

功率

量測與分析入門



目錄

簡介-----	3	被動元件量測值：磁力-----	12-17
電源供應器設計所面臨到量測的問題-----	3	電感基本原理	13
示波器和功率量測-----	3	使用示波器來量測電感	13
切換式電源供應器基礎-----	4	磁性功率耗損基本原理	13
電源供應器量測準備動作-----	4-8	使用示波器量測磁性功率耗損	14
一次擷取同時測得 100 伏特和 100 毫伏	5	磁性性質基本原理	15
排除電壓與電流探棒之間的誤差	6	使用示波器量測磁性品質	17
消除探棒偏移和雜訊	7	電源線量測-----	18
記錄長度在功率量測中所扮演的角色	8	電源品質量測基本原理-----	18
識別真正的 T_{on} 和 T_{off} 轉換	8	SMPS 中的電源品質量測	18
主動元件量測：切換元素-----	8-12	使用示波器量測電源品質-----	19-20
切換式裝置的功率耗損理論	8	使用正確的工具	19
關閉耗損	9	使用示波器量測電源品質	20
開啓耗損	10	結論-----	20
進一步認識 SMPS 功率耗損	10	功率量測-----	21
安全工作區	11	哪一種 Tektronix 儀器適合您的電源應用？	21
動態「導通」電阻	12	儀器應用與探棒使用-----	22-23
di/dt	12	TPS2000 系列	22
dv/dt	12	TDS3000B 系列	22
		4000 系列	23
		DPO7000 系列	23

簡介

電源供應器是把電力從一種形式轉變成另一種形式的元件、子系統或者系統；通常是把交流電 (AC) 電源轉換為直流電 (DC) 電源。不管是個人電腦、軍事設備或工業機械等電子儀器，直流電源的效能和可靠性是決定操作能否正常的關鍵。

電源供應器有多種不同的種類和大小；從傳統的類比類型到高效率的切換式電源供應器都有。而這全都面臨一種複雜、動態的操作環境。各種情況下的裝置負載和需求均不同。就算是一個日用的切換式電源供應器，也必須能夠在突然遠超過平常操作水準的尖峰供電量中存活下來。設計電源供應器的工程師或是使用電源供應器的系統，必須瞭解他們的產品在條件從靜止到最壞情況中的反應。

在過去，描述電源供應器的反應，表示著需使用數位電表量測靜態電流和電壓，並以計算機或者電腦進行艱深的運算。今天大多數工程師轉向使用示波器作為他們優先考慮的功率量測平台。現今的示波器可配備整合式功率量測功能和分析軟體，因而簡化了量測過程。使用者能自訂關鍵參數、自動化計算並在數秒鐘內看到結果，且不只是粗略的數字。

本入門將著重於以示波器和特定應用軟體所設計的切換式電源供應器量測。

電源供應設計所面臨到量測的問題

理想中，每部電源供應器的運作情形，都應與用以設計的數學模型相同。但是在現實世界裡，元件並不會相同；負載會變化、線路功率可能失真、環境變化會改變效能。而且，效能的改變和成本需求使得電源供應器的設計更為複雜。細想一下這些問題：

- ▶ 電源供應器能承受超過計算負載量多少的瓦數，而且能承受多久？
- ▶ 供電時散發出多少熱量、過熱時會發生什麼事、又需要多少冷卻氣流？
- ▶ 負載嚴重超出時會發生什麼事？裝置能夠維持預估的輸出電壓嗎？輸出發生短路時供應器會產生什麼反應？
- ▶ 供應器的輸入電壓改變時會發生什麼事？

設計工程師被要求做出比較省空間、降溫、減少生產成本和達到更嚴苛 EMI/EMC 標準的供應器。只有嚴苛的量測才能將工程師導向這些目標。

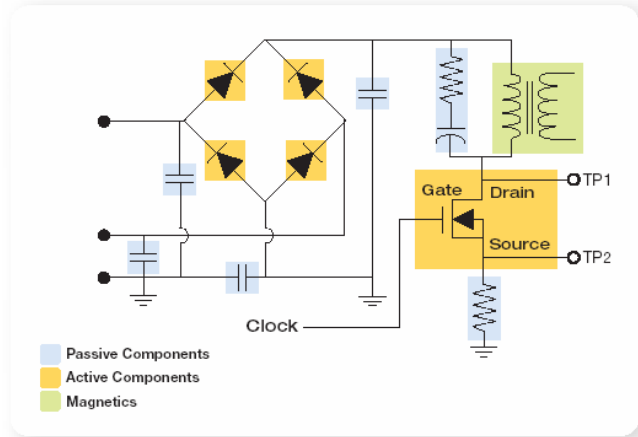
示波器和功率量測

對於那些習慣用示波器做高頻寬量測的人來說，低頻率的功率量測看起來似乎很簡單。實際上，功率量測包含了很多高速電路設計工程師永遠不需面臨的挑戰。

切換裝置的電壓可能非常的大，且它還是「浮接的」，表示沒有接地。訊號的脈波寬度、週期、頻率和工作週期都是有變化的。波形必須準確的紀錄並分析出瑕疵。

功率量測與分析

► 入門



► 圖 1. 簡化的切換式電源供應器線路圖。

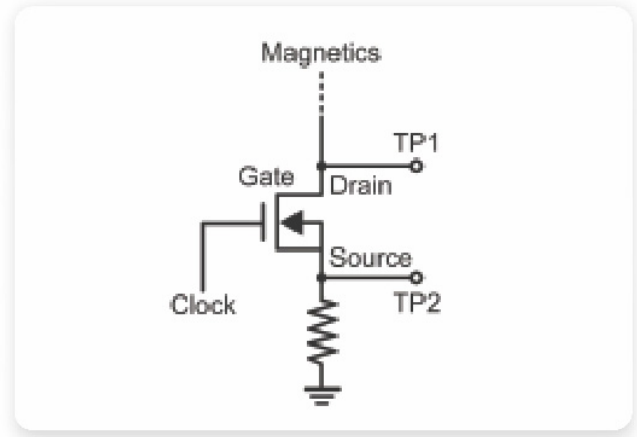
這些要求對示波器的規格是很嚴厲的。且同時需要多種探棒類型 — 單端、差動和電流探棒。儀器必須要有超長記憶體以便用來長時間擷取低頻率訊號。而且它可能被要求在一次擷取中捕捉大量不同刻度的訊號。

切換式電源供應器基礎

現代最普遍的直流電源供應器構造是切換式電源供應器 (SMPS)，它能有效率地處理負載的變化。SMPS 電源的一般訊號路徑包含了被動、主動和磁性元件。SMPS 儘可能少用類似電阻器和線性模式電晶體等耗損性元件，而著重於那些 (理想上) 低失真的元件：切換式電晶體、電容和磁鐵。

SMPS 裝置也有一個控制區段，包含了像是脈波寬度調變調節器、脈波速率調變調節器和反饋迴路¹等元件。控制區段可能有它們自己的電源供應器。圖 1 是一張簡化的 SMPS 線路圖，顯示包含了主動，被動，和磁性元件的電力轉換區段。

¹ 本入門討論的是有關電源路徑的量測，包括幫助輸出的內部元件量測。控制區段量測是以比較傳統的波形和邏輯為基礎的觀察且不包含在這份文件中。



► 圖 2. MOSFET 切換裝置，顯示量測點。

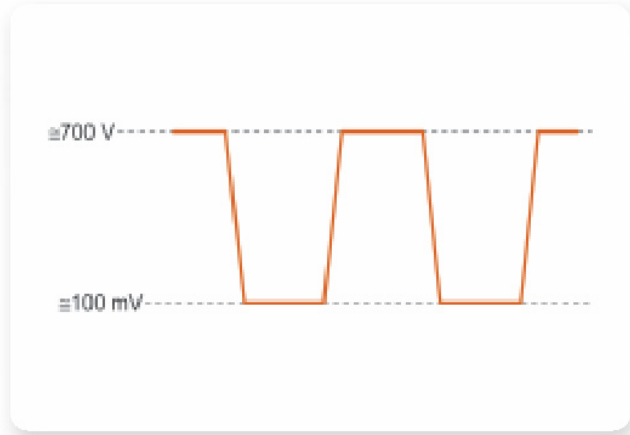
SMPS 技術是以 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET) 和 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT) 等電子半導體切換裝置為基礎的。這些裝置提供快速的切換時間並且能禁得住不穩定電壓尖波。同樣重要的是，這些裝置無論在開啓或關閉的狀態都僅耗損極少電源，可在獲得高電力效率的同時達到降溫的目的。大體上來說，切換裝置決定了 SMPS 整體的效率。切換裝置的關鍵量測包括了：切換耗損、平均功率耗損、安全工作區域和其他。

電源供應器量測準備動作

為切換式電源供應量測作準備時，因為工具的運轉必須很準確且能重複使用，所以選擇正確的工具來架設是很重要的。

示波器理所當然的必須備有基本的頻寬和取樣率以使用來處理 SMPS 內的切換頻率。功率量測需要至少兩個通道，一個給電壓，一個給電流。使功率量測更簡單和可靠的設備同樣重要。下列是一些注意事項：

- 儀器有沒有提供在擷取中同時處理切換裝置「開啓」和「關閉」電壓的方案？這些訊號的比率可能是 100,000:1。



► 圖 3. 切換裝置上的一般訊號。

- 有沒有可靠且準確的電壓和電流探棒可供使用，且有沒有方便的工具解決他們不同延遲的方法？
- 有沒有有效的處理方式來將探棒中的靜態雜訊減到最低？
- 儀器有沒有辦法配備足夠的記憶長度以使用高取樣率來擷取長 line-frequency 波長？

