輸出端分析

- 紋波量測: 輸出電壓的紋波
- 開啟/關斷回應時間: 穩定電壓輸出與開啟/關斷的時間關係
- 暫態回應: 電壓輸出對負載變化的回應時間
- PSRR: 電源輸出紋波抑制比
- 效率: 電源的轉換效率

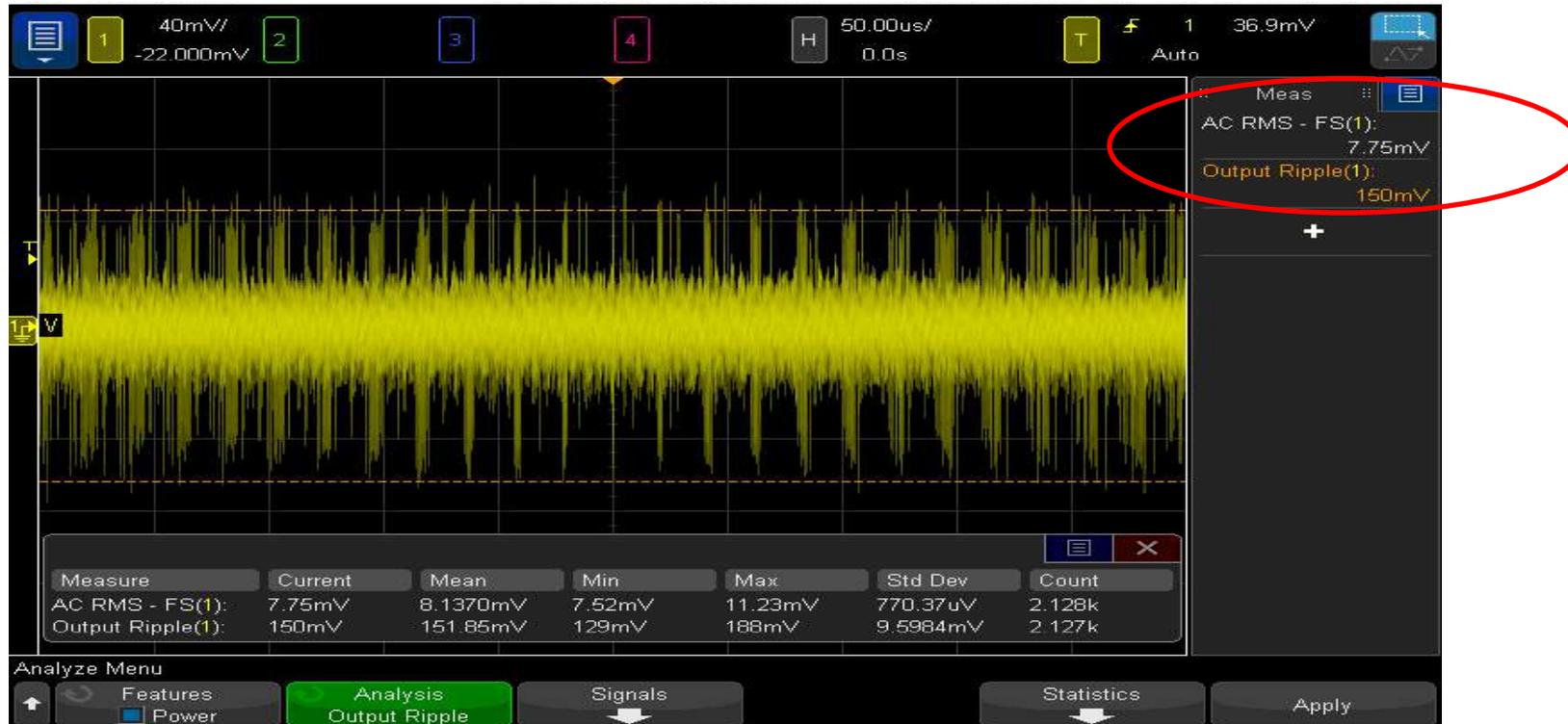


Output Measurements

- Output Ripple
- Turn On/Turn Off
- Transient Response
- Power Supply Rejection Ratio (PSRR)
- Efficiency

輸出端分析: 紋波和雜訊

電源完整性

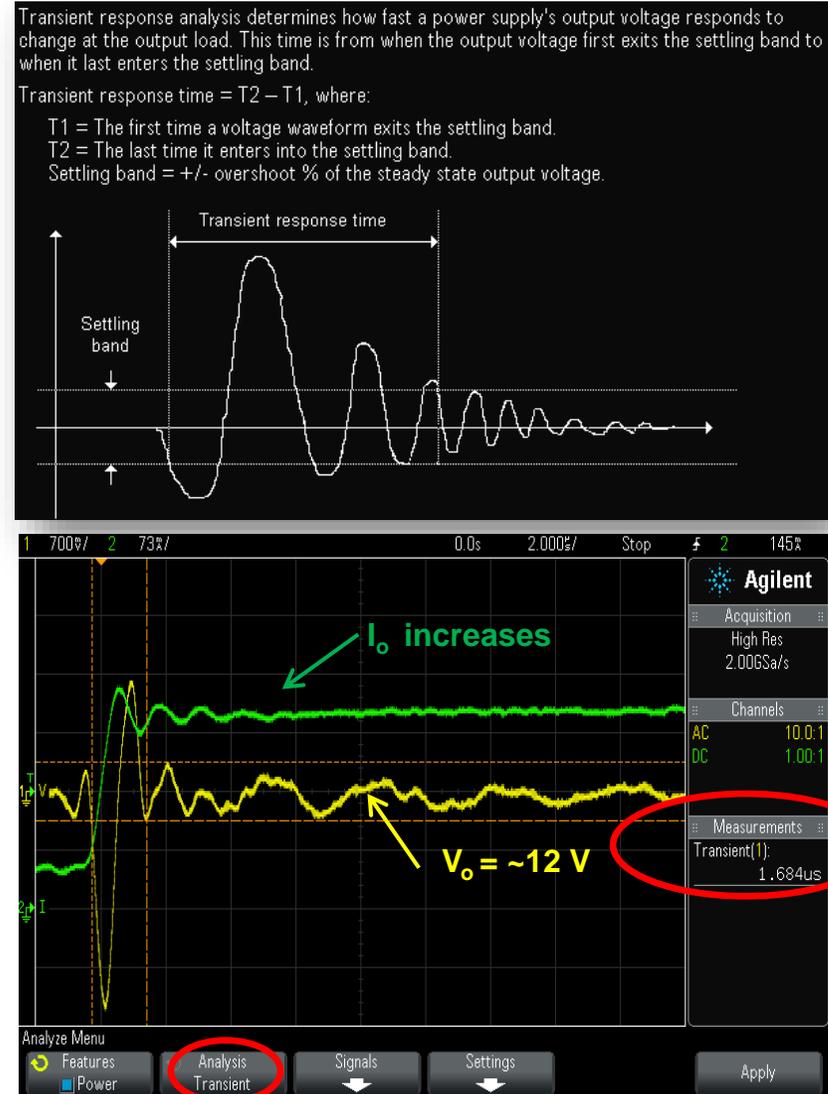


- 不同探棒及探測方法的差別
- 對於低電壓/低紋波輸出做測試,通常需要用 1:1 衰減倍數的探棒
- 示波器設置為 AC 耦合
- 示波器量測 Vpp 和 Vrms

