



量測切換參數和評估電源 裝置動態的雙脈衝測試

應用摘要



介紹

由於寬能隙半導體在汽車和工業應用中展現了出色的效能，電力電子技術中使用的半導體材料正從矽材逐漸轉向為此類材料，例如碳化矽 (SiC) 和氮化鎵 (GaN)。GaN 和 SiC 可實現更精巧、更快速和更高效的設計。而法規監管和經濟壓力也持續推動高壓電力電子設計的效率不斷地提高。小巧質輕的設計在功率密度方面的優勢在空間受限和/或行動用途 (例如電動汽車) 中尤為明顯，特別是從降低系統成本的角度來看，更加精巧的電力電子設備也更為廣受歡迎。同時，隨著政府推出財政激勵措施和更嚴格的能源效率法規，效率變得越來越重

如歐盟生態設計指令、美國能源部 2016 年能效標準和中國質量認證中心 (CQC) 標誌等全球實體發布的指導原則規範了電氣產品和設備的能效要求。如圖1所示，在電源電子產品中提高能源效率的需求從發電點延伸到了消耗點。電力轉換器在整個發電、輸電和消耗鏈的多個階段中運作，由於這些運作的效率均非100%，因此每個步驟都會產生一些功率損耗。主要是因為能量會以熱量的形式損耗，使整體效率的降低量會在整個週期內倍增。[1]

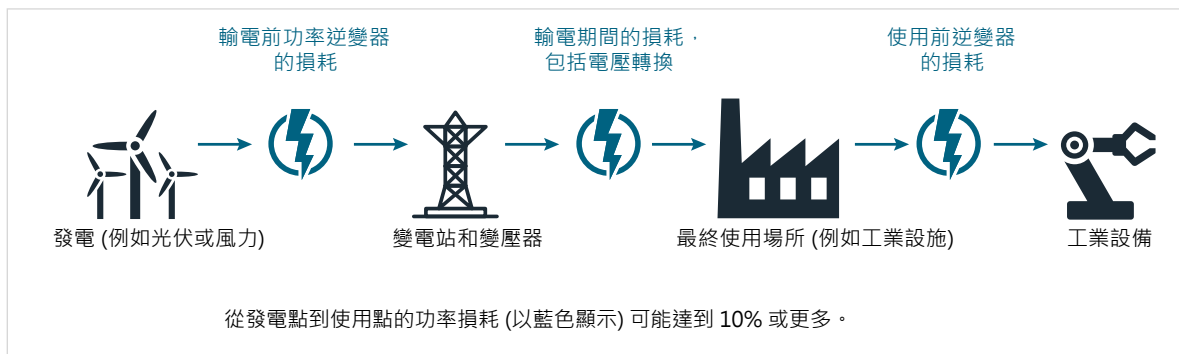


圖 1：發電、傳輸和消耗時的功率損耗 [1]。

設計電源轉換器時，理想的功率損耗為 0%，如圖 2 所示。

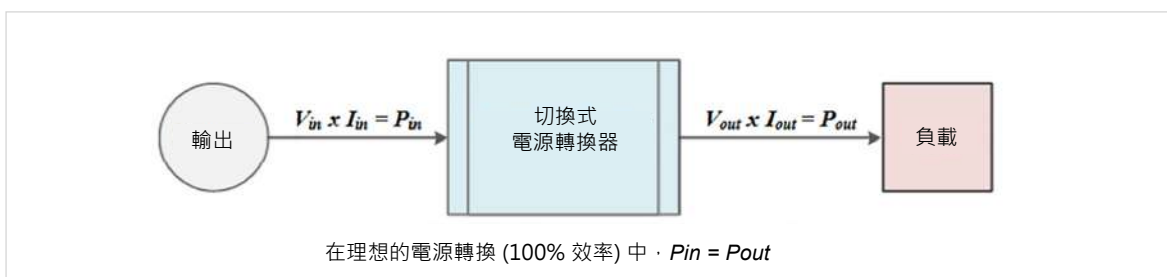


圖 2：理想的電源轉換效率 [1]。

但是，我們無法避免切換損耗。因此，目標是透過設計最佳化來減少損耗。同時必須嚴格量測與效率相關的設計參數。

典型的轉換器的效率約為87%至90%，這意味著在轉換器內部耗散了10%至13%的輸入功率 (主要會成為廢熱)。此類損耗的極大部分是在切換裝置 (通常是 MOSFET 或 IGBT) 中耗損。[2]

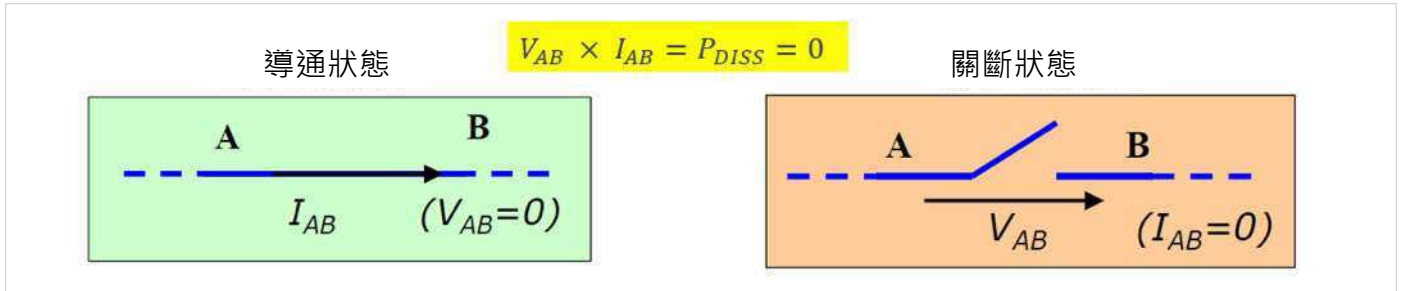


圖 3：理想切換。

理想情況下，切換裝置僅有「導通」或「關斷」兩種狀態(如圖 3 所示)，而且可在這些狀態之間立即切換。在「導通」狀態下，切換的阻抗為零歐姆，無論有多少電流流過切換裝置，切換裝置中均不會消耗功率。而在「關斷」狀態下，切換的阻抗則為無限且無電流流動，所以沒有功率耗損。

實際上，功率是在「導通」/「關斷」之間和「關斷」/「導通」之間的轉換期間耗損。由於電路中存在寄生元素，所以會發生這些非交易行為。如圖 4 所示，關上的寄生電容會減慢裝置的切換速度，延長了導通和關斷的時間。每當汲極電流流動時，MOSFET 汲極與源極間的寄生電阻便會消耗功率。[2]

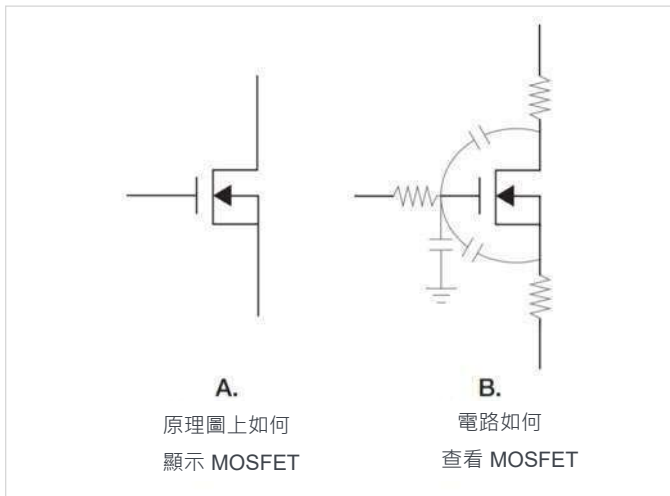


圖 4：A：原理圖上如何顯示 MOSFET。B：電路如何查看 MOSFET。

MOSFET 中的內接二極體的反向恢復損耗也要考慮在內。二極體的反向恢復時間是二極體中切換速度的度量，因此會影響轉換器設計中的切換損耗。

因此，設計工程師將需要量測所有這些時序參數，以將切換損耗保持在最低位準，進而設計出效率更高的轉換器。

量測 MOSFET 或 IGBT 的切換參數的首選測試方法是「雙脈衝測試」方法。本應用摘要將介紹全新的雙脈衝測試軟體及其實作方式。特別是，本應用摘要將會解釋如何使用 Tektronix AFG31000 任意函數產生器產生脈衝，並使用 4、5 或 6 系列 MSO 示波器量測重要參數。

何謂雙脈衝測試？

雙脈衝測試是一種量測切換參數並評估電源裝置動態行為的方法。此應用程式的使用者通常希望量測以下切換參數：[3]

- 導通參數：導通延遲 ($t_{d(on)}$)、上升時間 (t_r)、 t_{on} (導通時間)、 E_{on} (導通能量)、 dv/dt 和 di/dt 。然後再確定能量損耗。[4]
- 關斷參數：關斷延遲 ($t_{d(off)}$)、下降時間 (t_f)、 t_{off} (關斷時間)、 E_{off} (關斷能量)、 dv/dt 和 di/dt 。然後再確定能量損耗。[4]
- 反向恢復參數： t_{rr} (反向恢復時間)、 I_{rr} (反向恢復電流)、 Q_{rr} (反向恢復電荷)、 E_{rr} (反向恢復能量)、 di/dt 和 V_{sd} (正向接通電壓)。[4]