這些特性構成有意義且有效率的電源供應設計量測的基礎。

一次擷取同時測得 100 伏特和 100 毫伏

若要透過切換裝置來量測切換耗損和平均功率耗損，示波器必須先分別判讀開啓和關閉期間通過切換裝置的電壓。

在 AC/DC 轉換器中，通過切換裝置的電壓範圍會有很大的動態變化。開啓狀態期間，通過切換裝置的電壓需視切換裝置的類型而定。圖 2 所示的 MOSFET 中，開啓的電壓是波道電阻和電流的產物。在 Bipolar Junction Transistors (BJT) 和 IGBT 裝置中，電壓主要是依據飽和電壓下降 (VCE_{sat})。



► 圖 4. DPOPWR 輸入頁，可讓使用者輸入 RDS_{ON} 和 VCE_{sat} 的資料表單值。

關閉狀態的電壓則是依據操作輸入的電壓和切換式轉換器的拓樸。一般專為電算設備所設計的 DC 電源都可以在一般用途的電壓上操作 (從 $80 V_{rms}$ 到 $264 V_{rms}$)。在最大輸入電壓下，通過切換裝置 (TP1 與 TP2 之間) 的關閉狀態電壓可高達 750 伏特。在導通狀態下，通過相同端子的電壓範圍可從數毫伏到大約一伏特。圖 3 顯示切換裝置上一般訊號的特色。

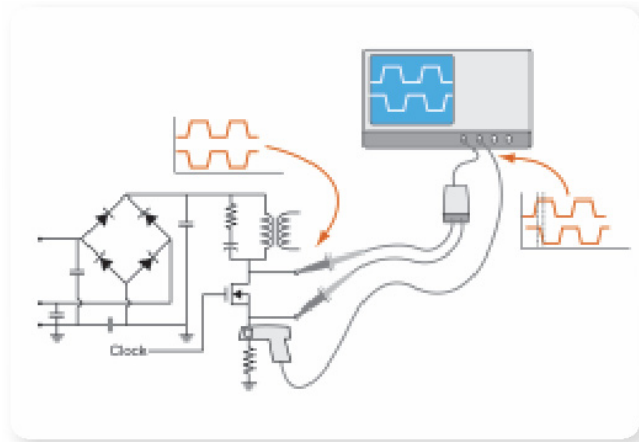
必須先量測這些關閉和開啓的電壓，才能在切換裝置上精確地量測功率。但是一般 8 位元的數位示波器缺少動態的範圍，無法 (在同一量測週期中) 精確地測得開啓期間的毫伏範圍訊號，以及關閉期間的高電壓。

若要擷取這個訊號，示波器的垂直範圍可設為每格 100 伏特。在這樣的設定下，示波器將可接受高達 1000 伏特的電壓；因此，不需要加強示波器，即可取得 700 伏特的訊號。使用這種設定的問題，就是最高靈敏度 (其可解析的最小訊號振幅) 為 $1000/256$ ，或大約 4 伏特。

Tektronix 以 DPOPWR 應用程式的功能來解決這個問題，它可以讓使用者從裝置資料表單將 RDS_{ON} 或 VCE_{sat} 值輸入圖 4 中所示的量測功能表。另外，如果所測得的電壓是在示波器的靈敏度範圍內，DPOPWR 就可以使用所擷取的資料來計算，不需手動輸入那些值。

功率量測與分析

► 入門



► 圖 5. 傳輸延遲對功率量測的影響。

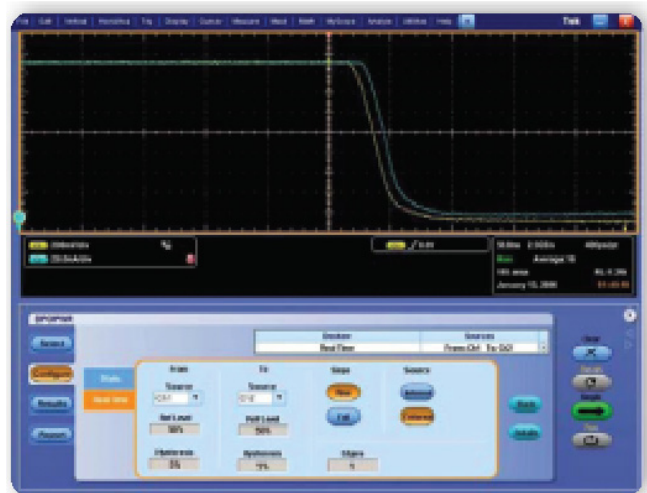
排除電壓與電流探棒之間的誤差

若要以數位示波器來量測功率，則必須量測通過 MOSFET 切換裝置之漏極到源極的電壓和電流 (如圖 2 所示)，或是通過 IGBT 之集極到射極的電壓。這項作業需要二種不同的探棒：高壓差動探棒和電流探棒。電流探棒通常是非破壞性的「霍爾效應」類型。這二種探棒都有自己特殊的傳輸延遲。這二種延遲之間的誤差會導致振幅和與時間相關的量測不準確。

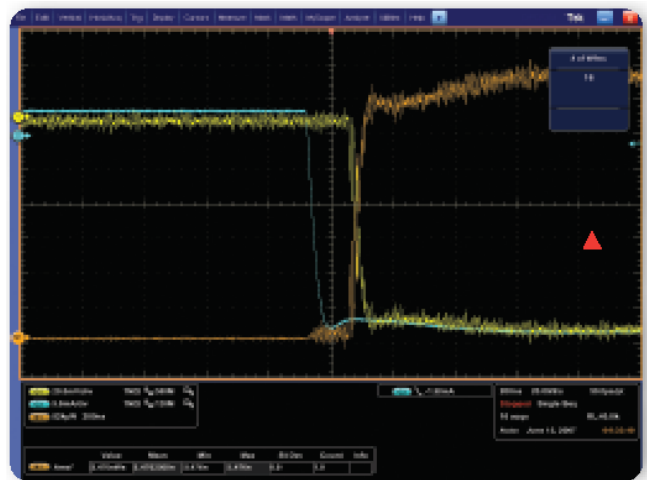
瞭解探棒傳輸延遲對最高功率峰值和區域量測的影響是很重要的。畢竟功率是電壓和電流的產物。如果這二個被乘數不完全一致，結果就會錯誤。如果沒有適當地校準探棒之間的誤差，量測值 (例如切換耗損) 就會不準。

圖 5 所顯示的測試安裝比較了探棒頂端 (顯示在下面的軌跡) 和傳輸延遲之後示波器前面板 (顯示在上面) 上的訊號。

圖 6 到 9 是實際的示波器檢視畫面，以示範探棒誤差的結果。與 DUT 的連線是以 Tektronix P5205 1.3 kV 差動探棒和 TCP0030 AC/DC 電流探棒來連接的。電壓和電流標準訊號則是由校正器所提供。



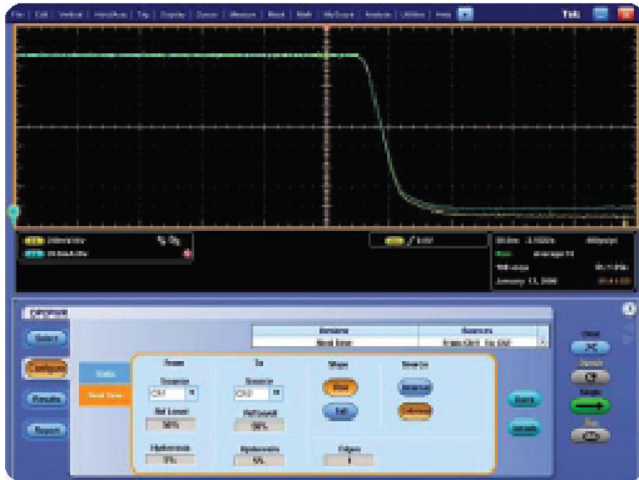
► 圖 6. 電壓與電流訊號之間的誤差。



► 圖 7. 含誤差的高峰振幅和區域量測顯示 6.059 瓦特。

圖 6 顯示電壓和電流探棒之間的誤差，圖 7 則是顯示在沒有先校準二個探棒差異的情況下，所得到的量測結果 (6.059 毫瓦)。

圖 8 顯示校準探棒結果。這二個參考軌跡重疊，表示延遲的情況已相等。圖 9 中的量測結果顯示出適當校準的重要性。如同該範例所證實的，誤差導致量測錯誤的比例將近 6%。精確的校準可降低峰對峰功率耗損量測的錯誤。



▶ 圖 8. 校準之後的電壓和電流訊號。

DPOPOWER 功率量測軟體會自動校準所選擇的探棒組合。該軟體會利用通電中的電流和電壓訊號，來除去電壓和電流探棒之間的傳輸延遲差異，以控制示波器，並調整電壓和電流波道之間的延遲。

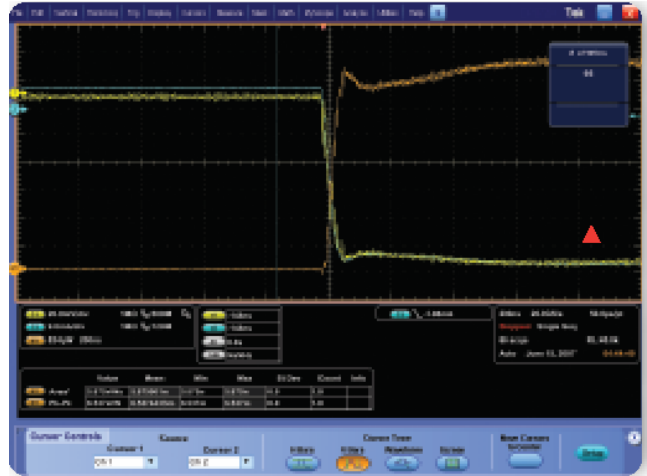
另外還有一種靜態校準功能，但需要特定電壓和電流探棒具有持續且可重複的傳輸延遲。靜態校準功能會依據內含的選定探棒傳輸時間表（例如本文件常談到 Tektronix 的探棒），自動調整選定電壓和電流波道之間的延遲。這項技術提供快速又簡單的方法來簡化校準的工作。