輸出端分析：暫態回應

量測例子：

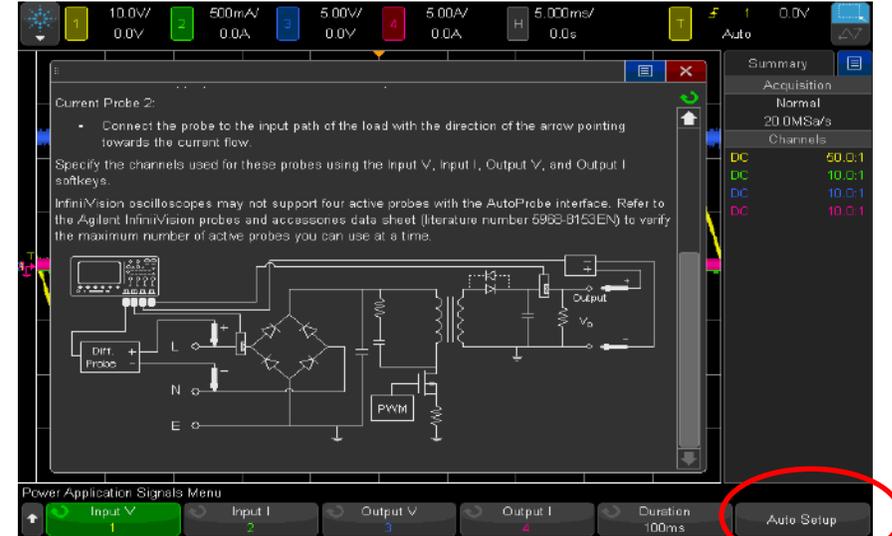
- 用戶設置輸出電流的近似高值及低。
- 使用者輸入穩定工作時的輸出電壓值，同時設置臨界值% (過沖/欠沖)。
- 示波器以電流的跳變作為觸發條件。
- 示波器量測電流突變時電壓從穩定到變化再到穩定的時間。



輸出端分析： 電源效率

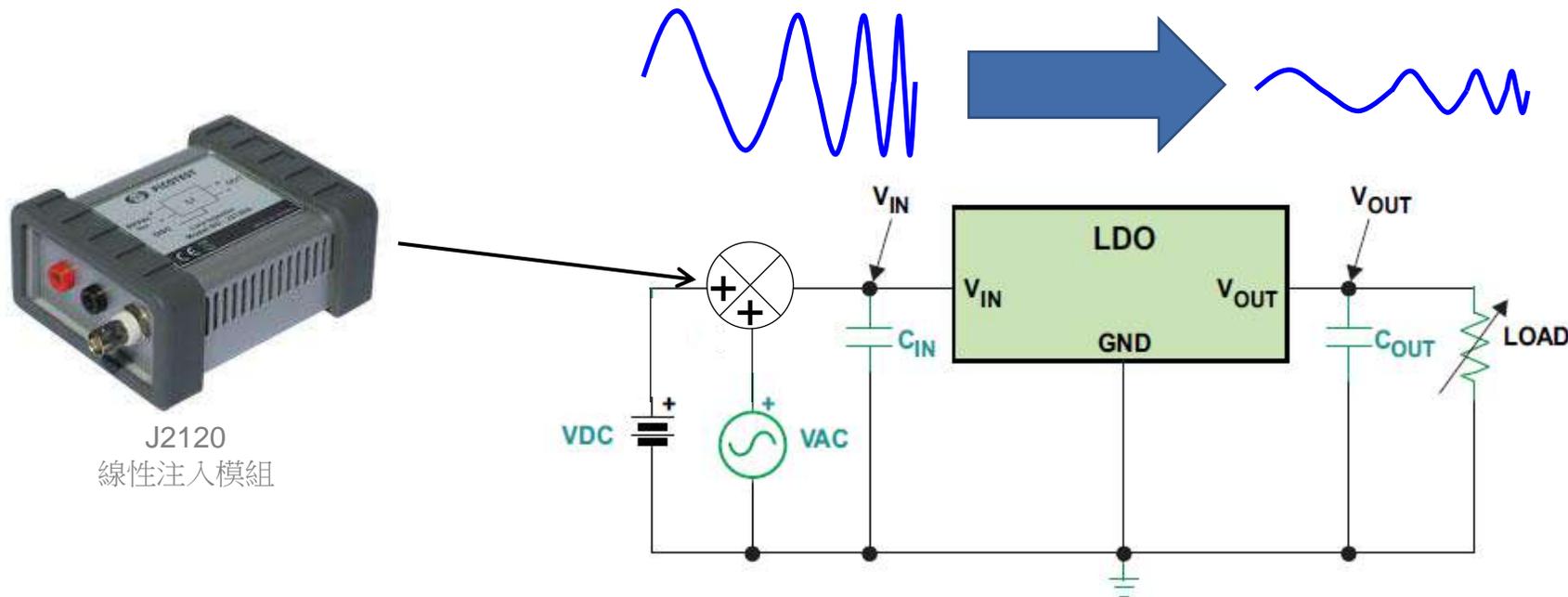
量測例子：

- 用戶選擇效率測試的類型 (AC-DC, AC-AC, DC-AC, DC-DC).
- 示波器測試輸入端的有功功率.
- 示波器測是輸出端的有功功率.
- 示波器計算出效率 (P_o/P_i).



輸出端分析：電源紋波抑制比 (PSRR)

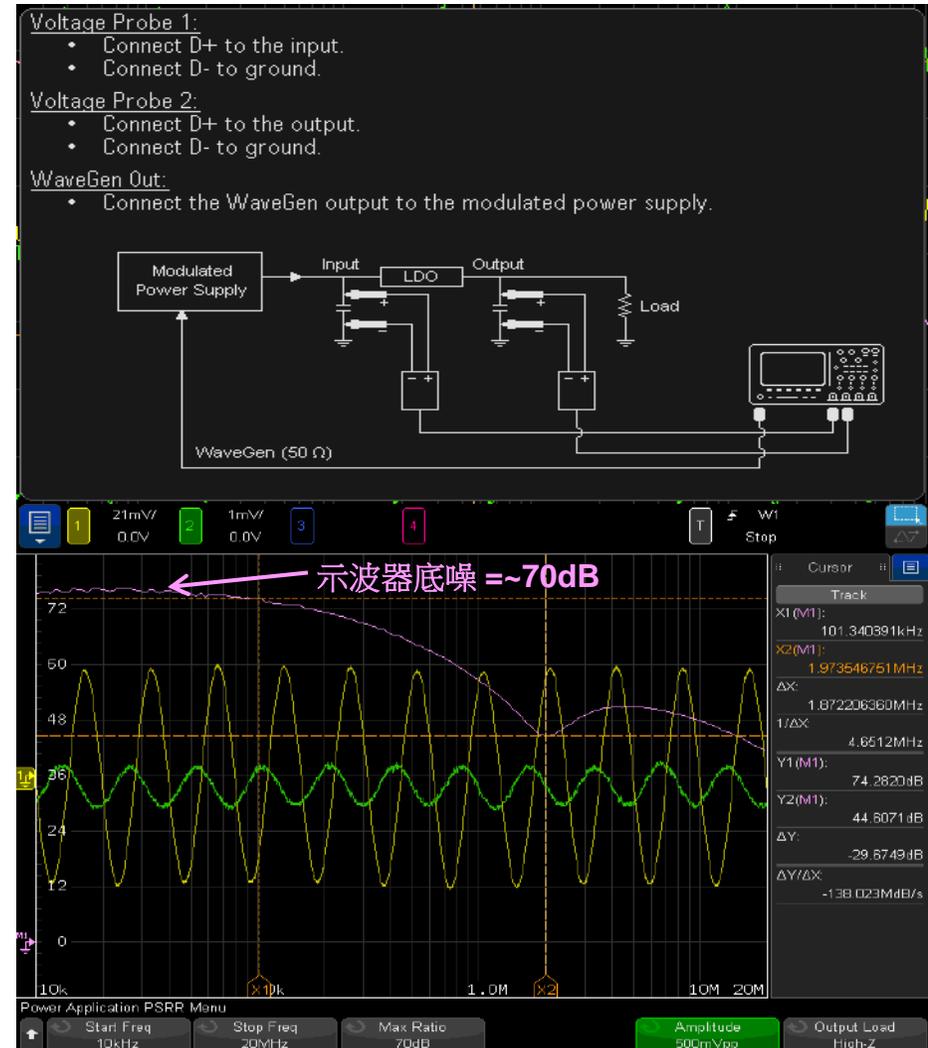
- **PSRR**: 可以量測 DC-DC 電源, 電壓調節器, LDO 線性穩壓器等設備在不同頻段對紋波/雜訊的抑制能力
- **PSRR** = $20 \text{ Log } (v_i/v_o)$, v_i 和 v_o 只包含交流成分