執行此測試是為了：

- 確保電源裝置的規格，例如 MOSFET 和 IGBT。
- 確認電源裝置或電源模組的實際值或偏差。
- 在各種負載條件下量測這些切換參數，並驗證許多裝置的效能。

典型的雙脈衝測試電路如圖 5 所示。

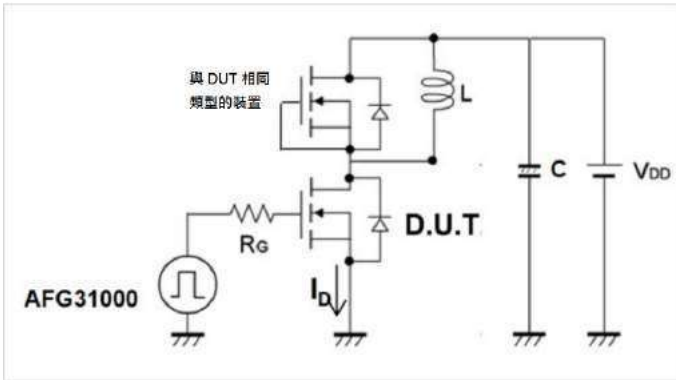


圖 5：雙脈衝測試電路。

測試使用電感負載和電源供應器進行。電感器用於複製轉換器設計中的電路條件。電源供應器用於向電感器提供電壓。AFG31000 用於輸出觸發 MOSFET 閘極的脈衝，使其導通以開始電流傳導。

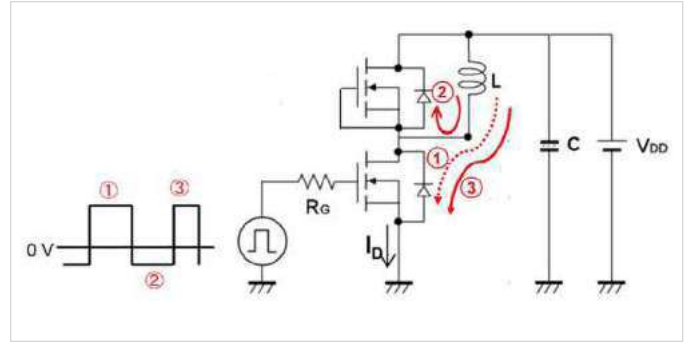


圖 6：使用 MOSFET 作為 DUT 時的電流。

圖 6 顯示了使用 MOSFET 的雙脈衝測試在測試的不同階段中的電流流動。如圖 7 所示，使用 IGBT 時將施加相同的電流。

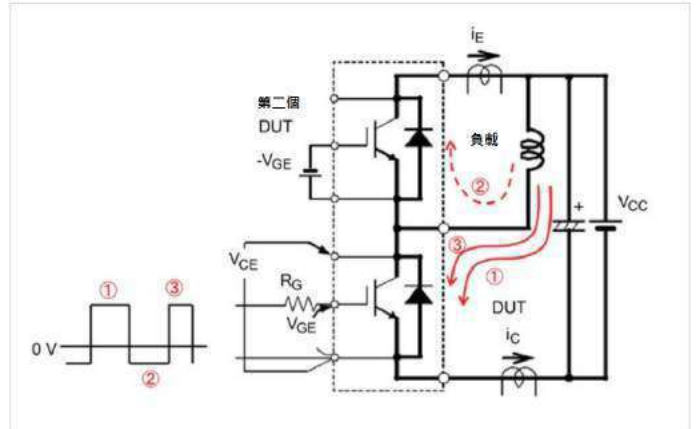


圖 7：使用 IGBT 作為 DUT 時的電流。

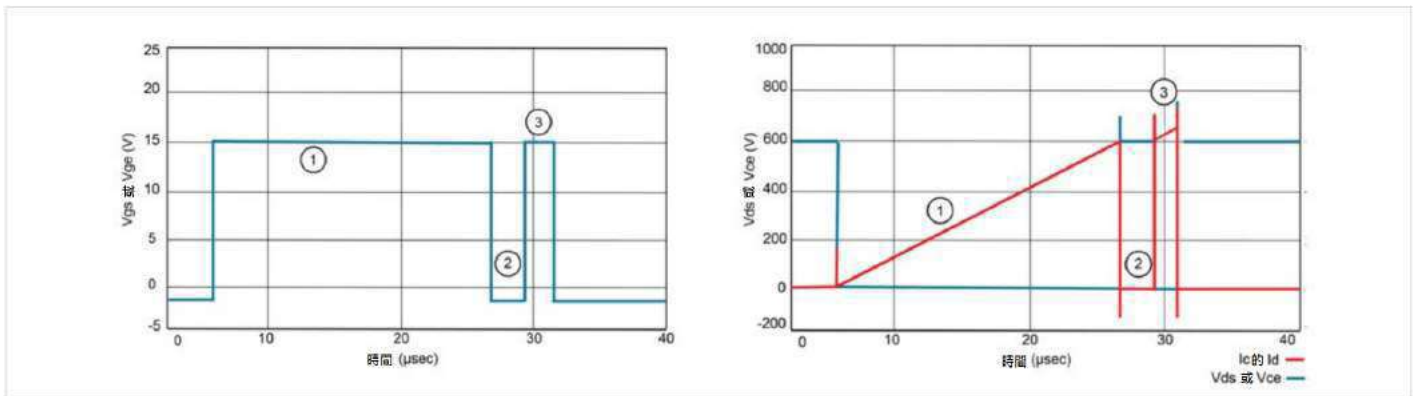


圖 8：雙脈衝測試的典型波形。

圖 8 顯示了在中端 MOSFET 或 IGBT 上進行的典型量測。這是雙脈衝測試的不同階段 (如需這些階段的相關資訊，請參考圖 6、7 和 8)。

- 第一步，由 1 號導通脈衝表示，是初始調整的脈衝寬度。這會在電感器中建立電流。調整此脈衝以達到所需的測試電流 (I_d)，如圖 8 所示。
- 第二步 (2) 是關斷第一個脈衝，這會在續流二極體中產生電流。關斷週期很短，以使負載電流盡可能接近通過電感的恆定值。圖 8 顯示了低端 MOSFET 上的 I_d 在第二步中變為零。但是，電流流過電感器和高端二極體。如圖 6 和 7 所示，電流流過高端 MOSFET 的二極體 (未導通的 MOSFET)。
- 第三步 (3) 由第二個導通脈衝表示。脈衝寬度比第一個脈衝短，因此該裝置不會過熱。第二個脈衝必須足夠長才能進行量測。圖 8 所示的電流過衝是由於續流二極體從高端 MOSFET/IGBT 反向恢復所造成。
- 然後在第一個脈衝關斷和第二個脈衝導通時擷取關斷和導通時序量測。

下一節將討論測試設定以及如何進行量測。

雙脈衝測試設定

圖 9 顯示了執行雙脈衝測試的設備設定。需要以下設備：

- **AFG31000**：連接至隔離式閘極驅動器，並使用設備上的雙脈衝測試應用程式快速產生具有可變脈衝寬度的脈衝。隔離的閘極驅動器使 MOSFET 導通。
- 示波器：4/5/6 系列 MSO (此設定使用 Tektronix 5 系列 MSO)：量測 V_{DS} 、 V_{GS} 和 I_D 。
- 示波器上的雙脈衝測試軟體：4/5/6 系列 MSO 上的選配 **WBG-DPT** 可進行自動量測
- 用於低端裝置雙脈衝測試和高端二極體反向恢復的探棒：
 - 低端探測：
 - Ch1： V_{DS} - **TPP 系列**或 **THDP/TMDP 系列**電壓探棒
 - Ch2： V_{GS} - **TPP 系列**或 **TIVP 隔離探棒**，附 MMCX 轉接器探棒頭。
 - Ch3： I_D - **TCP 系列**電流探棒
 - 高端探測：
 - Ch4： I_{RR} - **TCP 系列**電流探棒
 - Ch5： V_{DS} - **THDP/TMDP 系列**電壓探棒
- 直流電源供應器：
 - 高電壓電源供應器：
 - **EA-PSI 10000** 可程式設計電源供應器 2 kV 和 30 kW
 - 高達 3 kV 的 **2657A** 高壓電源量測設備 (SMU)
 - **2260B-800-2** 可程式設計直流電源供應器，800 V
 - 閘極驅動電路的電源供應器：
 - **2230 系列**或 **2280S 系列**直流電源供應器

AFG31000 上的 Double Pulse 應用程式

AFG31000 雙脈衝測試應用程式可直接從 tw.tek.com 網站下載並安裝至 AFG31000 上。圖 10 顯示了在將應用程式下載並安裝到設備後，AFG31000 主畫面上的雙脈衝測試圖示。