消除探棒偏移和雜訊

差動與電流探棒可能會有輕微的偏移。在進行量測前應除去偏移，以免影響精確度。有些探棒具有自動化的內建方法來除去偏移，其他探棒則可能需要手動程序來除去偏移。

自動消除偏移

配備 TekVPI™ 探棒介面的探棒，可與示波器搭配使用，以消除訊號路徑中的所有 DC 偏移錯誤。按 TekVPI™ 探棒上的功能表按鈕，會在示波器上出現探棒控制對話方塊，顯示 AutoZero 功能。



▶ 圖 9. 校準之後的高峰振幅和區域量測。與圖 7 中的結果比較。

選擇 AutoZero 選項，將自動消除量測系統中的 DC 偏移錯誤。TekVPI™ 電流探棒在探棒體上也有 Degauss/AutoZero 按鈕，按下 AutoZero 按鈕，將消除所有量測系統中出現的 DC 偏移錯誤。

手動消除偏移

大部分的差動電壓探棒都有內建的 DC 偏移修正控制功能，讓消除偏移的程序變得更簡單。暖機之後：

- ▶ 設定示波器來量測電壓波形的平均值。
- ▶ 選取要用於實際量測的靈敏度（垂直）設定。
- ▶ 在沒有訊號的情況下，將修正器調整為空值，將平均級數調整為 0 伏特（或是盡量接近 0 伏特）。

同樣地，在執行量測之前，也必須調整電流探棒。消磁之後：

- ▶ 將示波器設定為要用於實際量測的靈敏度。
- ▶ 在沒有訊號存在的情況下，關閉電流探棒。
- ▶ 將 DC 平衡調整為空值。
- ▶ 將平均值調整為 0 安培，或是盡量接近 0 安培。

功率量測與分析

► 入門



► 圖 10. TDSWPWR3 軟體功能表上的訊號調節選項。此選項會在切換裝置「關閉」期間，將電流設為零。

請注意，這些探棒都是作用中的裝置，而且即使是在沒有活動的狀態下，還是會有低度的雜訊存在。這個雜訊會影響以電壓及電流波形資料為依據的量測值。DPOPOWER 軟體包含訊號調節功能 (圖 10)，可降低探棒固有雜訊的效應。

記錄長度在功率量測中所扮演的角色

示波器在一段時間內擷取事件的功能，取決於所使用的取樣率，以及儲存所收到之訊號取樣的記憶體深度 (記錄長度)。記憶體會直接以取樣率的比例來填滿。若取樣率的設定值夠高，足以提供詳細的高解析度來檢視訊號，則記憶體很快就會填滿了。

就許多 SMPS 功率量測來說，都必須擷取四分之一或二分之一週期 (90 或 180 度) 的電源頻率訊號；有些甚至需要一整週期的電源頻率訊號。目標是要累積足夠的訊號資料，以支援用來抵抗線性電壓變異效應的計算作業。

Tektronix DPO7000 系列示波器最多可設定 20,000 萬點的記憶體深度。這樣足夠的記憶體就能依適當的取樣率來儲存所需的電源頻率訊號量。

識別真正的 T_{on} 和 T_{off} 轉換

若要準確地判斷切換轉換中的耗損，則必須先過濾出切換訊號中的震盪頻率。在開啓或關閉轉換的切換電壓訊號中，很容易弄錯震盪頻率。這個高階的震盪頻率是當 SMPS 在其非連續電流模式 (DCM) 和連續電流模式 (CCM) 之間切換時，由電路中的寄生元素所造成的。

圖 11 以簡化的形式來標示切換訊號。震盪頻率會讓示波器很難識別真正的「開啓」和「關閉」轉換。

其中一種解決的方法，就是預先定義邊緣識別、參考位準和磁滯位準的來源，如圖 12 所示。根據訊號的複雜度和量測需求，可能可以使用所量測的訊號本身來作為邊緣位準的來源。此外，也可以指定其他無雜訊的訊號。

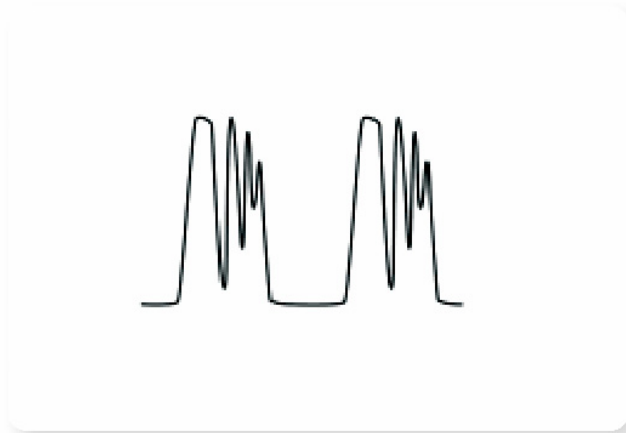
在某些切換電源的設計中，例如主動功率因數修正轉換器，震盪的情形可能更嚴重。當切換電容開始與濾波器電感共振時，DCM 作業會大量增加震盪頻率。只是設定參考準位和磁滯可能不足以識別真正的轉換。

在此情況下，切換裝置的閘極驅動訊號 (同圖 1 和 2 所顯示的 CLOCK 訊號) 可精確找出真正的開啓和關閉轉換 (如圖 13 所示)。這只是針對閘極驅動訊號來適當設定參考和磁滯位準的問題。

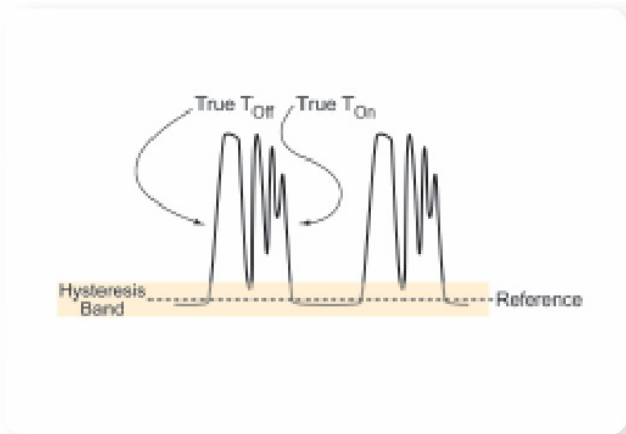
主動元件量測：切換元素

切換式裝置的功率耗損理論

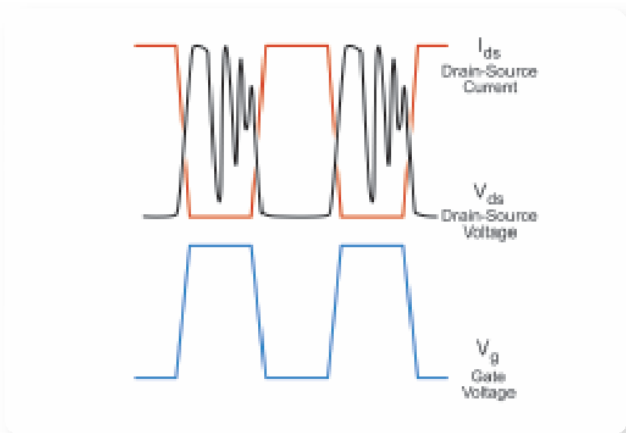
電晶體切換電路會在轉換期間耗損能量，因為在切換期間，會釋放二極體儲存的電能，並釋放寄生電感及電容中的能量。「開啓耗損」是指當切換裝置從「關閉」轉換成「開啓」時的能量耗損。「關閉耗損」是指當裝置從「開啓」轉換成「關閉」時的耗損。



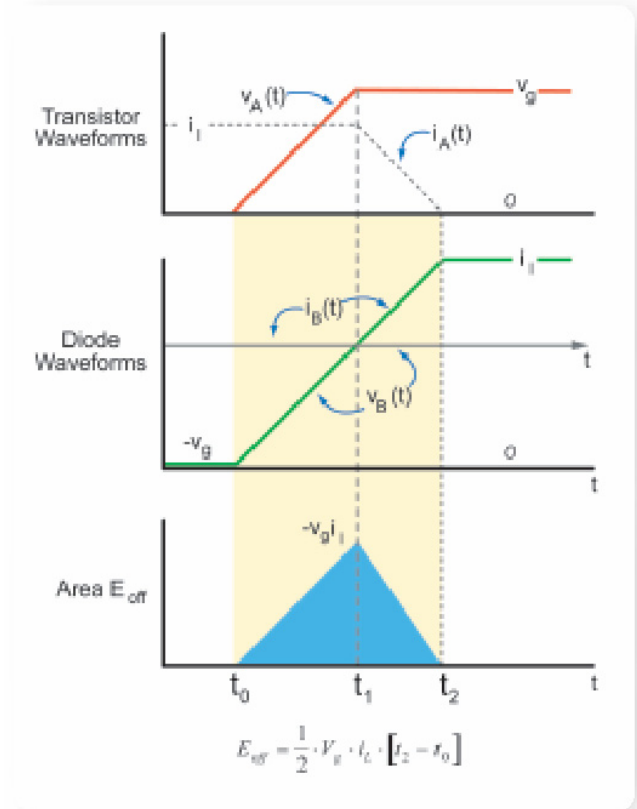
► 圖 11. 切換裝置上的一般訊號特色。



► 圖 12. 這個訊號特色的一般參考位準和磁滯位準。



► 圖 13. 用來識別 T_{on} 和 T_{off} 轉換的開極訊號 V_g 。



► 圖 14. 計算關閉耗損。

關閉耗損

圖 14 以圖解來說明關閉耗損的計算。

t_1 之後，切換電流下降，二極體電流上升。時間 $(t_2 - t_1)$ 取決於驅動程式為 MOSFET 之開極－漏極電容器 C_{gd} 充電的速度有多快。

轉換期間的能量耗損以下列等式來表示：

$$E_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_g \cdot i_L \cdot [t_2 - t_0]$$