輸出端分析：電源輸出紋波抑制比 (PSRR)

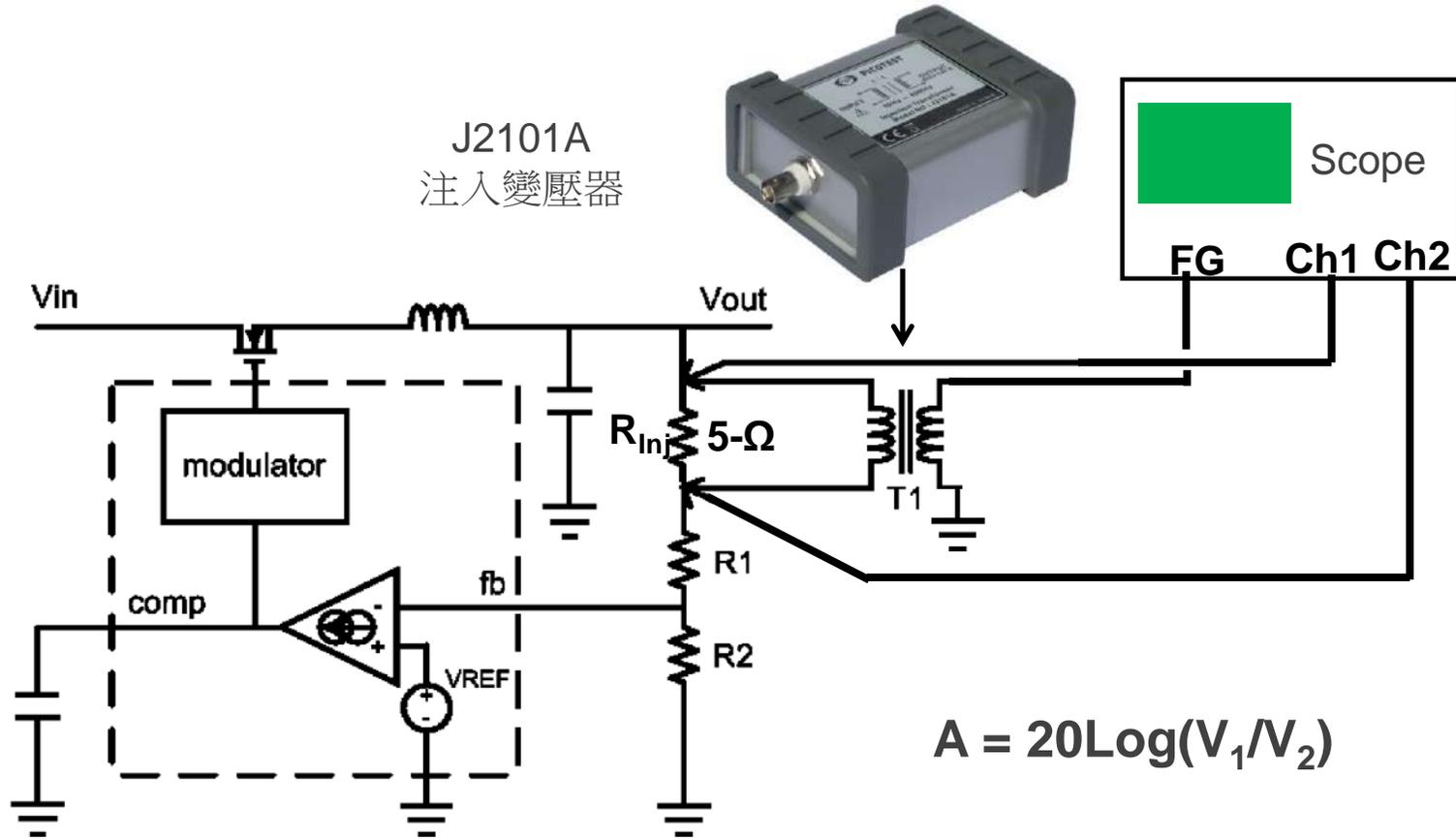
量測例子：

- 使用1:1 量測輸出電壓 V_o
- 輸入頻率範圍
- 輸入測試信號幅值 (V_{pp})
- 輸入波特圖的垂直刻度設置 (dB)
- 示波器測是每個頻點的輸入電壓 V_i 和輸出電壓 V_o 的平均值, 平均取 8次, 頻寬限制設為 20MHz
- 示波器計算每個頻點的 $PSRR = 20\text{Log}(V_i/V_o)$, 然後畫出波特圖



最大動態範圍 $\approx 70\text{dB}$

輸出端分析: 控制環路回應 (波特圖)