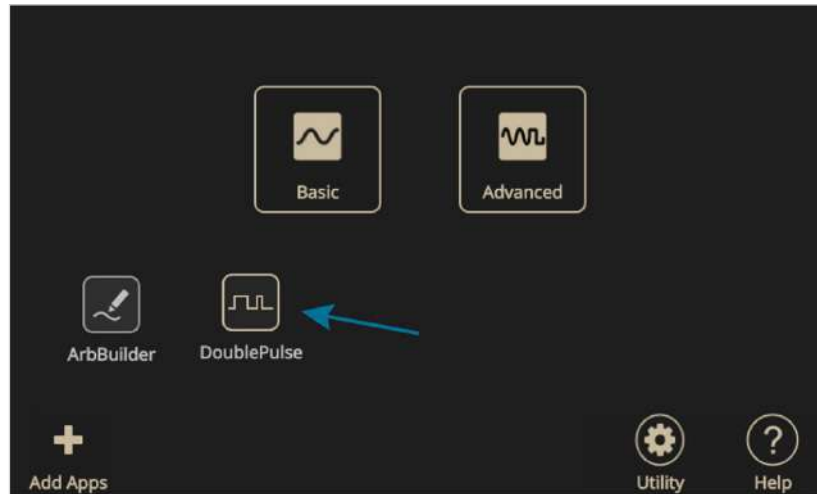


圖 10：AFG31000 主畫面。

雙脈衝測試應用程式允許使用者建立具有可變脈衝寬度的脈衝，由於建立具有可變脈衝寬度的脈衝的方法十分耗時，這已成為使用者的主要痛點。其中一些方法包括在 PC 上建立波形並將其上傳至函數產生器。其他方法則會使用需要大量工作和時間進行程式設計的微控制器。AFG31000 上的雙脈衝測試應用程式可透過前面板顯示器啟用此功能。此應用程式簡單易用且設定迅速。調節第一個脈衝寬度以獲得期望的切換電流值。第二個脈衝還可以獨立於第一個脈衝進行調整，且第二個脈衝通常比第一個脈衝短，不會損壞電源裝置。使用者還可以定義每個脈衝之間的時間間隔。

圖 11 顯示了雙脈衝測試應用程式視窗。使用者可在此處設定：

- 脈衝數：2 至 30 個脈衝
- 高低壓振幅 (V)
- 觸發延遲 (秒)
- 觸發源 – 手動、外部或計時器
- 負載 – 50Ω 或 High Z

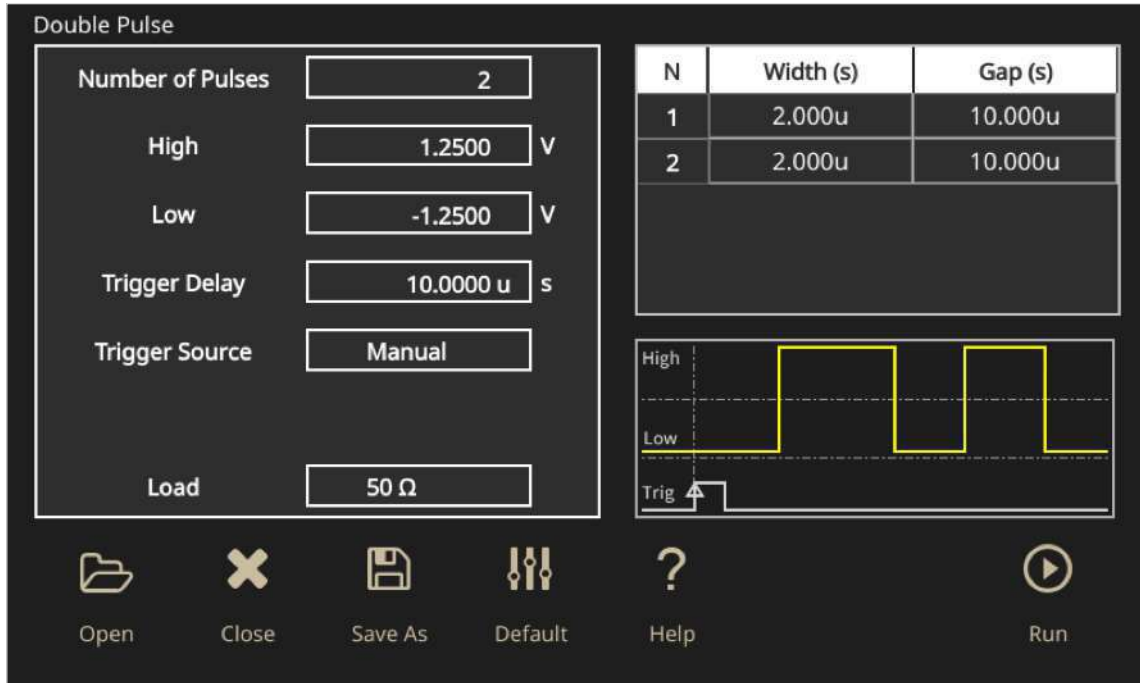


圖 11：AFG31000 上的 Double Pulse 雙脈衝測試應用程式。

圖 12 顯示了雙脈衝測試的實際測試設定。

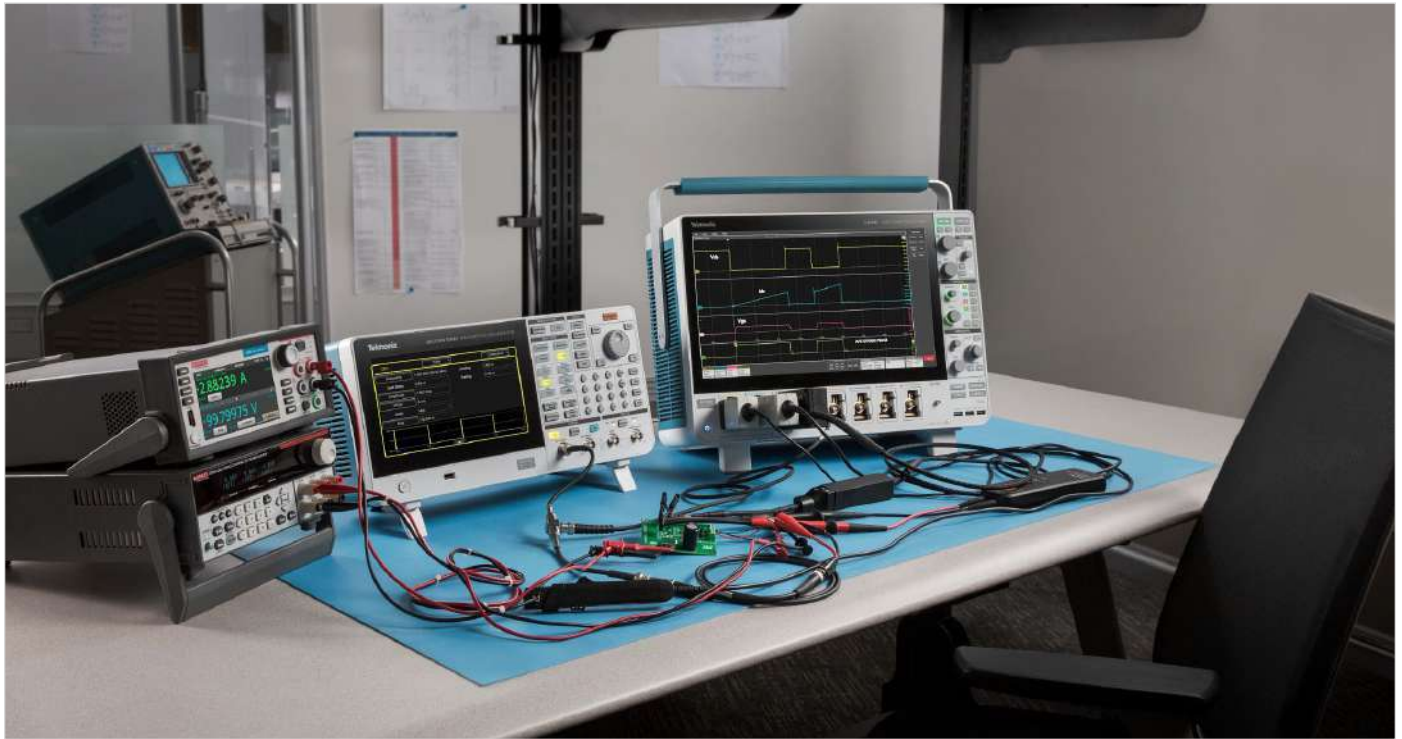


圖 12：雙脈衝測試設定。

在此範例中，ST Micro-Electronics 評估板將作為 N 通道功率 MOSFET 和 IGBT 的閘極驅動器：EVAL6498L，如圖 13 所示。



圖 13：EVAL6498L：<https://www.st.com/en/evaluation-tools/eval6498l.html>。

範例中所使用的 MOSFET 也是來自 ST Micro-Electronics：STFH10N60M2。這些是 N 通道 600V MOSFET，額定電流為 7.5A。