這個公式假設電壓的線性上升是透過 C_{ds} (從漏極至源極的電容) 和 C_{gd} 。 C_{ds} 和 C_{gd} 是寄生電容。

功率量測與分析

► 入門

在實際的裝置中，電容 C_{gd} 和 C_{ds} 是高度非線性的，會依漏極至源極的電壓而有所變化。在某個程度上，這和剛才所看到的理論式計算是不同的。就 IGBT 的例子來看，會因為末端電流現象的關係，而導致電流的下降時間更高。因為這些差異，而使得擷取電壓變化的實際設定更形重要。若示波器具有專用功率量測軟體，則可大大地簡化這些量測作業。

開啓耗損

圖 15 顯示在內含電容負載以及具有二極體復原充電功能的 MOSFET 中，其開啓耗損的情形。

當 MOSFET 是以內含電容負載的方式來開啓時，則要等到所儲存的電能回復時，二極體電壓才會增加。因此，二極體電壓會繼續以負極方向來傳導電流，直到它能夠阻斷電壓。這樣會導致切換時大量耗損。反向的復原電流取決於二極體路徑中的外部電路。二極體中的電能取決於順向式電流，以及在二極體關閉轉換期間下降電流的 di/dt 。

總耗損量為切換裝置中的平均功率耗損量。這包括切換耗損和傳導耗損。在總耗損量的計算公式中，

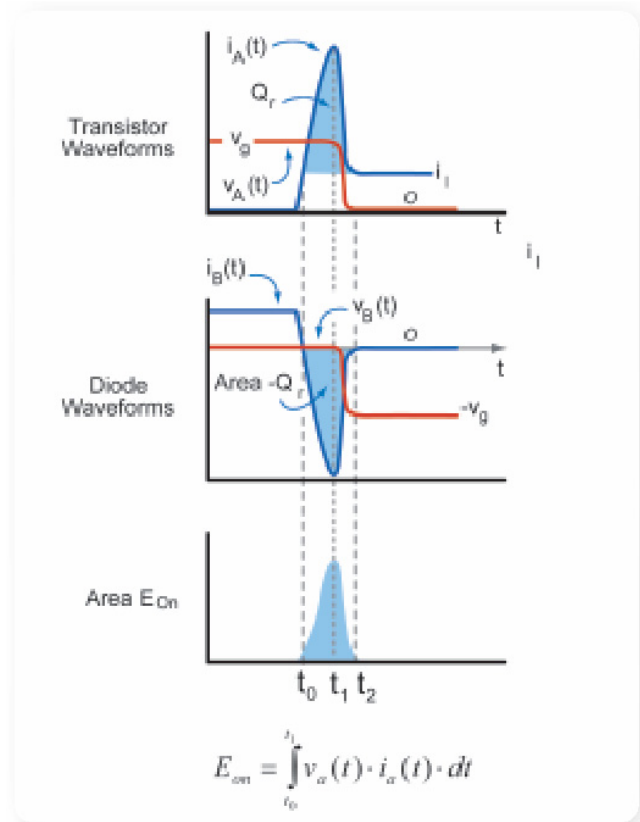
$$P_{Loss} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} V_{switch}(t) \cdot I_{switch}(t) \cdot dt$$

$V_{switch}(t)$ 和 $I_{switch}(t)$ 分別是通過切換裝置的即時電壓和電流。

進一步認識 SMPS 功率耗損

在輸出功率高達 150 瓦的許多切換式電源中，以非連續電流模式來使用「返馳式 (Flyback)」拓樸是很常見的事。「返馳式」轉換器會將輸入負載能量儲存在電感器中，而電感器亦提供輸入/輸出隔離。因為當切換裝置「開啓」時，電感器與切換裝置之間的電流會轉換，所以大部分的耗損都是發生在切換裝置。圖 16 描繪在使用返馳式 (Flyback) 拓樸的 SMPS 裝置中，常見的切換裝置訊號特色。

² 簡化並修改自一份標題為“Fundamentals of Power Electronics”的報告，作者為科羅拉多大學的 Robert A. Erickson。

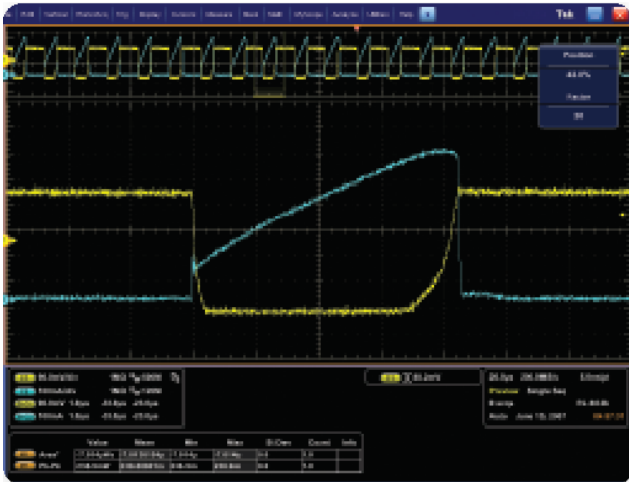


► 圖 15. 內含電容負載之 MOSFET 中的開啓耗損²。

這個例子是假設使用 DPOPWR。該應用程式可以讓使用者輸入電壓參數，以及過濾使用中 DUT 需求相符的設定值。

可靠、準確的量測始於定義參考位準，以尋找切換電壓訊號中的真正 T_{on} 和 T_{off} 邊緣。在此例中，參考位準約設定在 150 伏特，磁滯位準約在 25 伏特。設定在 150 伏特，會比較容易識別真正的 T_{on} 和 T_{off} 轉換作業。此外，150 伏特的位準亦可排除任何震盪。

如前面所說明的，示波器的垂直範圍設定為 100 V/div，以擷取切換電壓波形。以這麼高的設定值，示波器 (任何數位示波器) 的動態範圍都不足以解析顯示在同一訊號中的飽和電壓。在這裡，DPOPWR 使用者輸入功能是很有用的。



▶ 圖 16. 返馳式拓樸中之切換裝置的一般訊號特色。

MOSFET 的輸入值 $R_{DS(on)}$ 或 BJT/IGBT 的輸入值 $V_{CE(sat)}$ 可取自切換裝置的資料表單，也可手動輸入。應用程式會使用這些數據來計算總耗損量。

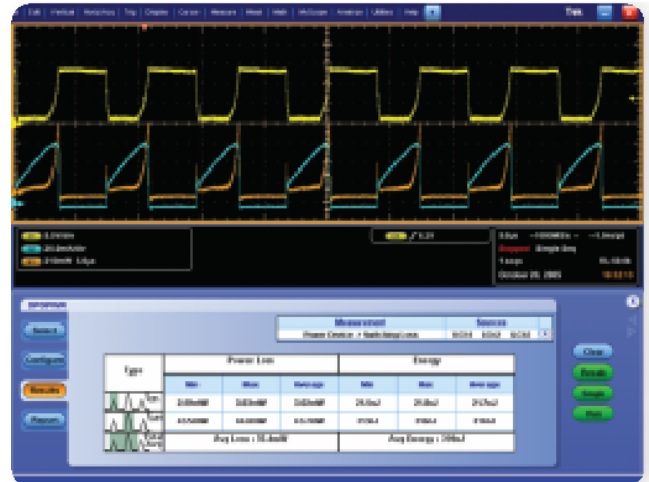
在切換訊號的「關閉」階段期間，可以看見震盪和雜訊的狀態。當然，這些效應都必須降至最低。同樣地，DPOPWR 還是有解決方法。其訊號的調節和平緩（過濾）功能可使雜訊的影響降到最低，並增加量測的準確度。

圖 17 顯示 DPOPWR 自動產生的功率量測結果。

為得到準確的結果，量測作業會儘可能包含所量測之訊號的整個功率線性週期。此外，也應該要取得電壓和電流訊號及其垂直範圍設定值，所量測的訊號才能夠至少涵蓋六個垂直格。如此才能善用示波器之類比數位轉換器 (ADC) 的動態範圍。

安全工作區

切換裝置的「安全工作區 (SOA)」量測標示出電壓和電流，以描繪該裝置的作業區域。通常針對電源可能遇到的不同操作狀況，來建立 SOA 標示圖，是很有用的。



▶ 圖 17. 切換裝置功率耗損量測結果。

切換裝置製造商的資料表單會概述該切換裝置的特定限制。目的就是要確定切換裝置能夠接受電源必須在其使用者環境中處理的作業限制。SOA 測試變數可能包含各種負載狀況、工作溫度的變化、高低線性輸入電壓等等。

SOA 測試通常會使用下列等式來計算「功率值」：

$$P_n = V_n I_n$$

其中：

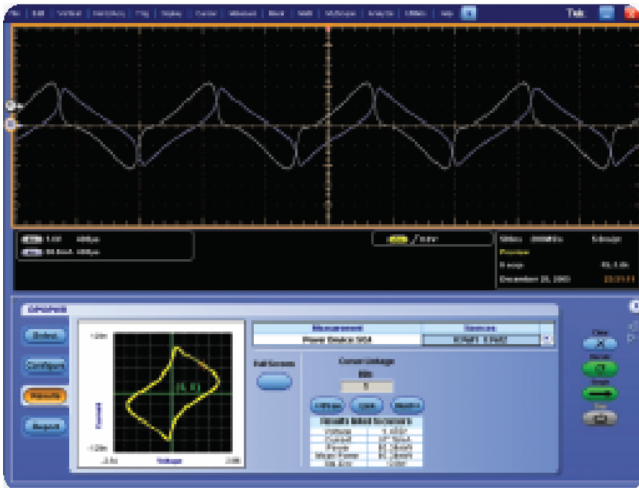
- ▶ P_n 是即時功率值
- ▶ V_n 是電壓值
- ▶ I_n 是電流值
- ▶ n 是特定端點的樣本