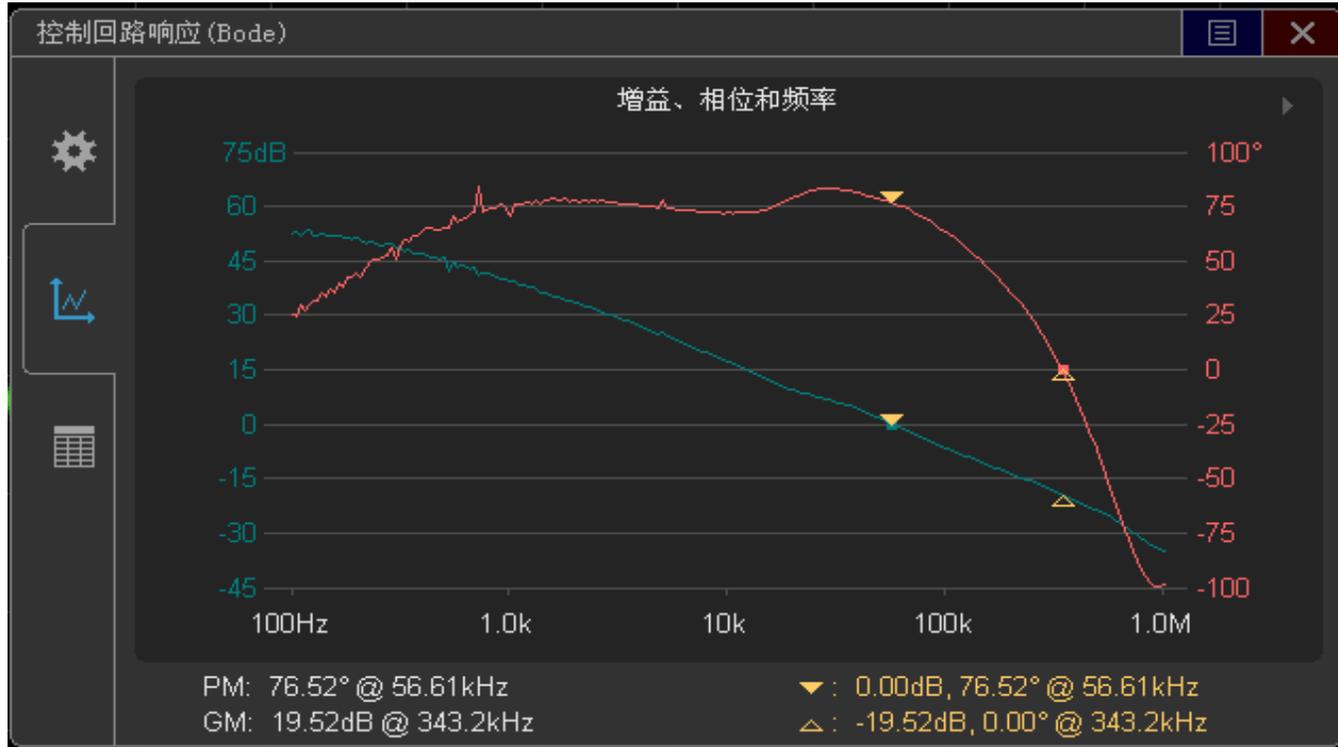


$$A = 20\text{Log}(V_1/N_2)$$



測試結果分析

波特圖幫助我們進行 FRA



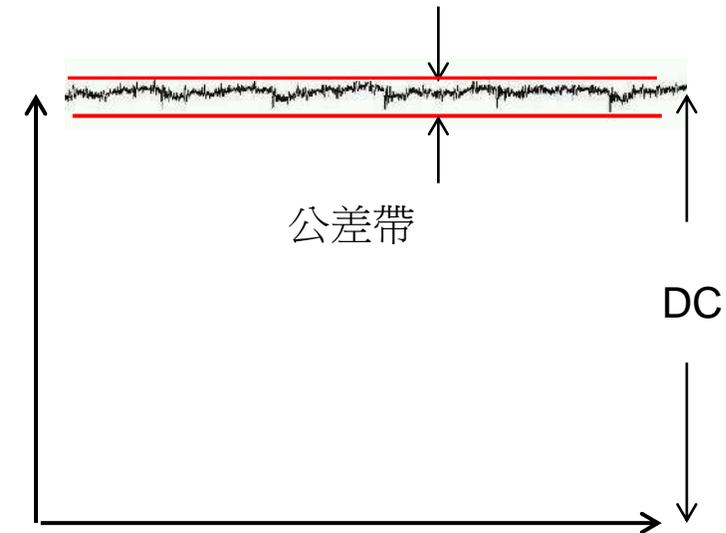
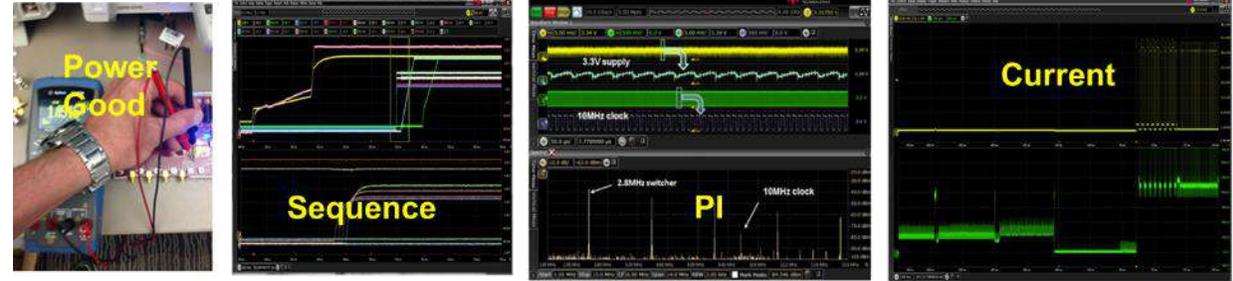
- ◆ 增益裕度（相位為 0° 時）： 小於 -10dB
- ◆ 增益衰減（增益@開關頻率）： 小於 -20dB
- ◆ 穿越斜率（0dB附近）： 單極點穿越（-20dB每十倍頻）
- ◆ 相位裕度（增益為0dB時）： 大於 45° 建議 45° -- 80°
- ◆ 穿越頻率（增益為0dB時）： 建議為開關頻率的5%--20%

電源完整性的量測

重要/常見量測

Measurements

1. Power-up/down Sequencing 上下電的排序
2. Power Rail Disruption 電源軌（鏈路）中斷
 1. Ripple/noise/compression 紋波雜訊壓縮
 2. Transient load response 瞬態負載回應
 3. Static Load Line 靜態負載
 4. Operational Integrity 運行完整性
3. Power Consumption (Current) 功耗
 1. In-rush 瞬態回應
 2. Steady State (operational) 穩態回應
 3. Efficiency optimization 效率優化
 4. Battery life 電池續航
 5. Modes 模式
4. PSRR (power supply rejection ration) 電源抑制比
5. Control Loop Stability (Bode) 環路回應
6. PDN Impedance 公網阻抗

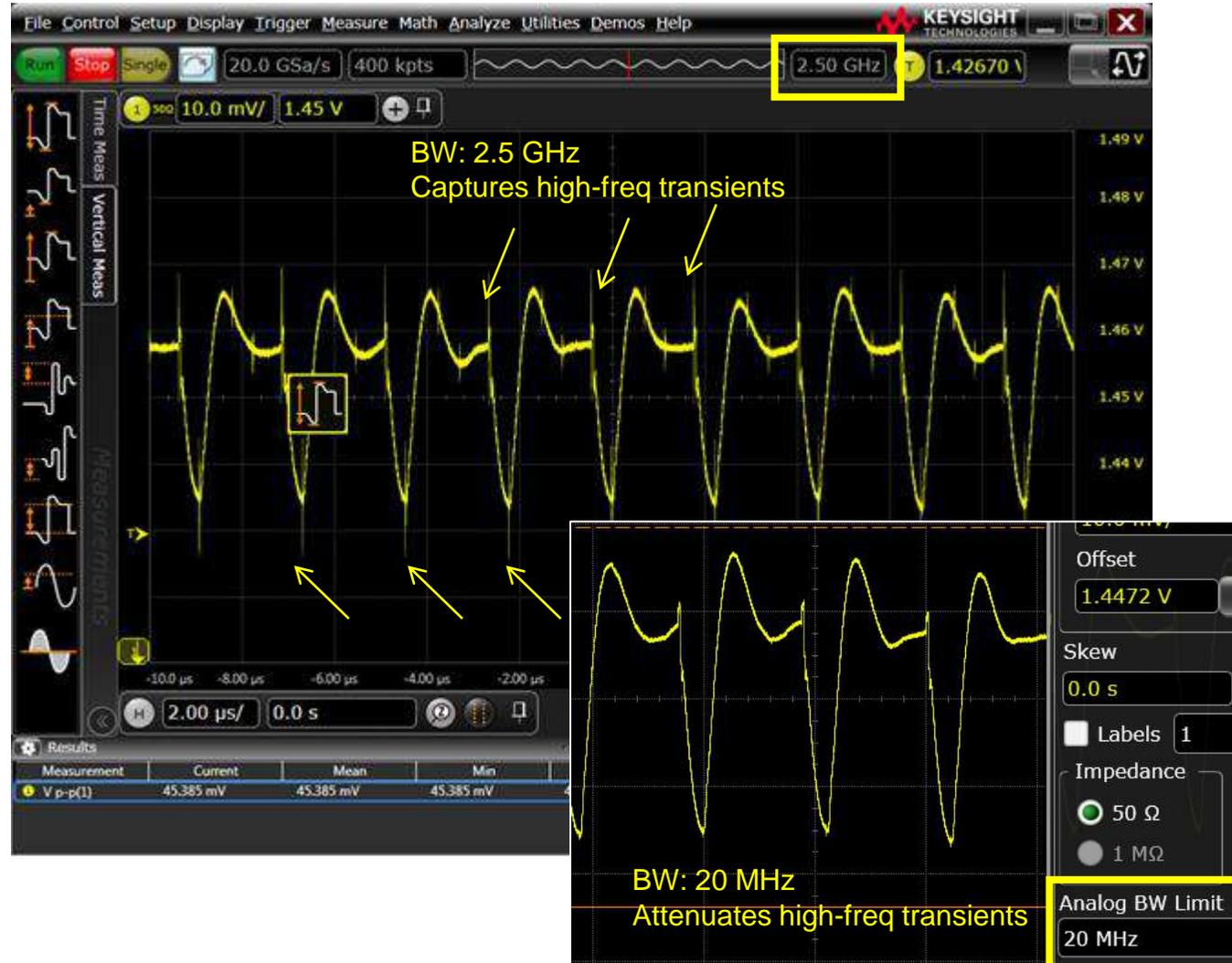


電源完整性量測

與頻寬限制的權衡 - 頻寬要夠!