測試電路中使用的其他設備和裝置包括：

- Tektronix 4、5 或 6 系列 MSO 示波器
- Tektronix 電流探棒 TCP0030A-120 MHz
- Tektronix 高電壓差動式探棒：TMDP0200
- Keithley 直流電源供應器 – 2280S (為閘極驅動器 IC 供電)
- Keithley 2461 SMU 儀器 (為電感器供電)
- 電感：~1 mH

電源連接如下：

- MOSFET 焊接到板上。Q2 是低端，而 Q1 是高端。
- 由於 Q1 不會導通，因此，需要將 Q1 的閘極和源極短路。
- 將閘極電阻焊接到 Q2。R = 100 Ω。

- AFG31000 的通道 1 連接到評估板上的輸入 PWM_L 和 GND。
- Keithley 電源供應器連接至評估板上的 VCC 和 GND 輸入，為閘極驅動器 IC 提供電源。
- Keithley 2461 SMU 儀器連接至 HV 和 GND，為電感器供電。
- 然後將電感器連接至 HV 和 OUT。

雙脈衝測試量測

一旦安全地連接了所有電源連線，我們便可將探棒從示波器連接至 Q2 (低端 MOSFET)，如圖 14 所示。

- 被動式探棒連接至 V_{GS} 。
- 差動式電壓探棒連接至 V_{DS} 。
- TCP0030A 電流探棒通過 MOSFET 源極引線上的迴路。

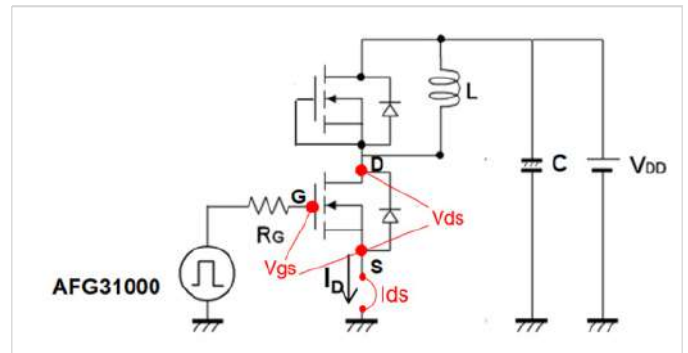


圖 14：示波器量測測試點。

仔細的探測和最佳化將有助於使用者獲得良好的結果。使用者可採取一些步驟來進行準確且可重複的量測，例如從量測中移除電壓、電流和時序誤差。4/5/6 系列 MSO 的 WBG-DPT 選項等自動量測軟體消除了手動步驟，進而節省了時間並提供了可重複的結果。

現在可以在 AFG31000 上設定雙脈衝測試，如圖 15 的螢幕擷取畫面所示。

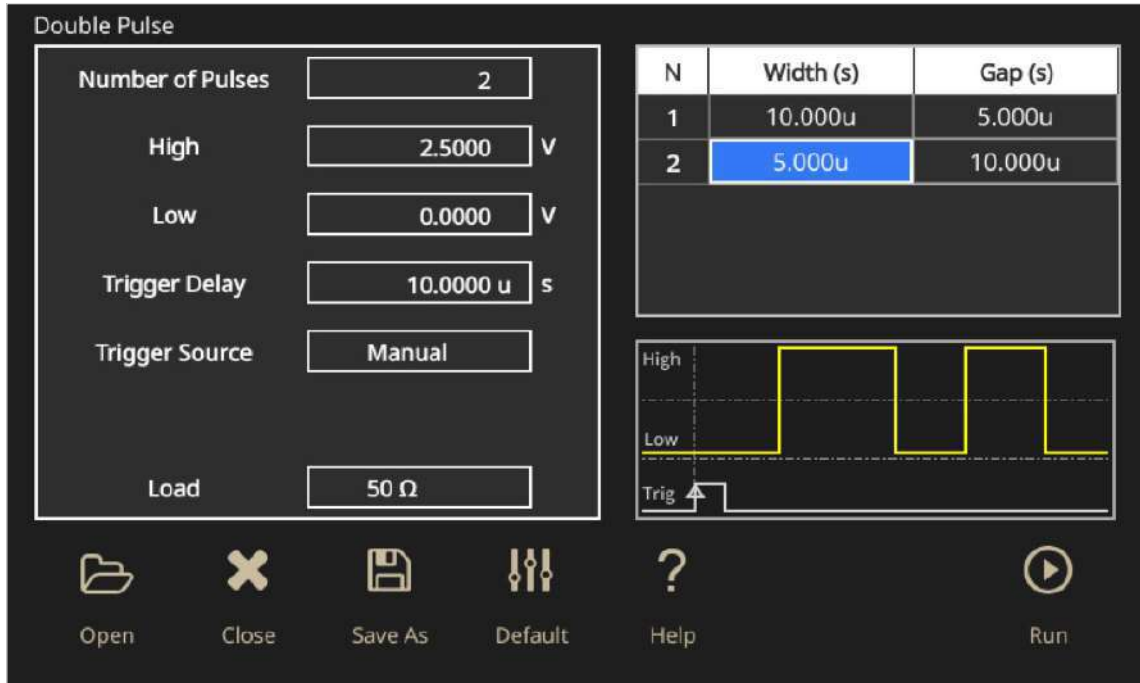


圖 15：AFG31000 上的雙脈衝測試設定。

脈衝的振幅設定為 2.5V。第一個脈衝的脈衝寬度設定為 10 μs，間隙設定為 5 μs，第二個脈衝設定則為 5 μs。觸發器設定為手動。

SMU 儀器設定為向 HV 提供 100 V 電源。設定閘極驅動訊號和電源供應器後，即可使用示波器上的 WBG-DPT 應用程式來設定和執行雙脈衝測試。

4/5/6 系列 MSO 上的雙脈衝測試軟體

與手動測試相比，WBG-DPT 應用程式具有幾個重要優勢：

- 更短的測試時間
- 實現可重複量測，即使是在有振鈴的訊號上
- 根據 JEDEC/IEC 標準或使用自訂參數進行量測
- 便於示波器設定的預設功能
- 在脈衝和註釋之間輕鬆導覽
- 在結果表格中匯整量測結果
- 使用報告、工作階段檔案和波形記錄結果
- 完整的程式設計介面可實現自動化
- 通過/失敗測試，具有可配置的限制和失敗時採取的動作

如需更多有關 WBG-DPT 應用程式的資訊，請參閱產品規格表。

量測分為切換參數分析、切換時序分析和二極體恢復分析。

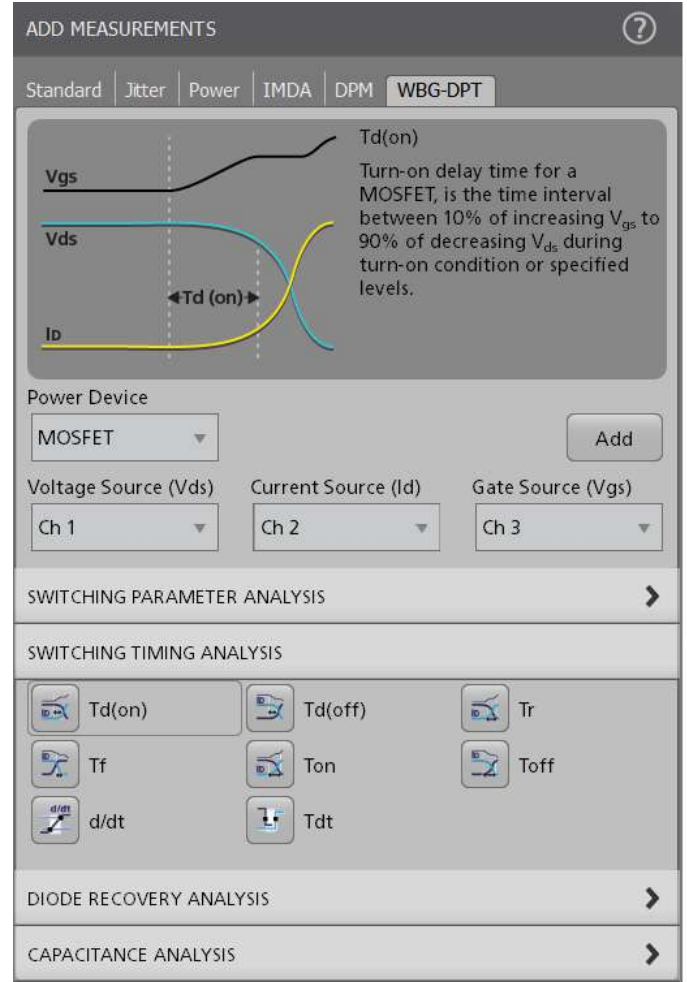


圖 16. WBG-DPT 應用中的切換時序分析量測。

WBG 偏移校正功能

當功率裝置分別為 MOSFET 或 IGBT 時，WBG 偏移校正功能會計算汲極 - 源極電壓 (V_{DS}) 和汲極電流 (I_D) 或集電極至射極電壓 (V_{CE}) 和集電極電流 (I_C) 之間的偏移。然後將偏移值應用於在示波器上配置 V_{DS} 或 V_{CE} 訊號的源極。