下列等式可計算「平均功率」：

$$P_{Avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N} V_n I_n$$

其中：

- ▶ N 是標示圖中擁有相同值的樣本數



► 圖 18. 這個範例來自 DPOPWR，說明 SMPS 的 SOA 標示圖。該標示圖可與切換裝置製造商所公佈的資料做比較。

圖 18 是以 DPOPWR 應用程式來取得的 SOA 標示圖。

動態「開啓」電阻

動態「開啓」電阻是當切換裝置處於「開啓」狀態時，所產生的電阻。有時可根據切換裝置製造商的資料表單，使用這個值來幫助修正 $R_{DS(on)}$ 值。當訊號的動態範圍超出時，這可以幫助更準確地量測出功率的耗損量（請參閱先前有關功率耗損量測的討論）。

di/dt

di/dt 量測代表切換期間的電流變更率。下列等式可計算 di/dt 值：

$$\frac{di}{dt} = \frac{\sum (x_2 - \bar{x}_1) x(y_1 - \bar{y}_1)}{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2}$$

其中：

- x = 時間值
- y = 波形資料的垂直值
- d 或 delta 這二個術語代表變更，所以 di 是指變更電流

dv/dt

dv/dt 代表切換期間的電壓變更率。下列等式可計算 dv/dt 的值：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum (x_2 - \bar{x}_1) x(y_1 - \bar{y}_1)}{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2}$$

其中：

- x = 時間值
- y = 游標之間的波形資料垂直（電壓）值

被動元件量測值：磁力

被動元件就是沒有放大或切換訊號的元件。電源會使用完整範圍的被動元件，例如電阻器和電容器，但是從量測的角度來看，主要焦點是在磁性元件上（磁力），尤其是電感器和變壓器。電感器和變壓器都是以銅線纏繞鐵線圈心而成。

電感器會隨著頻率增加阻抗，高頻率時的阻抗大於低頻率時的阻抗。如此可以讓它在電源輸入及輸出時，能夠用來過濾。

變壓器將電壓和電流從一次側連結到二次側，以增加或減少訊號訊號位準（電壓或電流其中之一，不會二種同時進行）。因此，變壓器可以在一次側接受 120 伏特，然後在二次側減少為 12 伏特，並且在二次側增加成比例的電流。請注意，這不能視為增強，因為訊號的淨功率並沒有增加。由於變壓器的主要和二次側並不導通，所以也會用它們來隔離電路元素。

可以幫助判斷電源效能的部分量測值包括：

- 電感
- 功率耗損（磁力）
- 磁性

電感基本原理

電源供應器使用電感做為能源儲存裝置、濾波器或變壓器。電感被當作變壓器使用時，可協助維持切換式電力系統中的震盪。設計工程師必須監視此裝置在特定操作條件下的反應。電感值會隨著電流和電壓源、激發訊號、波形和工作的頻率而改變。

電感的定義為：

$$L = \frac{\int -Vdt}{I} \text{ Henry}$$

其中：

- ▶ L 為電感
- ▶ V 為整個電感的電壓
- ▶ I 是通過電感的電流
- ▶ dt 是訊號的變化率；斜率

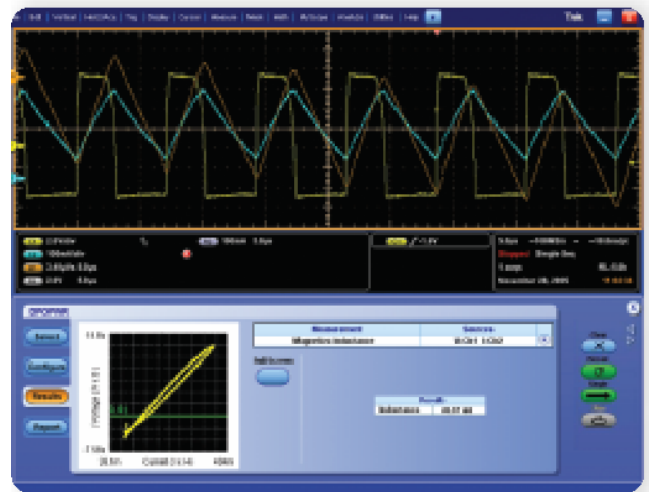
電感量測設備有數種不同的類型。過去這些設備量測電感的方式，是讓電感接收已知的激發 (刺激) 訊號。

以 LCR 計量器為例，它使用內建的訊號產生器激發受測的電感，然後使用橋式平衡技術來量測裝置的阻抗。LCR 計量器使用正弦波波形做為信號源。

但在實際的電源供應器中，訊號是一個高電壓、高電流的方波。因此為取得較精確的圖像，大部分電源供應器的設計工程師都寧願選擇觀察電感在電源供應器的動態變更環境中的反應。

使用示波器來量測電感

現用電源供應中用於量測電感最方便的工具為示波器，如配備有 DPOPWR 功率量測軟體的 Tektronix DPO7000 系列示波器。電感量測本身就像探查磁性元件的電壓和所通過電流一樣簡單，很像之前所描述的切換裝置量測。



▶ 圖 19. DPOPWR 應用軟體所產生的電感量測。

圖 19 所示為這類電感量測的結果。此處軟體已計算出電感為 58.97 微亨 (microhenry)。

磁性功率耗損基本原理

磁性功率耗損會影響電源供應器的效率、可靠度和熱效能。與磁性元件相關的功率耗損有兩種：鐵心耗損和銅耗損。

鐵心耗損：鐵心耗損包含磁滯耗損和渦流耗損。磁滯耗損為工作頻率和 AC 磁通量擺幅的函數。與 DC 磁通量完全無關。每單位體積的磁滯耗損以下列方程式來表示：

$$P_{Hyst} = \int H \cdot dB$$

其中：

- ▶ P_{Hyst} 為每單位體積的磁滯耗損。
- ▶ H 為磁場強度。
- ▶ B 為磁通量密度。

您可以使用鐵心製造商的产品規格表 (如圖 20 所示) 來計算鐵心耗損。此處製造商已指定在 I 和 III 象限作業中之正弦波激發的耗損。此外製造商也指定了一個經驗關係式，以計算在不同的 AC 磁通量密度和頻率下的鐵心耗損。

功率量測與分析

► 入門

銅耗損：造成銅耗損的原因是因為銅線圈中的電阻。銅耗損的定義為：

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_{wdg}$$

其中：

- P_{cu} 為銅耗損
- I_{rms} 為通過磁性元件的 rms 電流
- R_{wdg} 為線圈電阻。此電阻會隨著 DC 電阻、集膚效應和鄰近效應而改變。

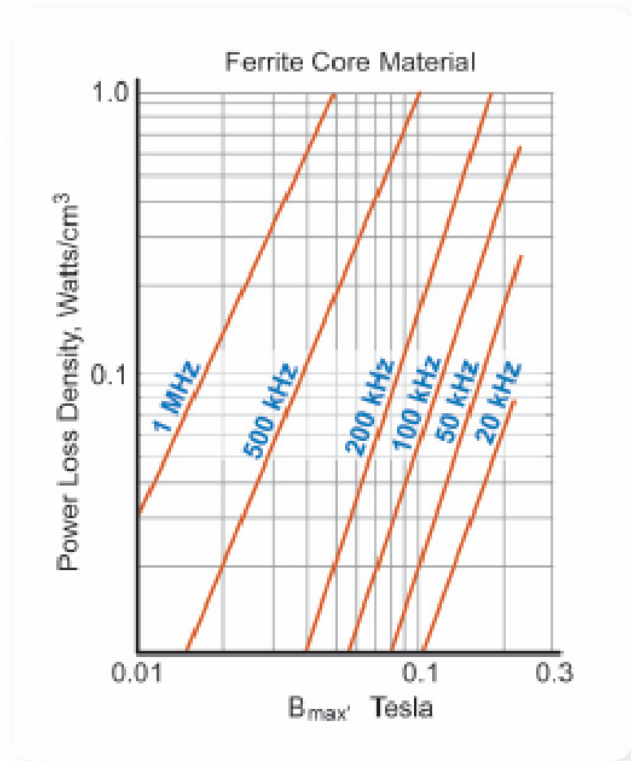
使用示波器量測磁性功率耗損

您可以利用鐵心廠商產品規格表中所提供的資訊，以及執行示波器中功率量測軟體所產生的結果，快速推導出總功率耗損和鐵心耗損的值。然後使用這兩個值來計算銅耗損。知道不同的功率耗損元件後，便可以找出磁性元件造成功率耗損的原因。

磁性元件功率耗損的計算方式，有部分會受到所量測元件的類型所影響。受測裝置可能是單線圈電感、多線圈電感或變壓器。圖 21 所示為使用 DPOPWR 軟體量測單一線圈電感的結果。

波道 1 (黃色軌跡) 整個電感的電壓，而波道 2 (藍色軌跡) 則是電流，量測的方式是以非破壞式的電流探棒穿過電感來量測。DPOPWR 軟體會自動計算和顯示功率耗損圖，如此處所顯示的 173.95 毫瓦。

DPOPWR 軟體還提供閘選量測，以處理非週期性的波形或「爆衝」的訊號特性。圖 22 所示為具有主動功率因數控制 (PFC) 之裝置中電感的典型訊號方案，此圖是可用游標進行磁性耗損量測的設定視窗。



► 圖 20. 不同切換頻率下磁芯耗損對磁通量密度的分布圖。

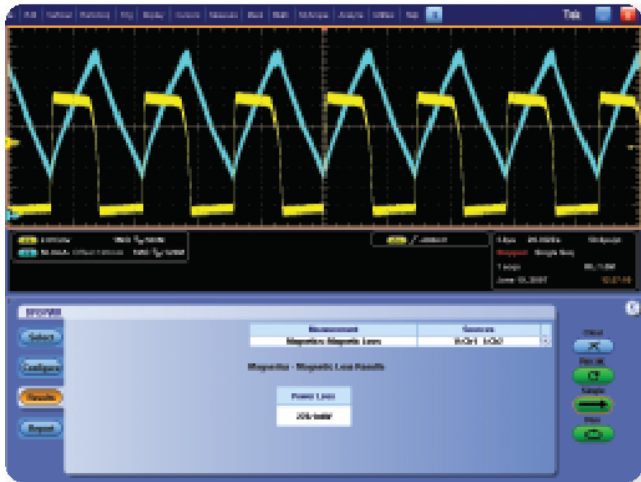
多線圈電感所需的方式稍微有些不同。總功率耗損為個別線圈耗損的總和：

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{L1} + PowerLoss_{L2} + PowerLoss_{L3} + \dots$$