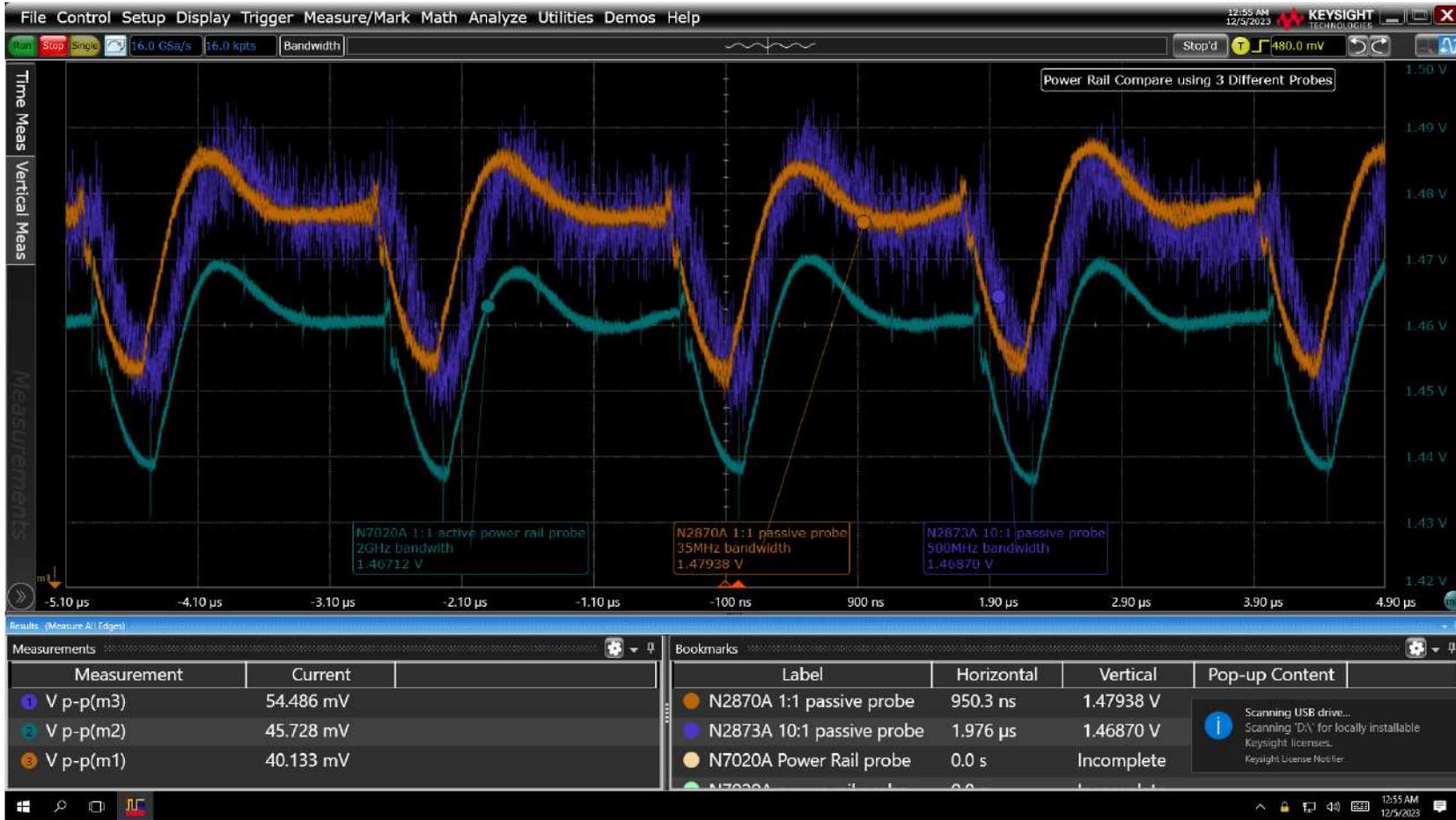
開關電流引起的瞬變很容易
超過 1GHz

電源雜訊是時鐘/資料抖動的主要
原因



電源完整性量測

擁有足夠的頻寬至關重要



General Purpose



N2870A 35 MHz, 1:1



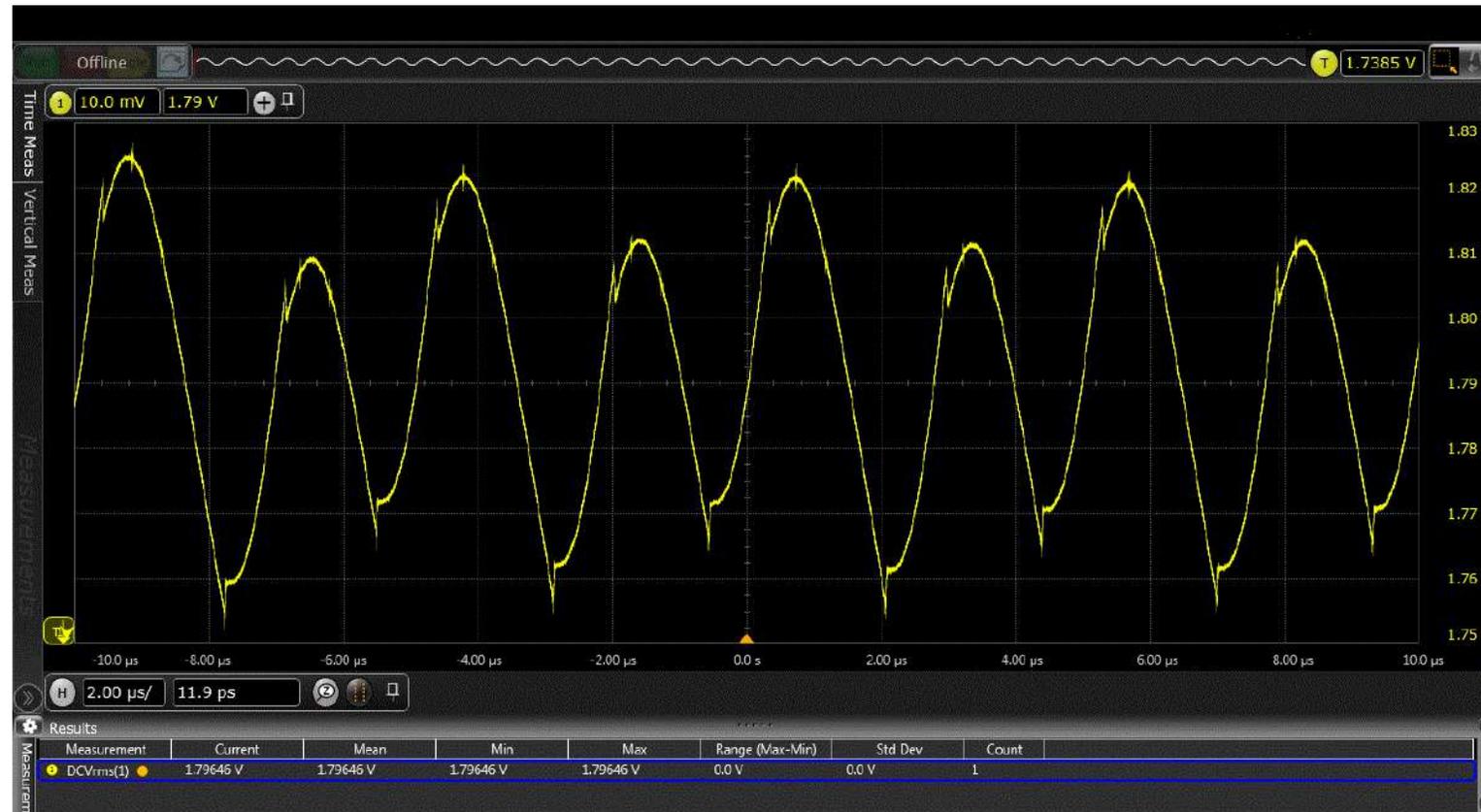
Specialized



N7020A 2 GHz, 1:1

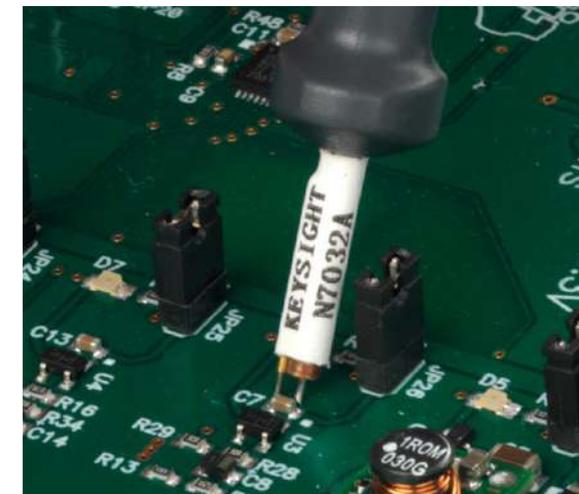
N7020A 電源軌探棒 - 讓全生態鏈量測成為可能

最佳電源紋波/雜訊測試手段



N7020A 電源軌探棒

屬性	N7020A	N7024A
探棒頻寬(-3dB)	2GHz	6GHz
衰減比	1.1:1	1.3:1
偏移範圍	± 24V	±15.25V
輸入阻抗 @ DC	50kΩ +/-2%	50kΩ +/-2%
探棒雜訊	0.1 * Scope Noise	0.3 * Scope Noise
動態信號範圍	± 850mV about offset voltage	± 600mV about offset voltage
探棒類型	Single-ended	Single-ended
包含的配件(orderable separately)	N7021A—Coaxial Pigtail Probe Head (qty 3): 8"	
	N7022A –Main Cable: 48"	
	N7023A—350MHz Browser: 45"	
	相容, 不包括在內	N7032A 4GHz browser for 0603 and 0805 packages (inch code) N7033A 5GHz browser for 0201 and 0402 packages (inch code) 1250-4403 Rotating SMA adapter
輸出阻抗	50Ω	50Ω
擴展溫度範圍	N7021A Main Cable, N7022A Pigtail Probe Head: -40° to + 85° C	