WBG Deskew 不同於傳統示波器 deskew。通常是在開始對測試設定進行任何量測前先計算探棒之間的偏斜。在 WBG 中，量測系統的偏斜則是以擷取後操作的方式執行。

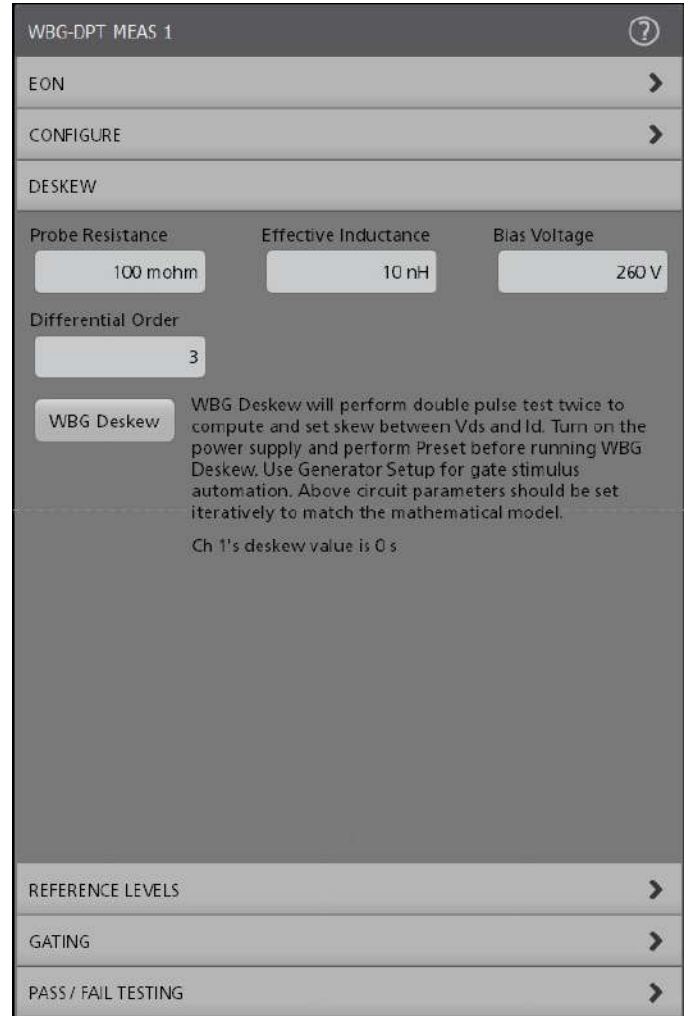


圖 17：WBG 偏移校正過程專用於雙脈衝測試，可在擷取訊號後對齊電流和電壓波形。

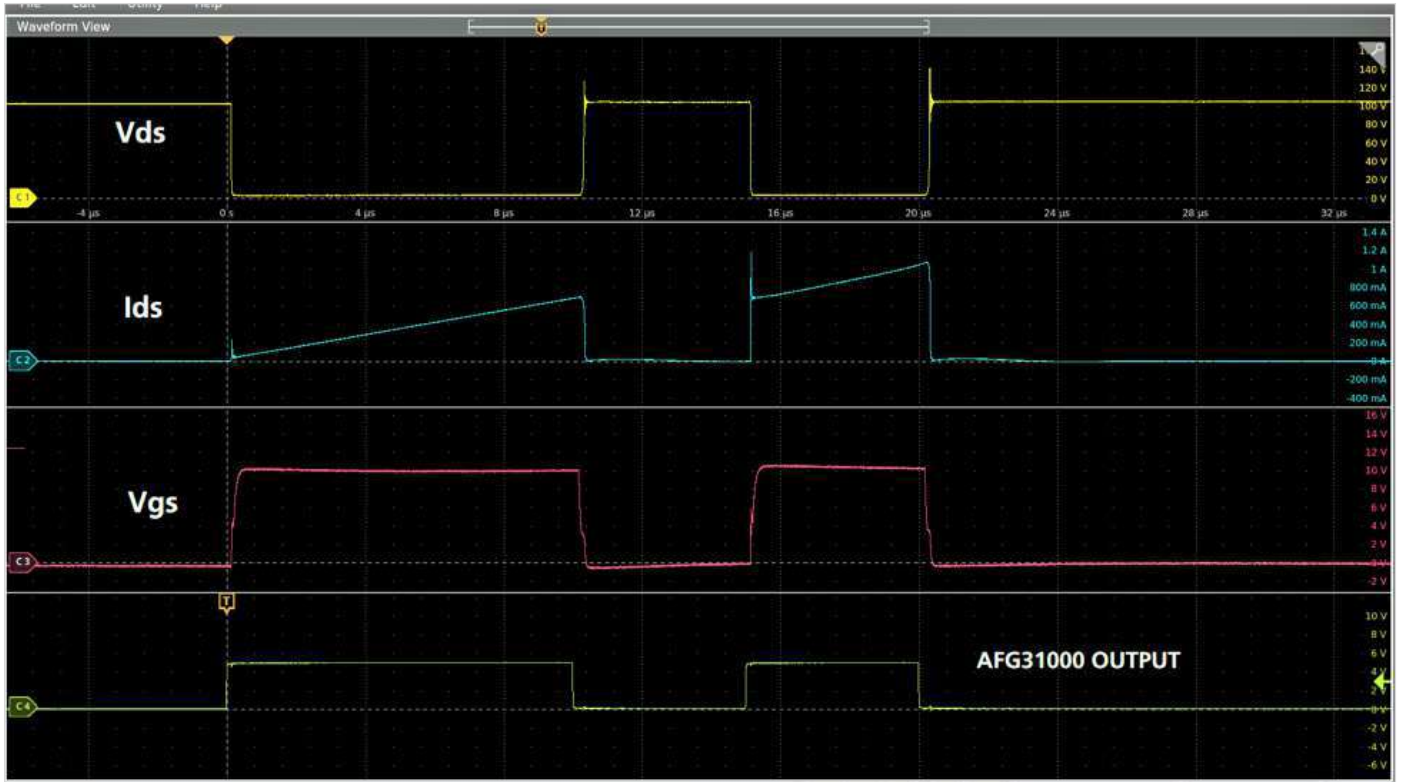


圖 18：雙脈衝測試波形。

請注意，圖 18 中的波形類似於圖 8 中的波形。同樣， I_{ds} 上的電流過激是由於續流二極體從高端 MOSFET/IGBT 反向恢復而引起。此尖波對於正在使用的裝置是固有的現象，而且將會造成損耗。

量測導通和關斷時序以及能量損耗

為了計算導通和關斷參數，我們要查看第一個脈衝的下降邊緣和第二個脈衝的上升邊緣。

量測導通和關斷參數的產業標準如圖 19 所示。

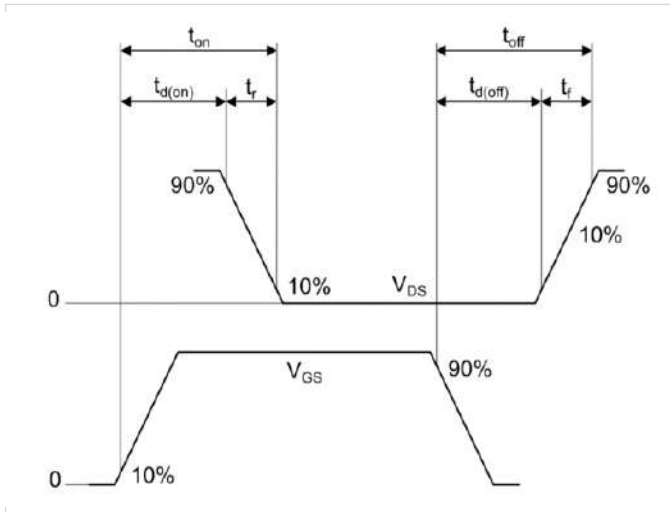


圖 19：切換時間標準波形 [5]。

- $t_{d(on)}$ ：介於 V_{GS} 峰值 10% 和 V_{ds} 峰值振幅 90% 之間的時間間隔。
- T_r ： V_{DS} 峰值振幅的 90% 和 10% 之間的時間間隔。
- $t_{d(off)}$ ：介於 V_{GS} 峰值的 90% 和 V_{ds} 峰值振幅 10% 之間的時間間隔。
- T_f ： V_{DS} 峰值振幅的 10% 和 90% 之間的時間間隔。