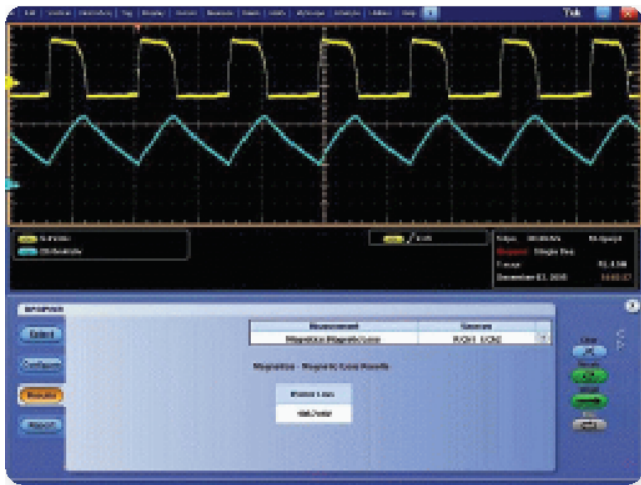
計算變壓器耗損所用的公式會有更多不同：

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{PR} - (PowerLoss_{S1} + PowerLoss_{S2} + \dots)$$

在一次側所測得的功率耗損將包含二次側的反射功率。因此，您必須先量測一次側和二次側的功率後，再使用變壓器方程式來計算功率耗損。



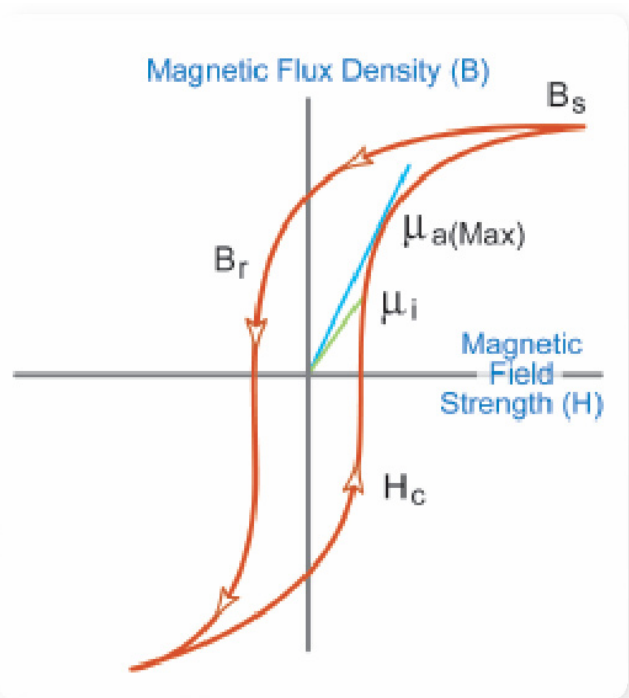
▶ 圖 21. 使用 DPOWPR 所測得之單線圈電感的功率耗損。



▶ 圖 22. 使用游標關選之電感的功率耗損。

磁性性質基本原理

切換式的電源供應器必須能夠適應各種操作條件，並且一樣可靠。為了擁有最佳效能，設計工程師一般都會指定由製造商所提供使用 B-H (磁滯) 曲線的磁性元件，即變壓器和電感。這些曲線定義磁性鐵心材料發展的效能。包括工作電壓、電流、拓樸和轉換器等因數，都必須維持在磁滯曲線的線性區域內。顯然，有這麼多變數時，這個目標不太容易達成。



▶ 圖 23. 磁性元件的一般 B-H (磁滯) 圖。

當磁性元件在 SMPS 內作業時，分析磁性元件之作業區域的特性，以判斷電源供應器的穩定性。量測程序包括繪製磁滯迴路和：

- ▶ 飽和磁通量密度 (B_{peak})
- ▶ 剩餘磁通量密度 (B_r)
- ▶ 矯頑磁力 (H_c)
- ▶ 磁導性 (μ)

B-H 圖為磁性性質的特性。圖 23 所示為正弦波激發的典型 B-H 圖。

若要繪製 B-H 量測圖，開始時必須準備下列資訊：

- ▶ 通過磁性元件的電壓
- ▶ 磁化電流
- ▶ 圈數 (N)
- ▶ 磁長 (l)
- ▶ 截面積 (A)

功率量測與分析

► 入門

這些為下列圖 22 中的定義所用的變數：

磁場強度 (H) 是用於傳導受測材料中磁通量的磁場。其單位以每公尺的安培數來表示。

$$H_k(t) = I_k(t) * \frac{N}{l}$$

其中 N 為圈數，而 l 為磁長。

飽和磁通密度 (Bs) 是材料中所能傳導的最大磁通量密度，不論外部應用磁場 H 的大小為何。

$$\phi_k = \int V(t)_k dt$$

此外：

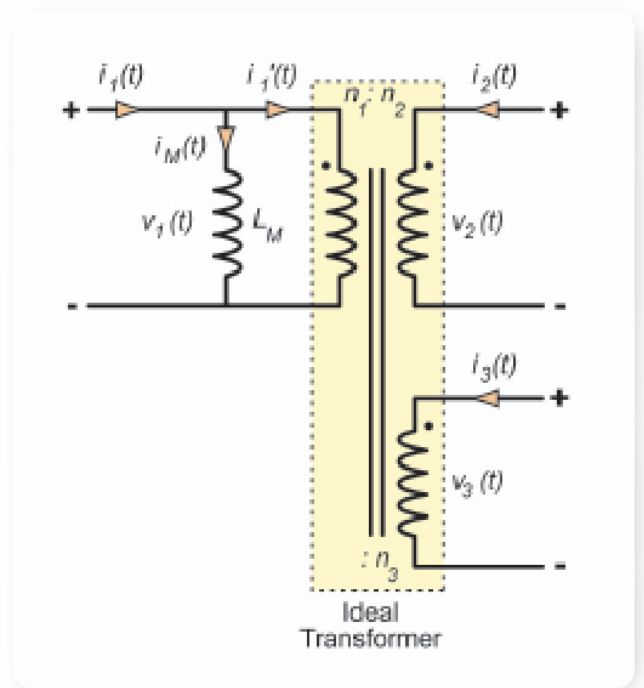
$$B_k(t) = \phi_k / N * S$$

剩餘磁通量密度 (Br) 是外部應用磁場 (H) 在產生磁滯迴路而歸零之後，殘餘在材料中的傳導磁通量密度。

矯頑力 (Hc) 是 H 軸與磁滯迴路交叉處的 H 值。這代表在磁滯迴路量測週期時，要使傳導磁通量密度 (B) 歸零所需的外部磁場。Hc 的正負軸對稱。

初始磁導性 (μi) 是傳導磁通量密度 (B) 與 H 到達零時之應用磁場 (H) 的比率。此為磁滯迴路中任一點之 B 與 H 的比率。

此外，最大振幅磁導性為磁滯迴路之正週期第一象限上，B 與 H 的最大比值。此為由原點開始繪製的斜率。



► 圖 24. 多線圈磁性元件。

若要量測磁性性質，必須提供下列資訊：

- 通過磁性元件的電壓
- 磁化電流
- 圈數 (N)
- 磁長 (L)
- 截面積 (A)

電感是做為電源供應器輸入和輸出處的濾波器，並且可能有單一或多重線圈。

電感電壓和電流需遵循下列方程式：

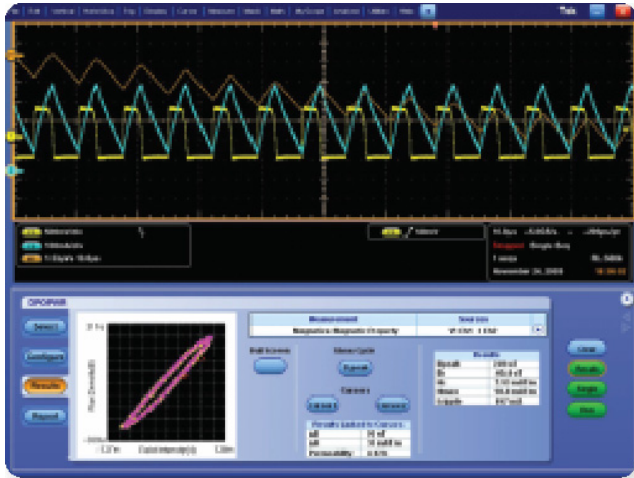
$$V_L(t) = R \cdot i_L(t) + L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

在典型的「」(直流電對直流電) 的變壓器中，其線圈中的磁通量表示為：

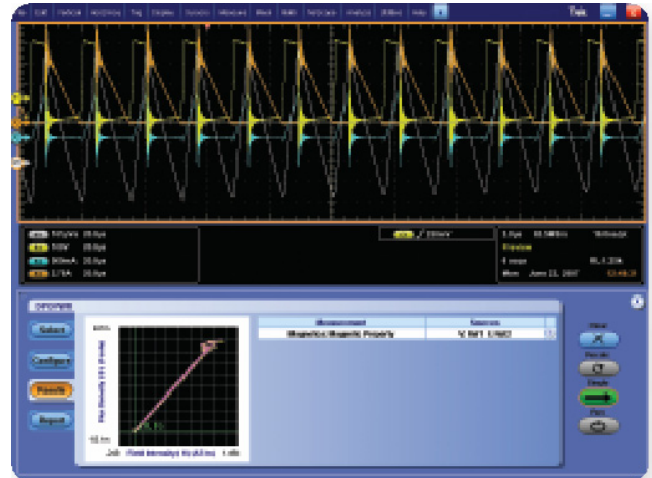
$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = N \cdot \frac{d\phi_L(t)}{dt}$$