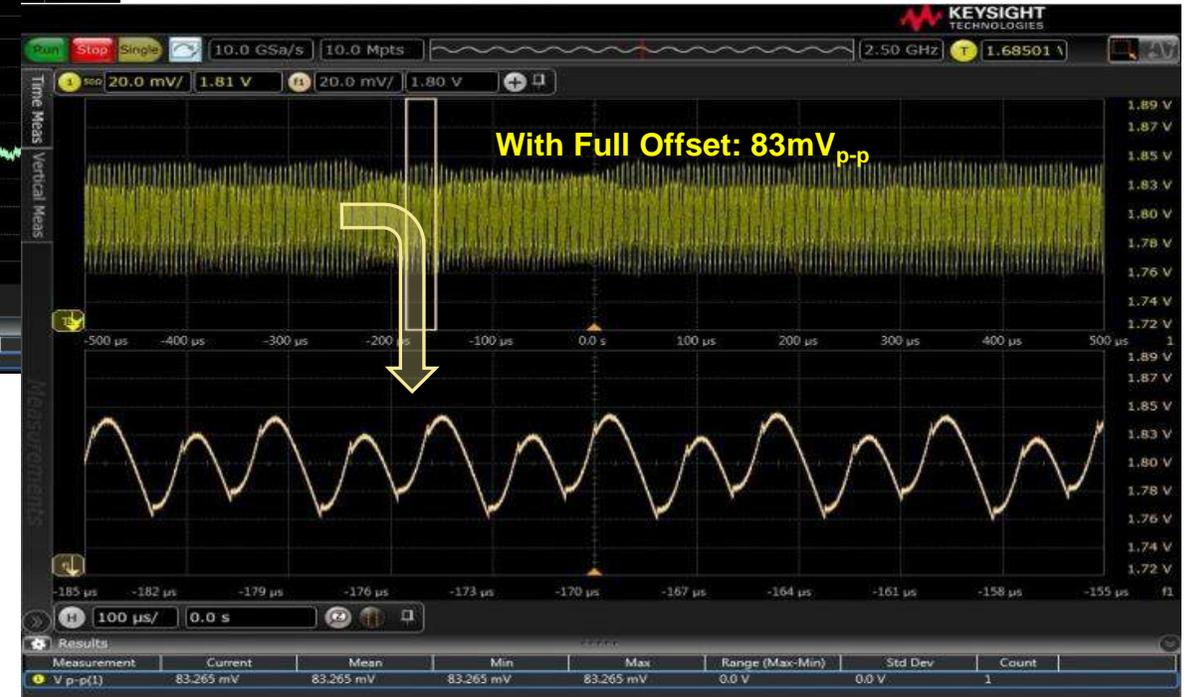
電源完整性量測

大直流信號偏置



消除直流信號偏移

- Probe Offset 探棒垂直偏置
- DC Block 隔直

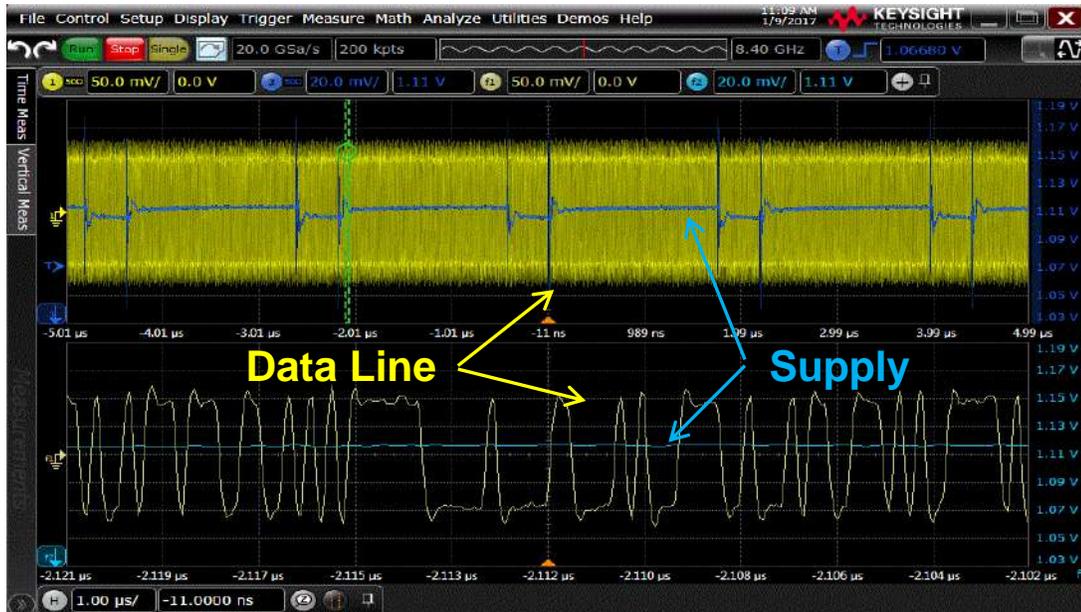


在較大的垂直分度 V/div
靈敏度降低
相對於小交流信號的示波器雜訊增加。

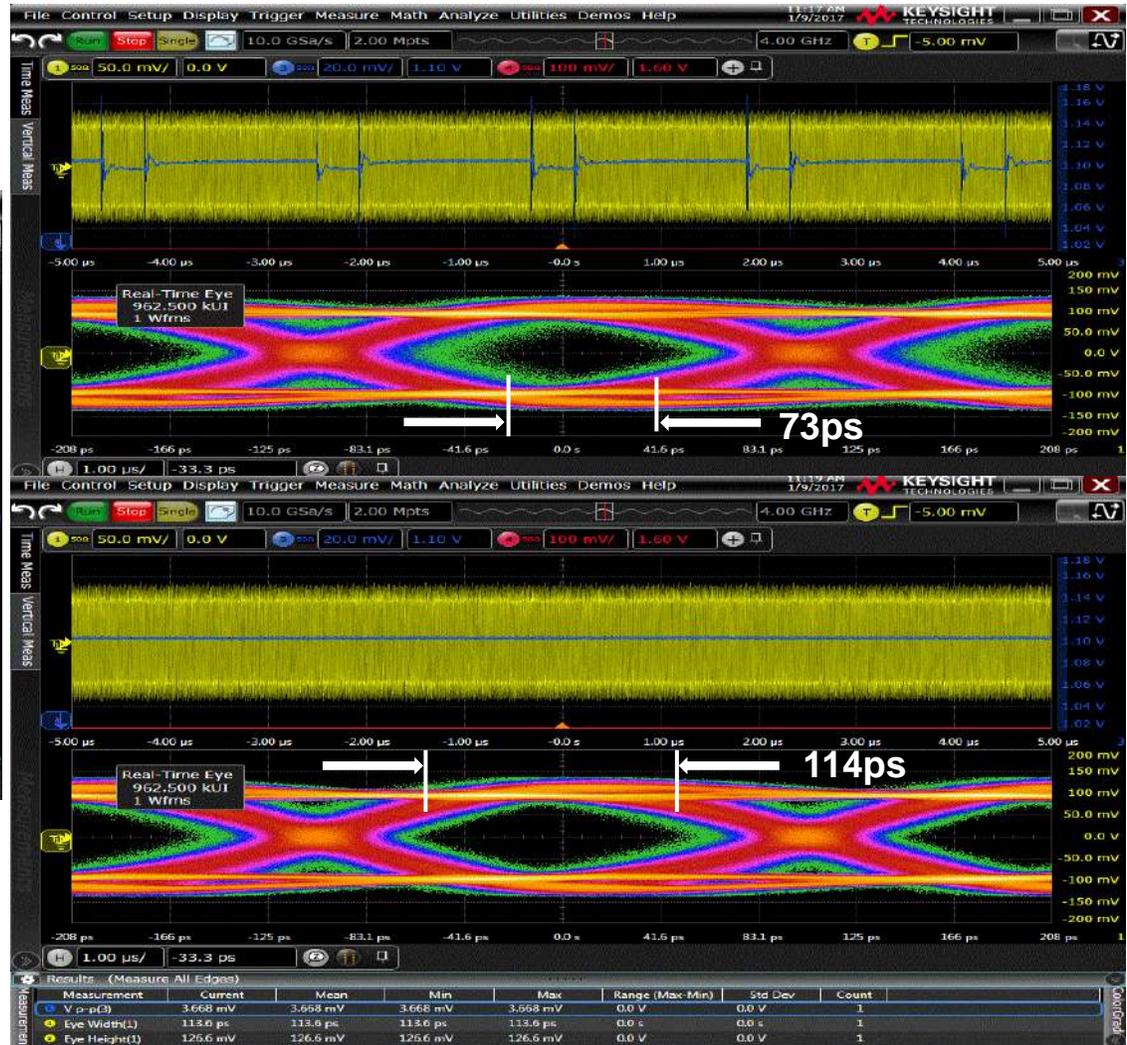
電源完整性的量測全景