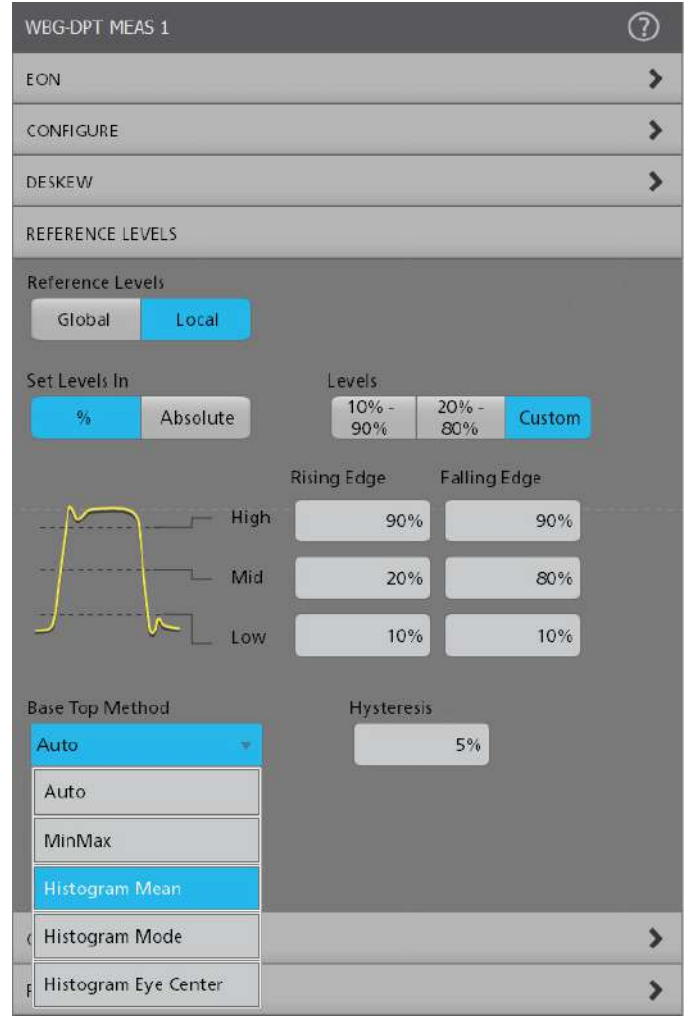


圖 20：示波器上的 DPT 軟體支援標準和自訂參考位準。遲滯帶會在參考位準上設定一個範圍，訊號必須通過該範圍才能被識別為轉換。這有助於篩選掉虛假事件。

圖 21 顯示了在示波器上擷取的波形，以及導通參數的量測結果。在示波器上，啟動 WBG-DPT 應用程式。將 Power Device (功率裝置) 類型選擇為 MOSFET，並設定 V_{DS} 、 I_D 和 V_{GS} 來源。

前往 Switching Timing Analysis (切換時序分析) 群組。新增 $T_{d(on)}$ 、 $T_{d(off)}$ 、 T_r 和 T_f 量測值。

設定 $T_{d(on)}$ 量測，按一下 Preset (預設)。示波器將會準備進行單次擷取。

開啟電源供應器。

開啟 AFG31000 以產生輸出脈衝。

接著，結果波形將擷取顯示在示波器上，如圖 21 所示。

然後使用以下公式計算轉換期間的能量損耗：

$$E_{on} = \int_0^t V_{DS} I_{DS} dt \quad (1)$$

通常，設計人員會使用示波器上的積分功能來計算這種特定的能量損耗。WBG-DPT 應用程式在 Switching Timing Analysis (切換時序分析) 群組下提供 E_{on} 量測。此量測會設定積分並快速顯示結果。

可使用上面的公式來計算關斷轉換期間的能量損耗：

$$E_{off} = \int_0^t V_{DS} I_{DS} dt \quad (2)$$

DPT 應用程式在 Switching Timing Analysis (切換時序分析) 功能表中包括自動 E_{off} 量測。這將執行計算並直接提供能量損耗結果。