而：

$$\phi_L [(n+1)T_s] = \phi_L [nT_s]$$



▶ 圖 25. 單線圈電感的 B-H 圖。



▶ 圖 26. 變壓器的 B-H 圖。

圖 24 所示為典型的多線圈磁性元件，此元件可能做為耦合電感或變壓器。

控制此電路作業的電子方程式如下：

$$\frac{V_1(t)}{n_1} = \frac{V_2(t)}{n_2} = \frac{V_3(t)}{n_3}$$

和

$$i_1(t) \cdot n_1 = -i_2(t) \cdot n_2 - i_3(t) \cdot n_3$$

和

$$i_1(t) = i_M(t) + i_1(t)$$

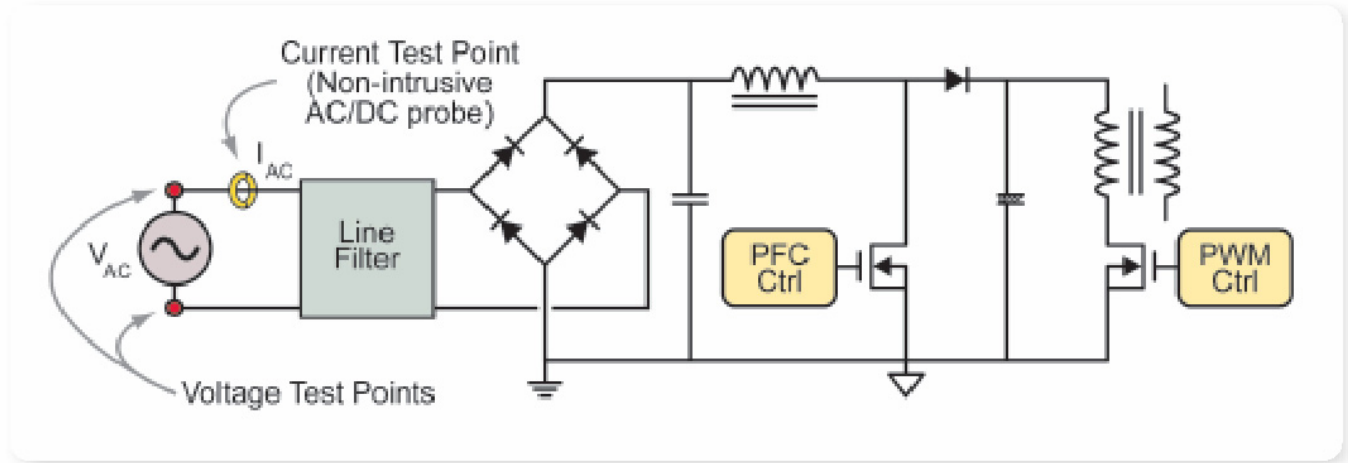
若要計算網路磁化電流，必須量測 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 和 $i_3(t)$ 。若已知網路磁化電流，則 B-H 分析程序就類似於計算單一線圈電感時所用的程序。磁通量會隨著網路磁化電流而改變。在所有線圈中所量測電流的向量總和，即等於磁化電流。

使用示波器量測磁性品質

Tektronix DPOPWR 軟體等描述功率量測的軟體，可以利用示波器大幅放大磁性性質的量測。在許多情況下，您只需量測電壓和磁化電流即可。軟體會自動為您計算磁性性質的量測值。圖 25 描述在單一線圈電感上量測 DPOPWR 磁性性質的結果，也可在具備主要與二次側電流來源的變壓器上進行量測。

在圖 26 中，波道 1 (黃色軌跡) 為整個變壓器的電壓，波道 2 (藍色軌跡) 為通過一次側的電流，波道 3 (粉紅色軌跡) 為通過二次側的電流。透過波道 2 和波道 3 的資料，軟體便可算出磁化電流。

若要設定測試的圈數，必須先輸入磁長與鐵心的截面積。軟體可以利用這項資訊建立磁性元件的正確 B-H 圖，並分析其效能的特性。DPOPWR 軟體會在所擷取的記憶體中，計算每個週期的 B-H 圖。



► 圖 27. SMPS 電源供應器 (只有主要部分) 及其電源品質量測測試點的簡圖。量測電源品質時，必須有同步輸入的 V_{AC} 和 I_{AC} 讀數。

圖 26 的左下視窗顯示了具有最大磁通量密度的 B-H 圖。在此 B-H 圖中，會顯示所量測的 B_{peak} 、 H_{max} 和磁導性。DPOPOWER 軟體也可量測漣波電流，因為它與鐵心耗損成比例。

電源線量測

電源線量測可分析供應器與其使用環境互動時的特性。您必須記得電源供應器可以有各種大小，如個人電腦內的小型風扇箱、供應工廠馬達的大型裝置、以及支援電話銀行和伺服器群組的大型供應器。這些裝置每一種都對供應其電力的傳入電源 (一般是設備電源) 產生相同的效應。

若要判斷插入電源供應器後所產生的影響，必須直接量測輸入電源線上的電源電壓和電流參數。

電源品質量測基本原理

SMPS 中的電源品質量測

不只單單受到電流產生者的影響。同時也取決於電源供應器的設計和製造商，以及其他終端使用者的負載。電源供應器的電源品質特性，即是此電源供應器的「健康」狀態。

真正的電源線永遠不會產生理想的正弦波，在電線上永遠會有部分失真和不純的波形產生。切換式電源供應器顯示對電源的非線性負載。因為這個原因，電壓和電流的波形不會一樣。針對部分輸入週期所描繪的電流，導致輸入電流波形上產生諧波。判斷這些失真的效果是電力工程中相當重要的一部分。

若要判斷電源線上電源消耗和失真的情形，必須在輸入階段量測電源品質，如圖 27 中所示的電壓和電流測試點。

電源品質的量測包括：

- ▶ 實功率
- ▶ 視在功率和虛功率
- ▶ 功率因數
- ▶ 波峰因數
- ▶ 符合 EN61000-3-2 標準的電流諧波量測
- ▶ 總諧波失真 (THD)

使用示波器量測電源品質

使用正確的工具

數位示波器 (如 DPO7000 系列) 所執行的 DPOPOWER 等軟體，可取代傳統上用來量測電源品質時所用的功率表和諧波分析器，是功能相當強大的機種。

與舊式的儀器相較之下，您不得不注意到使用示波器的種種優點。儀器必須能夠擷取諧波元件之基本頻率第 50 個以上的諧波。根據當地的適用標準，電源線頻率通常都是 50 Hz 或 60 Hz。但在部分軍事和航空設備上，電源線頻率可能會高達 400 Hz。當然，訊號差 (signal aberration) 中可能會更高的頻率。在現今的高速示波器中，超高取樣 (DPO7000 系列每秒可達 40 Giga 取樣率) 可確保在擷取快速變更的事件時，同時接收大量的細節 (解析度)。相對的，傳統的功率表因為反應時間相對較慢，因此會忽略訊號的細節。

即使在取樣解析度很高的情況下，示波器的記錄長度仍足以擷取整數的週期數。

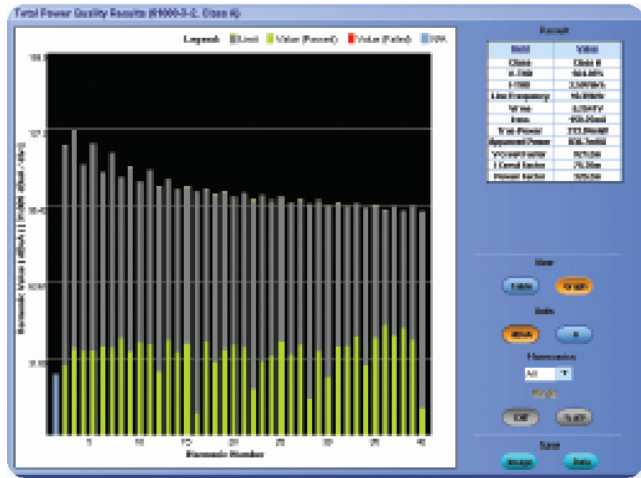
軟體工具可加速量測的程序，並將設定時間減到最少。大部分電源品質量測的工作，可以透過示波器本身所執行的全功能電源量測軟體自動執行，只要數秒就可以完成冗長的程序。將需要手動計算的程序大幅縮減後，您也可以將示波器當作多功能和高效率的功率表。

而示波器的探棒也可協助您安全量測出可靠的功率。針對電源應用所設計的高壓差動探棒，是最適合用來觀察浮動電壓訊號的工具。

需特別考量電流探測。用於電流探測的結構有以下數種：

- ▶ AC 電流探棒是以電流變壓器 (CT) 技術為基礎。CT 探棒為非破壞式，但無法感測訊號中的 DC 元件，此元件可能會使量測的結果不正確。
- ▶ 電流分流。此設計需要中斷電流，並且可能會導致探棒本身中的電壓下降，因此有可能會影響到功率量測的正確性。
- ▶ AC/DC 電流探棒一般都是以霍爾效應感應器技術為基礎。此裝置可以非破壞的方式來感測 AC/DC 電流，並且能夠透過一個連接器同時測到 AC 和 DC 元件的讀數。

在量測切換式之電源供應器的電源品質方面，AC/DC 電流探棒已成為進行此挑戰性工作的最佳工具。



▶ 圖 28. 使用 DPO7000 系列示波器所產生的電源品質結果，以及 DPOPWR 量測和分析軟體。

使用示波器量測電源品質

當示波器 (如 DPO7054) 有配備 DPOPWR 軟體時，它會轉換至非妥協式 (no-compromise) 的自動功率量測平台。該軟體會自動設定示波器及其初始量測參數。必要時，您可以手動微調這些值。