Why? Power Supply induced jitter (psij)感應抖動

1.10V Supply with 115mV_{pp} Noise



1.10V Supply with 3mV_{pp} Noise



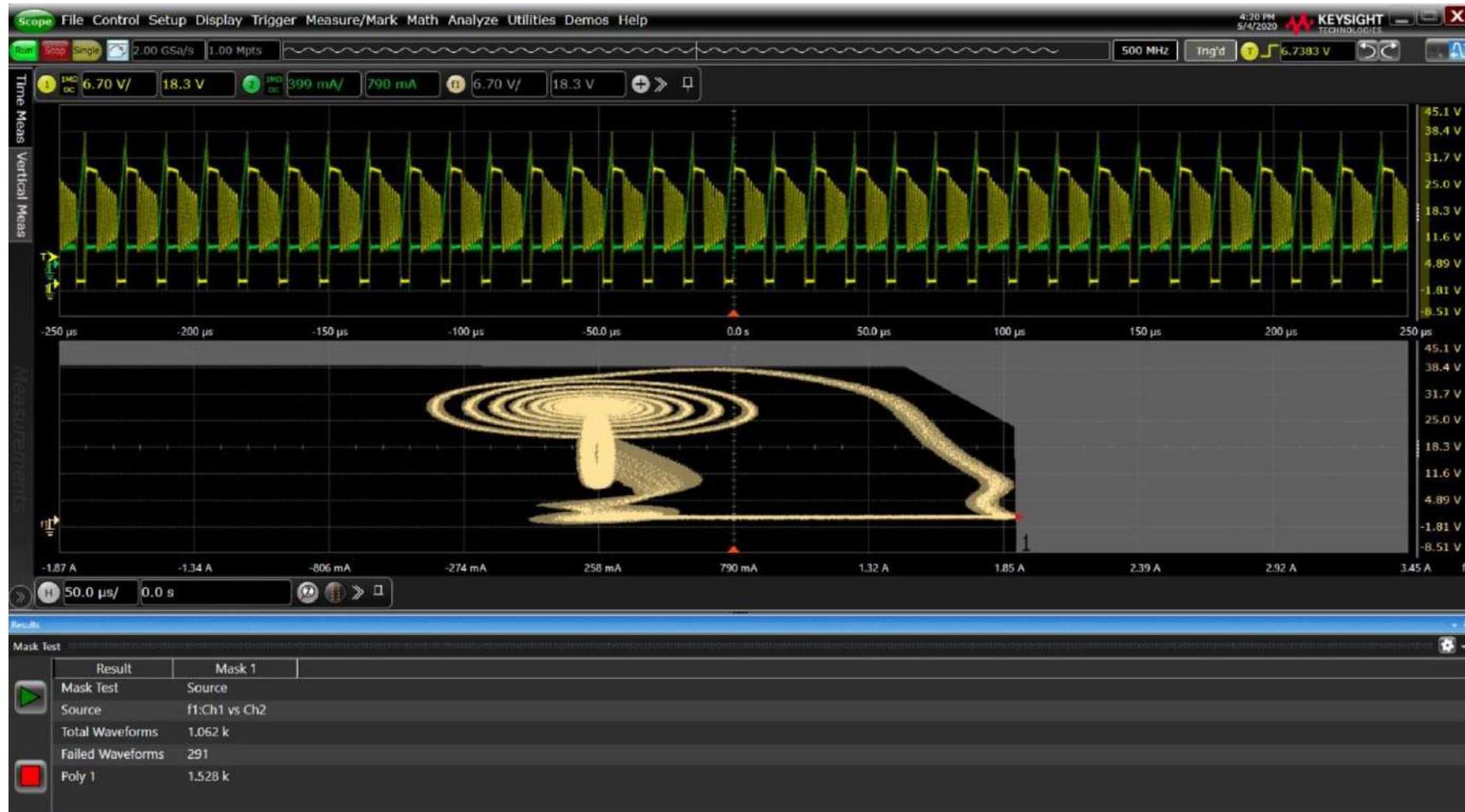
D9010POWA 電源完整性自動測試軟體

FPGA 串列資料示例



SOA (Safe Operating Area安全工作區) (-D9110PWRA)