注意：示波器擷取中顯示的資料僅供參考。

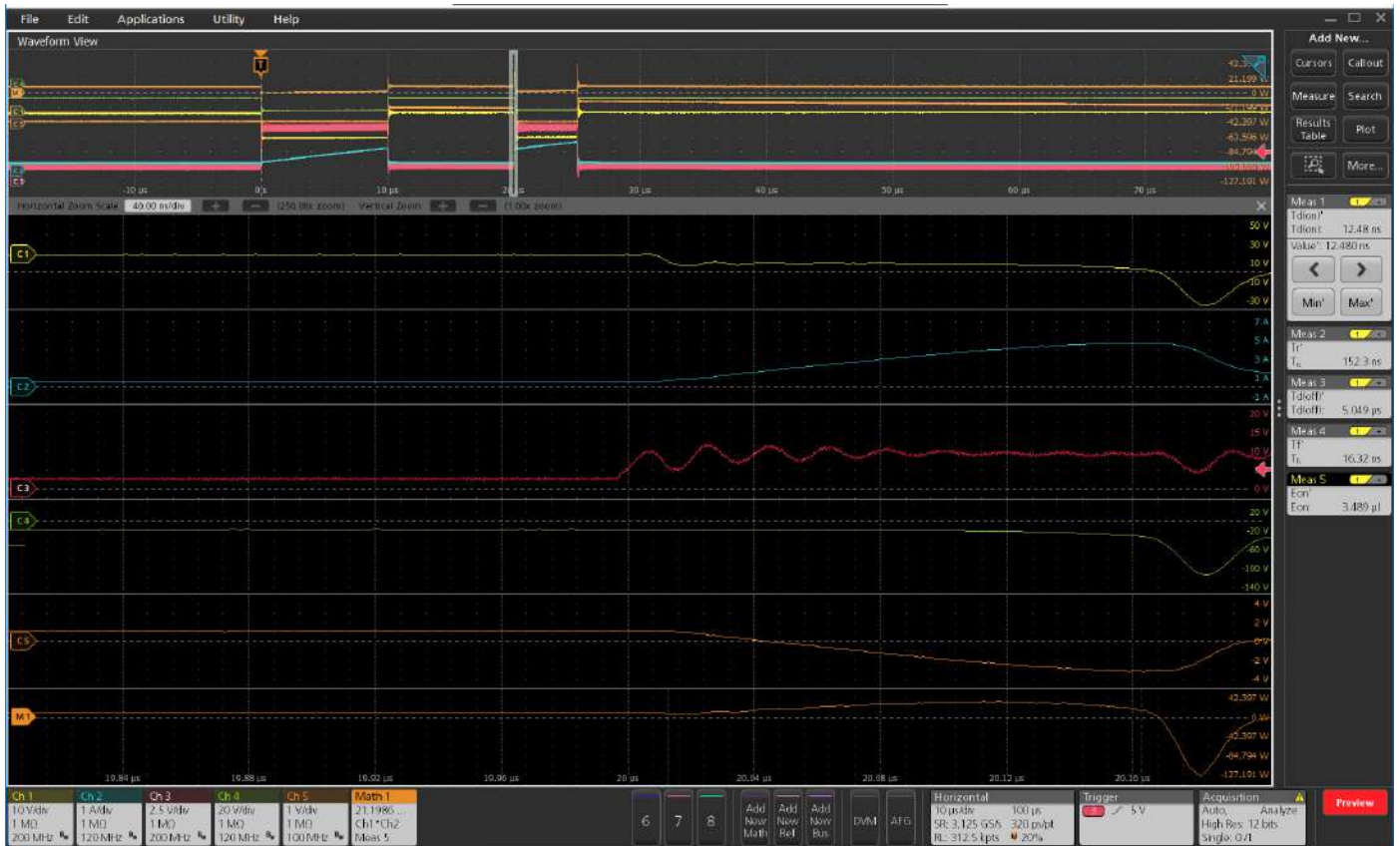


圖 21：導通參數波形

圖 22 顯示了使用示波器游標獲得的關斷波形量測結果。

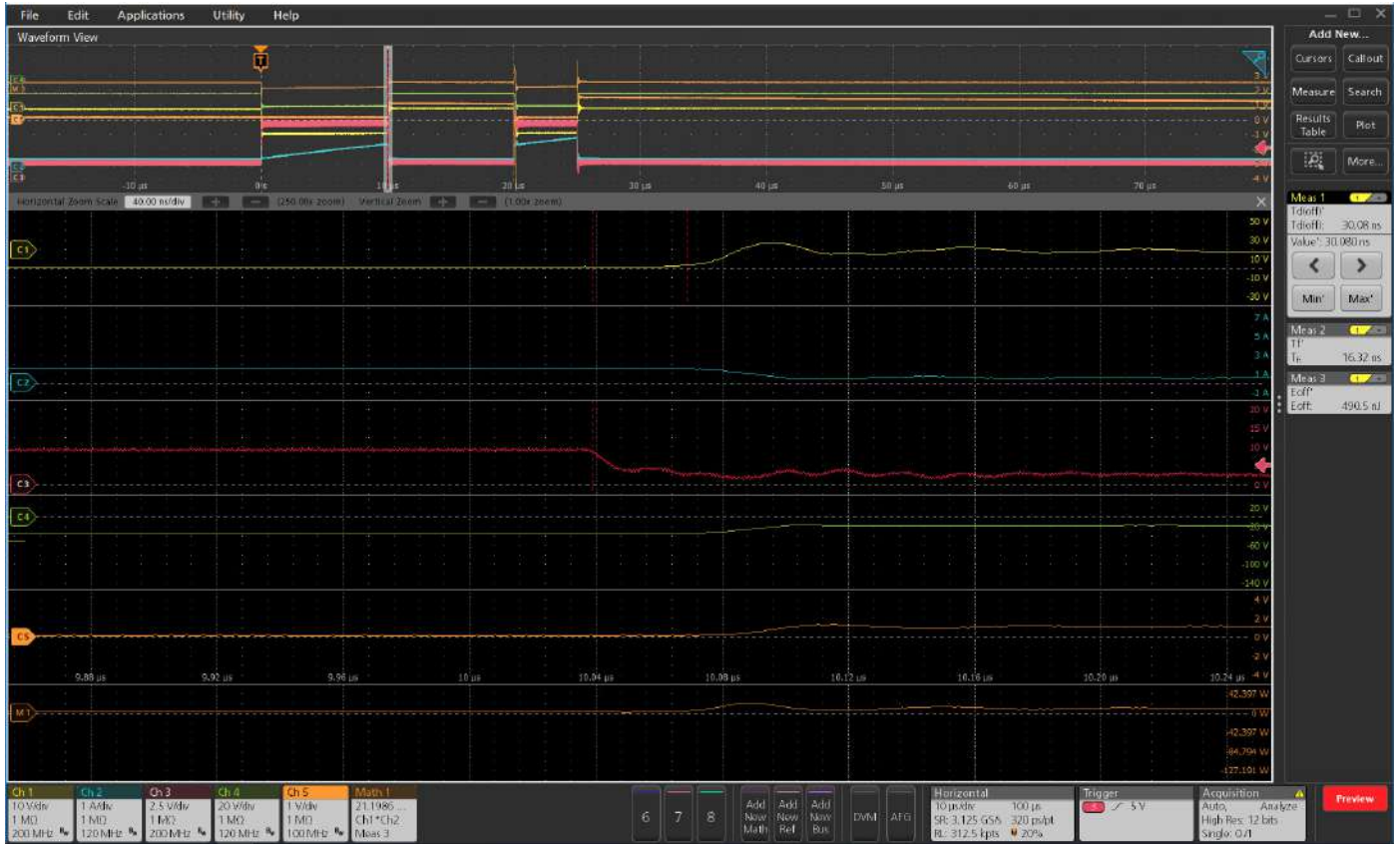


圖 22：關斷參數波形。

量測反向恢復

現在，需要量測 MOSFET 的反向恢復特性。

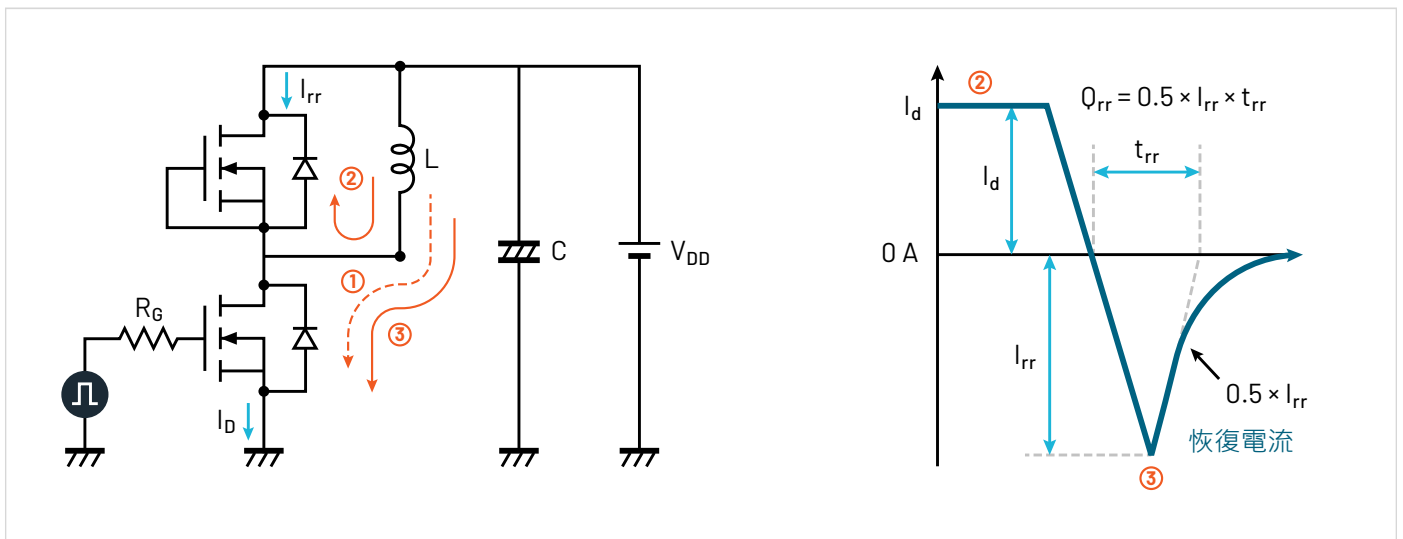


圖 23：二極體反向恢復。

反向恢復電流在第二個脈衝導通期間發生。如圖 23 所示，在相位 2 期間，二極體處於正向導通狀態。當低端 MOSFET 再次導通時，二極體應立即切換至反向阻斷狀態；但是，二極體將在短時間內處於反向狀態，這稱為反向恢復電流。此反向恢復電流會轉化為能量損耗，直接影響電源轉換器的效率。

現在，在高端 MOSFET 上進行量測。I_d 透過高端 MOSFET 和二極體兩端的 V_{sd} 量測。

圖 23 還顯示了如何檢索反向恢復參數。

- 反向恢復參數：t_{rr} (反向恢復時間)、I_{rr} (反向恢復電流)、Q_{rr} (反向恢復電荷)、E_{rr} (反向恢復能量)、di/dt 和 V_{sd} (正向接通電壓)。

然後使用以下公式計算轉換期間的能量損耗：

$$E_{rr} = \int_0^t V_{sd} I_{rr,max} dt \quad (3)$$

WBG-DPT 支援二極體反向恢復群組下的 T_{rr}、Q_{rr} 和 E_{rr} 量測。波形和擷取的結果如圖 24 所示。

多個 T_{rr} 量測值也能以重疊圖的方式顯示，並顯示具有註釋、切線和設定值的選定脈衝。

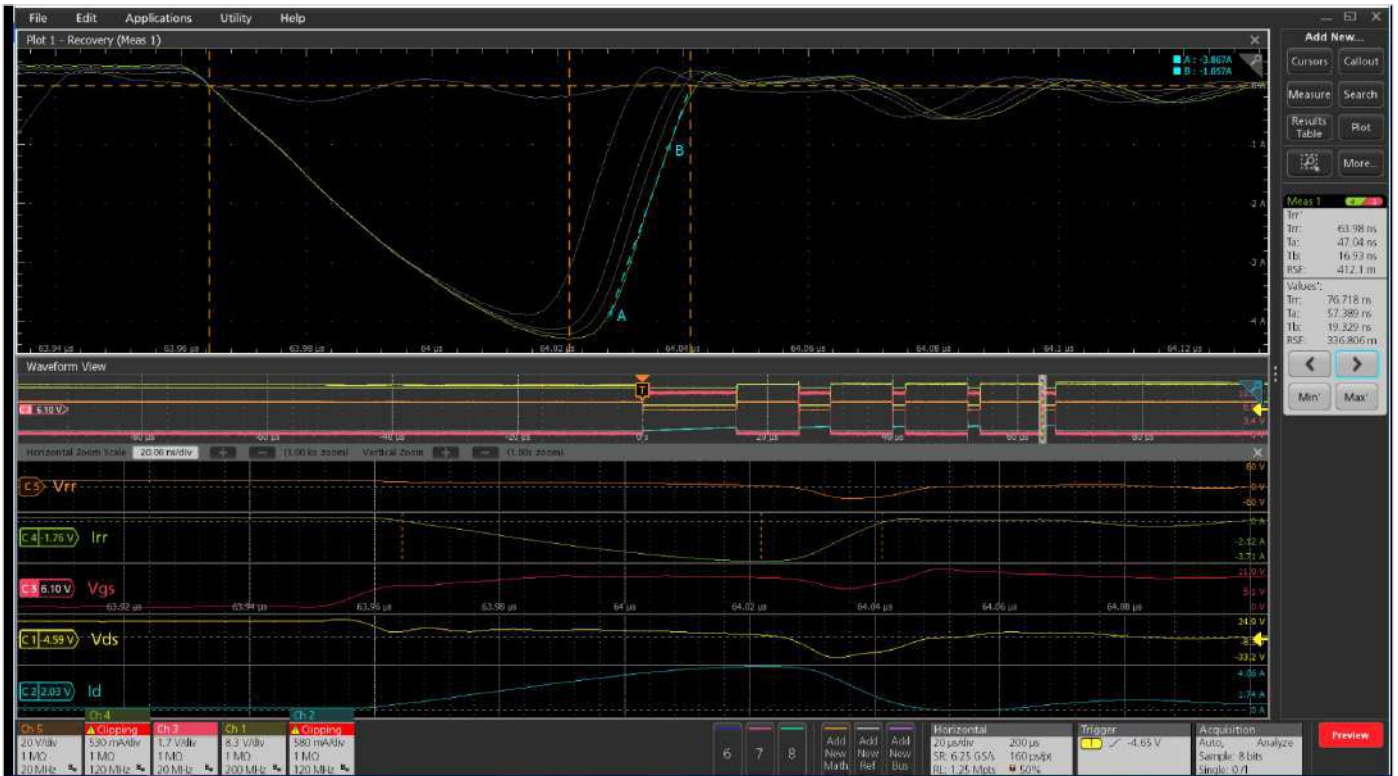


圖 24：反向恢復波形。顯示畫面頂部的波形顯示多個事件的重疊圖。切線 (A-B) 表示目前選擇進行量測的事件。

量測停滯時間

對於半橋組態中的切換裝置，一個開關必須在另一個開關閉啟之前關閉，以確保 DUT 的完整性和人員的安全。如果兩個開關同時導通，就會發生「擊穿」現象，導致故障。然而，讓兩個開關閉閉時間過長則會影響效率。因此，最佳化停滯時間是關鍵的設計目標。