圖 28 所示為使用 DPO7000 系列示波器和 DPOPWR 量測與分析軟體時，所擷取到的電源品質和電流諧波讀數。這些讀數顯示出完整的量測範圍，包括實功率、虛功率、波峰因數、總諧波失真、功率因數以及顯示電流諧波的柱狀圖。

結論

電源供應器實際上是以線式供電 (linepowered) 之各類電子產品的一部份，而切換式的電源供應器 (SMPS) 也已成爲數位計算、網路和通訊系統中的主要結構。一個切換式之電源供應器的效能或故障，會影響到大型且昂貴的系統的命運。

而量測是確保新一代 SMPS 設計的可靠度、穩定性、相容性和安全性的唯一方法。SMPS 量測主要分成三種類別：主動裝置量測、被動裝置量測 (大部分爲磁性) 和電源品質測試。部分量測可處理浮動電壓和高電流；而其他則需要使用數學式的分析才能得到有意義的結果。電源供應器量測可以非常複雜。

而現代的數位示波器已成爲分析量測和排除量測障礙的最佳工具。

如 Tektronix DPO7000 系列中的 DPO 等示波器，配備許多實用的探測工具和自動化量測軟體，可大幅簡化繁瑣的 SMPS 量測，並提供快速、正確的答案。像非破壞式電流探測等技術，不但保留電源的完整性，而使用軟體的工具 (如校平濾波器) 更可確保重複性的結果。此外，整合的軟體會自動處理複雜的數學計算程序。因爲示波器具備各種強大功能並且又簡單好用，電源供應器設計實驗適中許多傳統的單功能工具已被淘汰。

功率量測

哪一種 Tektronix 儀器適合您的電源應用？

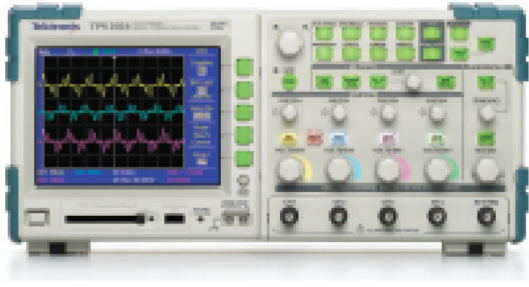
		TPS2000 系列 搭配 TPS2PWR1 模組	TDS3000B 系列 搭配 TDS3AAM 模組	4000 系列	DPO7000 系列 搭配 DPOPWR 模組	
規格	頻寬	100 MHz 到 200 MHz	100 MHz 到 500 MHz	350 MHz 到 1 GHz	500 MHz 到 3.5 GHz	
	記錄長度	2.5 k	10 k	10 M	高達 200 M	
	取樣率	高達 2 GS/s	高達 5 GS/s	高達 5 GS/s	高達 40 GS/s ¹	
	最大輸入電壓 (也請參照第 23 頁的電壓探棒)	300 V _{RMS} CAT II	150 V _{RMS}	250 V _{RMS} ，峰值 400V	150 V _{RMS}	
特殊功能	自動校準				✓	
	隔離與浮動通道	✓				
	Windows 作業系統與桌面				✓	
	電源供電操作	✓	✓			
	FFT 圖	✓	✓	✓	✓	
線路電源品質量測	V _{RMS}	■	■	■	■	
	I _{RMS}	■	■	■	■	
	實 (實際) 功率	■	■	■	■	
	虛功率	■	■	■	■	
	視在功率	■	■	■	■	
	功率因數	■	■	■	■	
	波峰因數	■	■	■	■	
	相位角	■	■	■	■	
	諧波	■	■	■	■	
	總諧波失真	■	■	■	■	
	IO 分析量測	線路漣波	■	■	■	■
		切換雜訊	■	■	■	■
干擾 相容性測試	EN61000-3-2 的前置相容性測試	■			■	
	軍用檢測標準 1399	■			■	
主動元件量測	切換耗損量測	■	■	■	■	
	安全工作區	■	■	■	■	
	動態電阻 (dv/dt，di/dt)	■	■	■	■	
	調變分析				■	
被動元件量測值	電感				■	
	磁性功率耗損				■	
	磁通密度		■	■	■	
	B-H 圖				■	

關鍵：
■ 自動
■ 手動

¹ 在一個通道上。

功率量測與分析

▶ 入門

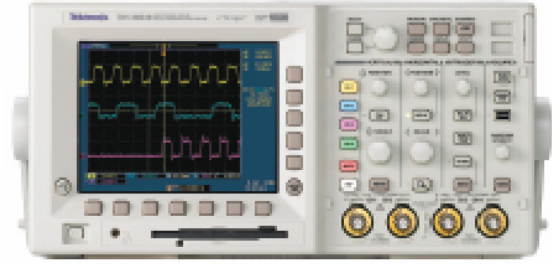


TPS2000 系列

搭配 TPS2PWR1 模組

電源應用：

- ▶ 工業電源
- ▶ 汽車



TDS3000B 系列

搭配 TDS3AAM 模組

電源應用：

- ▶ 電源供應疑難排解
- ▶ 教育

在與下列探棒搭配使用時，TPS2000 系列與 TDS3000B 系列示波器可達到最佳功率量測效能：

高電壓差動探棒

P5205 – 可量測高達 $1000 V_{RMS}$ CAT II

P5210 – 可量測高達 $4400 V_{RMS}^{*2}$

- ▶ 在示波器接地的情況下，進行安全的浮動或升高電路量測。
- ▶ 從毫伏到千伏的廣泛動態電壓範圍。

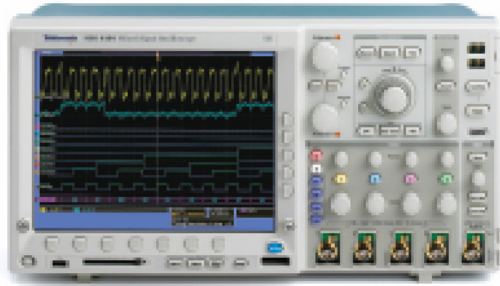
電流探棒

搭配 TCP303/TCP305/TCP312 與 TCP202 的 TCPA300

- ▶ 變壓器與霍爾效應技術可增強 AC/DC 量測功能。
- ▶ 從毫安培到千安培的廣泛動態電流範圍。



探棒



4000 系列

電源應用：

- ▶ 電源供應疑難排解
- ▶ SMPS 設計與開發



DPO7000 系列 具 DPOPWR 選項

電源應用：

- ▶ SMPS 設計與開發

4000 系列與 DPO7000 系列 DPO™ 示波器配備 Tektronix 多用途探棒介面 (TekVPI)。TekVPI 探棒為多用途、功能豐富且使用簡易的工具。

TekVPI 高電壓差動探棒

TDP1000 與 TDP0500

- ▶ 提供 GHz 效能，以分析切換式電源供應器 (SMPS) 設計。
- ▶ 多用途待測裝置 (DUT) 連線能力與簡易使用性。



TekVPI 電流探棒

TCP0030 與 TCP0150

- ▶ 優越的頻寬 (DC 達 120 MHz) 與廣泛的動態範圍 (毫安培到數百安培)。
- ▶ 分離核心構造，可更輕鬆快速的連接到待測裝置 (DUT)。



探棒

DPO7000



DPO7000 系列示波器的使用者介面可輕鬆量身訂製。MyScope® 控制視窗是一項革命新特性，能讓您建立只包含您所關心、對工作重要的控制、特性及功能的專屬控制視窗。初次使用時，您可以從示波器的各個部分將所需要的功能拖曳至一個控制視窗，有效創造您個人專屬的「工具箱」。

DPOPWR



DPOPWR 功率量測與分析軟體將 Tektronix 數位示波器轉變成複雜的分析工具，可快速量測和分析電源供應器切換裝置和磁性元件中的功率消耗，然後根據自訂的格式產生詳細的測試報告。將 DPOPWR 與 Tektronix DPO7000 系列示波器和差動電壓及電流探棒搭配使用，便可形成電源供應器設計和測試的完整量測系統。

請聯絡 Tektronix：

東南亞國協/大洋洲 (65) 6356 3900
奧地利 +41 52 675 3777
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777
比利時 07 81 60166
巴西與南美洲 (11) 40669400
加拿大 1 (800) 661-5625
中東歐、烏克蘭及波羅的海諸國 +41 52 675 3777
中歐與希臘 +41 52 675 3777
丹麥 +45 80 88 1401
芬蘭 +41 52 675 3777
法國 +33 (0) 1 69 86 81 81
德國 +49 (221) 94 77 400
香港 (852) 2585-6688
印度 (91) 80-22275577
義大利 +39 (02) 25086 1
日本 81 (3) 6714-3010
盧森堡 +44 (0) 1344 392400
墨西哥、中美洲與加勒比海諸國 52 (55) 5424700
中東、亞洲及北非 +41 52 675 3777
荷蘭 090 02 021797
挪威 800 16098
中華人民共和國 86 (10) 6235 1230
波蘭 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
大韓民國 82 (2) 6917-5000
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 7484900
南非 +27 11 206 8360
西班牙 (+34) 901 988 054
瑞典 020 08 80371
瑞士 +41 52 675 3777
台灣 886 (2) 2722-9622
英國與愛爾蘭共和國 +44 (0) 1344 392400
美國 1 (800) 426-2200
其他地區請以下列電話連絡 Tektronix 公司：
1 (503) 627-7111
2007 年 9 月 5 日更新

若需詳細資訊

Tektronix 維護豐富的應用摘要、技術簡介與其他資源，並定期擴充這些文件的收集，以協助工程人員處理創新的科技。

請造訪 www.tektronix.com



Copyright © 2007, Tektronix. 版權所有。Tektronix 產品受美國和外國專利權的保護、聲明與審查。本出版品中的資訊可取代之前任何出版品中的資訊。本公司保留變更規格與價格的權利。TEKTRONIX 和 TEK 為 Tektronix, Inc 的註冊商標。其他商標名稱則是該相關公司的使用標記、商標或註冊商標。

08/07 DM

55T-18412-1

Tektronix
Enabling Innovation