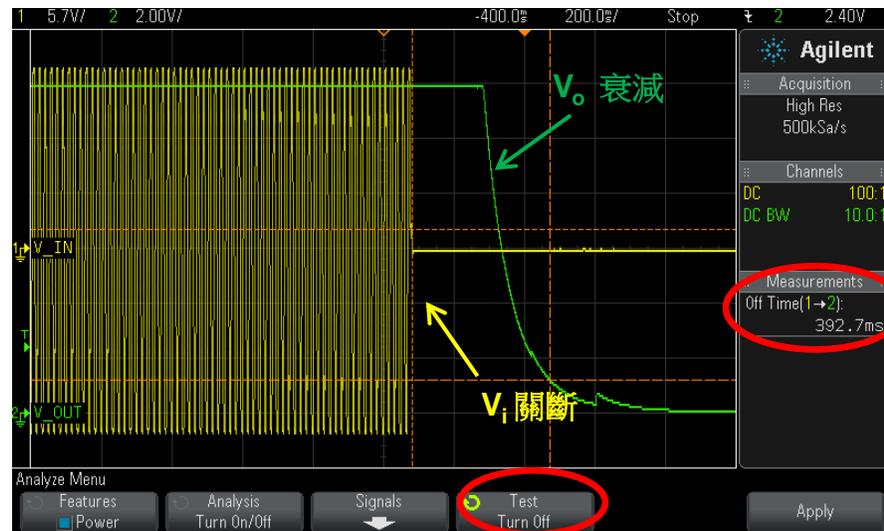
安全工作區 (SOA) 是設備可以預期在不自損壞的情況下運行的電壓和電流條件。安全工作區曲線是器件在各種條件下功率處理能力的圖形表示。SOA 分析通過繪製 I-V 曲線並將其與您定義的極限範本進行比較 (根據功率器件的規格) 來測試功率器件



輸出端分析：開啟/關斷回應時間

量測例子：

- 開啟時間：量測輸出電壓達從零到預設值90%時所需的時間。
- 關斷時間：量測輸出電壓從預設值降至預設值10%時所需的時間。



EXR 示波器的量測

有完整的自動設置方案

The screenshot displays the oscilloscope's software interface. At the top, a 'Setup wizard...' button is visible. Below it, a panel titled 'Analysis' lists various measurement categories: All Measurements, Input Measurements, Switching Measurements, Output Measurements, and Frequency Response Measurements. A 'Description' section shows a bar chart with four bars in green, red, yellow, and green. The main display area is divided into several horizontal traces. The top trace is a red signal with a scale of 2.00 V. Below it are two green traces with scales of 1.18 V and 1.10 V. Further down are two multi-colored traces labeled 'Raw Signal' and 'Signal with CrossTalk removed', both with a scale of 211 mV. The bottom trace is a blue signal with a scale of 2.00 V. The interface also includes a 'Power Analysis Wizard' window with a 'How to Connect' section. This section is divided into two parts: '1 Voltage' and '2 Current'. The 'Voltage' section includes three bullet points: 'Connect probe + input to the Line of the AC input.', 'Connect probe - input to the Neutral of the AC input.', and 'Select the appropriate attenuation ratio of the probe.' The 'Current' section includes one bullet point: 'Connect the current probe to the Line of the AC input with the direction of the arrow pointing towards the current flow.' Below the text, a schematic diagram shows an AC-to-DC power supply circuit with a current probe connected to the AC line. A sidebar on the left of the wizard window contains buttons for 'Select Analysis', 'Select Signals', 'Deskew Cal', 'Connect Probes', 'Settings', 'Offset Cal', and 'Turn On/Off'.

Setup wizard...

On

Analysis

- All Measurements
- Input Measurements
- Switching Measurements
- Output Measurements
- Frequency Response Measurements

Description

Control Loop Response (Bode)

Current Harmonics

Efficiency

Inrush Current

Modulation

Power Analysis Wizard

How to Connect

1 Voltage

- Connect probe + input to the Line of the AC input.
- Connect probe - input to the Neutral of the AC input.
- Select the appropriate attenuation ratio of the probe.

2 Current

- Connect the current probe to the Line of the AC input with the direction of the arrow pointing towards the current flow.

The following connection picture shows an AC-to-DC power supply. For DC-to-AC/DC power supplies, connect to the DC inputs accordingly.

Raw Signal

Signal with CrossTalk removed

2.00 V

0.0 V

-2.00 V

499 ns 998 ns 1.50 μ s 2.00 μ s 2.50 μ s

1.18 V

1.10 V

1.02 V

499 ns 998 ns 1.50 μ s 2.00 μ s 2.50 μ s

211 mV

11.1 mV

-189 mV

83.1 ps 125 ps 166 ps 208 ps

211 mV

11.1 mV

-189 mV

83.1 ps 125 ps 166 ps 208 ps

2.00 V

0.0 V

-2.00 V

43.5 ps 65.3 ps 87.0 ps 109 ps

大電流採集及量測



通用電流探棒（霍爾）

- 最多支援 3 通道
- 頻寬：最高到 100MHz
- 電流：最高到 700A
- 電壓：最高輸入電壓 600V CATII
- 精準度：1%



電流互感探棒

- 頻寬：最高 250MHz
- 電流：最高到 50KA（瞬態）



柔性電流探棒

- 頻寬：最高 16MHz
- 電流：最高到 300mA-30KA
- 電壓：最高輸入電壓 10KV
- 精準度：1%

大電壓採集及量測



高壓差動探棒

- 頻寬：最高到 100MHz
- 電壓：最高到 7000V(差動)
- 電壓：最高輸入電壓600V CATII
- 精準度：1%



高壓單端探棒

- 頻寬：最高 250MHz
- 電壓：最高到 30KV (瞬態)

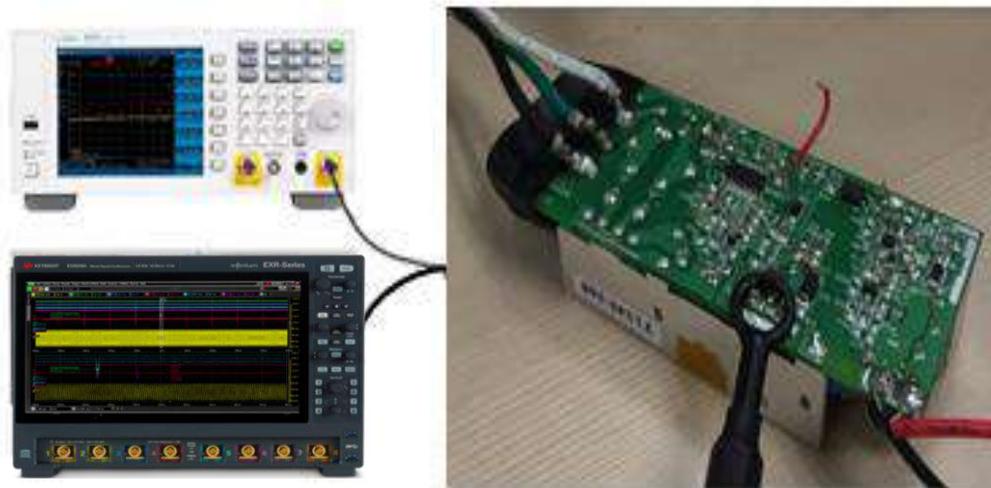


普通電壓探棒

- 頻寬：最高 1.5GHz
- 電壓：400Vp-p

EMI故障排查的經濟手段

基於示波器 FFT功能或頻譜儀進行 EMI初步調試，確定雜訊源，以經濟且高效的手段解決 EMI問題



簡單歸納一下

- 開關電源的設計和優化需要完整的測試/驗證手段。
- 基於示波器的功率分析方案可以有效減少測試時間。
- 是德科技示波器提供功率分析軟體提供了最完整的自動化功率分析能力。
- 探棒連接、接地及校準十分重要!
- 是德科技提供豐富的電流/電壓探棒滿足各種測試需求。



聯絡品勛科技(Keysight經銷商)

產品選購與技術配置協助/到府教育訓練安排請洽

台北總公司

洽詢專線 02-2278-9886

新北市三重區重新路五段609巷12號4樓之12

新竹辦公室

洽詢專線 03-668-1808

新竹縣竹北市復興二路229號2樓之9

台南辦公室

洽詢專線 06-230-0896

台南市歸仁區大光一街59號

線上諮詢/立刻詢價：www.pinsyun.com.tw