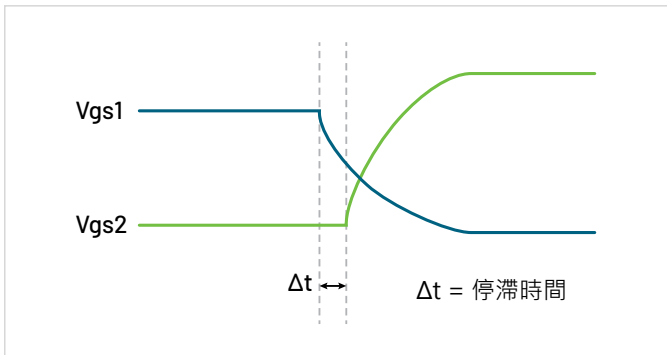


圖 25：在半橋電源轉換器中，停滯時間是一個開關元件關閉和另一個 FET 開啟之間的延遲，此處顯示為 Δt 。

停滯時間 (T_{dt}) 是一個 MOSFET 的關閉時間與另一個 MOSFET 的開啟時間之間的時間延遲，在每個 MOSFET 的閘極驅動訊號上量測。停滯時間在圖 25 中顯示為 Δt 。

WBG-DPT 應用包括自動停滯時間量測，可在「切換時序分析」標籤下找到該量測，如圖 16 所示。 T_{dt} 量測結果如圖 26 中顯示器右側的標籤所示。停滯時間是一個閘極電壓的配置下降邊緣位準與另一個閘極電壓的配置上升邊緣位準之間的時間間隔。預設上升邊緣和下降邊緣位準為 50%。量測註解 (垂直虛線) 指示閘極驅動訊號的停滯時間量測。

在某些情況下，必須對上升或下降時間較慢的波形執行停滯時間量測。在這些情況下，可以在量測中配置自訂邊緣位準。自訂位準可以是相對於波形的高位準和低位準或絕對值。

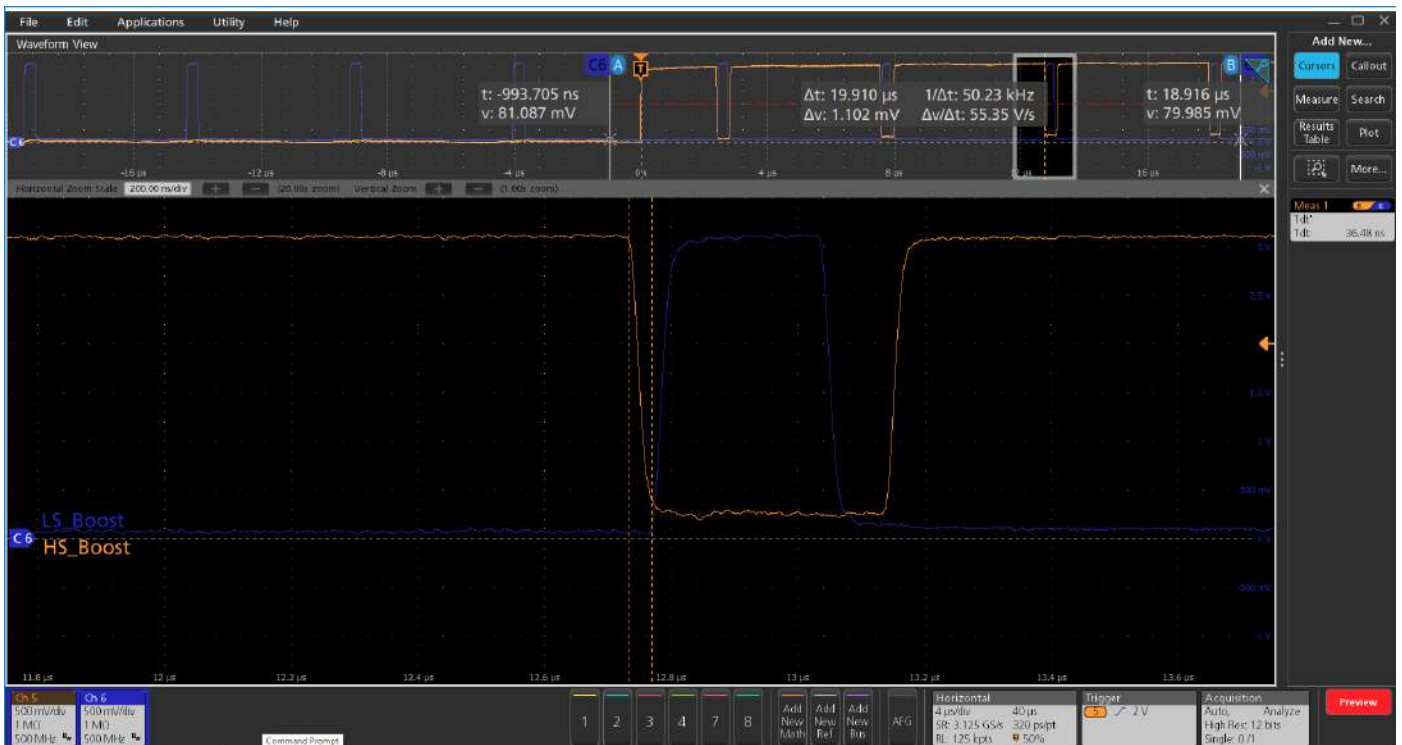


圖 26：自動停滯時間量測。通道 6 上的閘極驅動訊號 (綠色) 會關閉低端 MOSFET，然後高端 MOSFET 的閘極驅動訊號 (黃色) 會開啟高端 MOSFET。

結論

雙脈衝測試是量測切換參數和評估電源裝置動態行為的首選測試方法。使用此應用程式的測試和設計工程師非常希望瞭解功率裝置的切換、時序和反向恢復行為。該測試需要兩個具有可變脈衝寬度的電壓脈衝，由於建立具有可變脈衝寬度的脈衝的方法十分耗時，這已成為使用者的主要痛點。其中一些方法包括在 PC 上建立波形並將其上傳至函數產生器。其他方法則會使用需要大量工作和時間進行程式設計的微控制器。本應用摘要指出，Tektronix AFG31000 任意函數產生器讓您可以直接在正面顯示器上建立具有可變脈衝寬度的脈衝，顯著簡化了您的量測流程。AFG31000 上的雙脈衝測試應用程式可以快速設定和輸出脈衝，進而使設計和測試工程師可專注於收集資料和設計更高效的轉換器。

4/5/6 系列 MSO 上的 WBG-DPT 雙脈衝應用程式支援標準特定測試，可分析功率裝置的行為，同時，與手動測試相較將更加節省時間。

應用程式包括有助於擷取正確波形的預設功能、用於測試超出標準的詳細組態選項、啟用用於分析雜訊波形的訊號調節功能、提供導覽和註釋功能，並提供詳細文件，讓您輕鬆進行可重複的量測。

AFG31000 和 4/5/6 系列 MSO 上的自動雙脈衝測試設定和分析相結合，可顯著地縮短測試時間並加快下一代電源轉換器的上市時間。

參考資料

1. <https://www.tek.com/document/technical-brief/evolving-materials-and-testing-emerging-generations-power-electronics>
2. <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-power-supply-switching-loss-oscilloscope>
3. Infineon: Double Pulse Test for IGBT & FWD – Principle <https://u.dianyuan.com/upload/spa/ce/2011/07/29/1311925659-501009.pdf>
4. <https://training.ti.com/understanding-mosfet-datasheets-switching-parameters>
5. <https://www.mouser.com/datasheet/2/389/stfh10n60m2-974335.pdf>
6. https://www.st.com/resource/en/data_brief/eval6498l.pdf
7. <https://www.tek.com/datasheet/advanced-power-measurement-and-analysis>
8. <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-vgs-wide-bandgap-semiconductors>