

Technical Article

如何降低 PFC 的 THD



Bosheng Sun

總諧波失真 (THD) 是訊號中存在的諧波失真，定義為一組高諧波頻率的均方根 (RMS) 振幅與第一個諧波或基本頻率的 RMS 振幅之比。方程式 1 表示 THD：

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (1)$$

其中 V_n 是 n 次諧波的 RMS 值， V_1 則是基頻分量的 RMS 值。

在電源系統中，這些諧波可能會導致包括電話傳輸干擾和導體劣化等問題；因此，請務必控制總 THD。低 THD 代表峰值電流更低、發熱更少、電磁放射更低，而馬達的核心損失也更少。

對於輸入功率超過 75 W 的 AC/DC 電源供應器，要減少 THD 即需要輔以功率因數校正 (PFC)，PFC 會迫使其輸入電流跟隨輸入電壓，使電子負載消耗包含最小諧波的正弦電流波形。

THD 要求已變得更加嚴格，特別是在伺服器應用中。模組化硬體系統通用冗餘電源供應器 (M-CRPS) 規格 [1] 在整個負載範圍內定義了非常嚴格的 THD 要求，如表 1 所示。這比以前的 CRPS THD 規格要嚴格得多。

表 1. M-CRPS THD 規格。來源：德州儀器

Output power	< 5%	5%≤In≤10%	10%<In≤20%	20%<In≤50%	50%<In≤100%
Current THD (240VAC) Capacity Levels ≥ 1400W	< 20%	< 8.5%	< 7.5%	< 5%	< 3.5%
Current THD (240VAC) Capacity Levels < 1400W	< 25%	< 10%	< 10%	< 7.5%	< 4%
Current THD (120VAC)	< 25%	< 10%	< 7.5%	< 5%	< 4%

滿足如此嚴格的 THD 規格對於 PFC 設計而言是一個巨大的挑戰，而傳統的迴路調諧可能並不足夠。在本文中，我將建議幾種額外的方法來協助降低 THD。

確保感應到的訊號保持乾淨

PFC 控制器可感測 AC 輸入電壓、電感器電流和 PFC 輸出電壓。這些感應到的訊號必須保持乾淨，否則會影響 THD。例如，由於 AC 輸入電壓訊號會產生正弦電流參考，因此感應到的訊號上的任何突波都會造成電流參考失真並影響 THD。

儘管輸出電壓 (V_{OUT}) 訊號未用於產生電流參考，但該訊號可能會影響 THD，因為 V_{OUT} 上的突波會導致電壓迴路輸出出現漣波，進而影響電流迴路參考，最終影響 THD。如果突波幅度夠大，可能會觸發電壓迴路非線性增益，並大幅提升 THD。

常見的做法之一是將去耦電容器靠近控制器的感應接腳。您必須小心選擇電容，以有效減少雜訊，但又不會造成太多延遲。利用數位無限脈衝反應濾波器處理感應到的 V_{OUT} 訊號，將進一步減少雜訊；由於 PFC 電壓迴路較慢，因此此數位濾波器產生的額外延遲是可接受的結果。

不過，若為 AC 電壓感測，則不建議新增數位濾波器，因為這會造成電流參考的延遲。在此情況下，您可以使用韌體鎖相迴路 (PLL) 來產生與 AC 電壓同相的內部正弦波訊號，然後使用產生的正弦波訊號來調變電流參考。由於 PLL 產生的正弦波相當乾淨，即使感應到的 AC 電壓有一些雜訊，電流迴路參考也會十分乾淨。

減少 AC 零交點處的電流突波

AC 零交點處的電流突波是圖騰柱免橋接 PFC 的固有問題。這些突波可能非常大，因此無法通過 M-CRP THD 規格。我分析了這些突波 [2] 的根本原因，並指出脈衝寬度調變 (PWM) 緩啟動演算法將能有效地減少這些突波，如圖 1 所示。

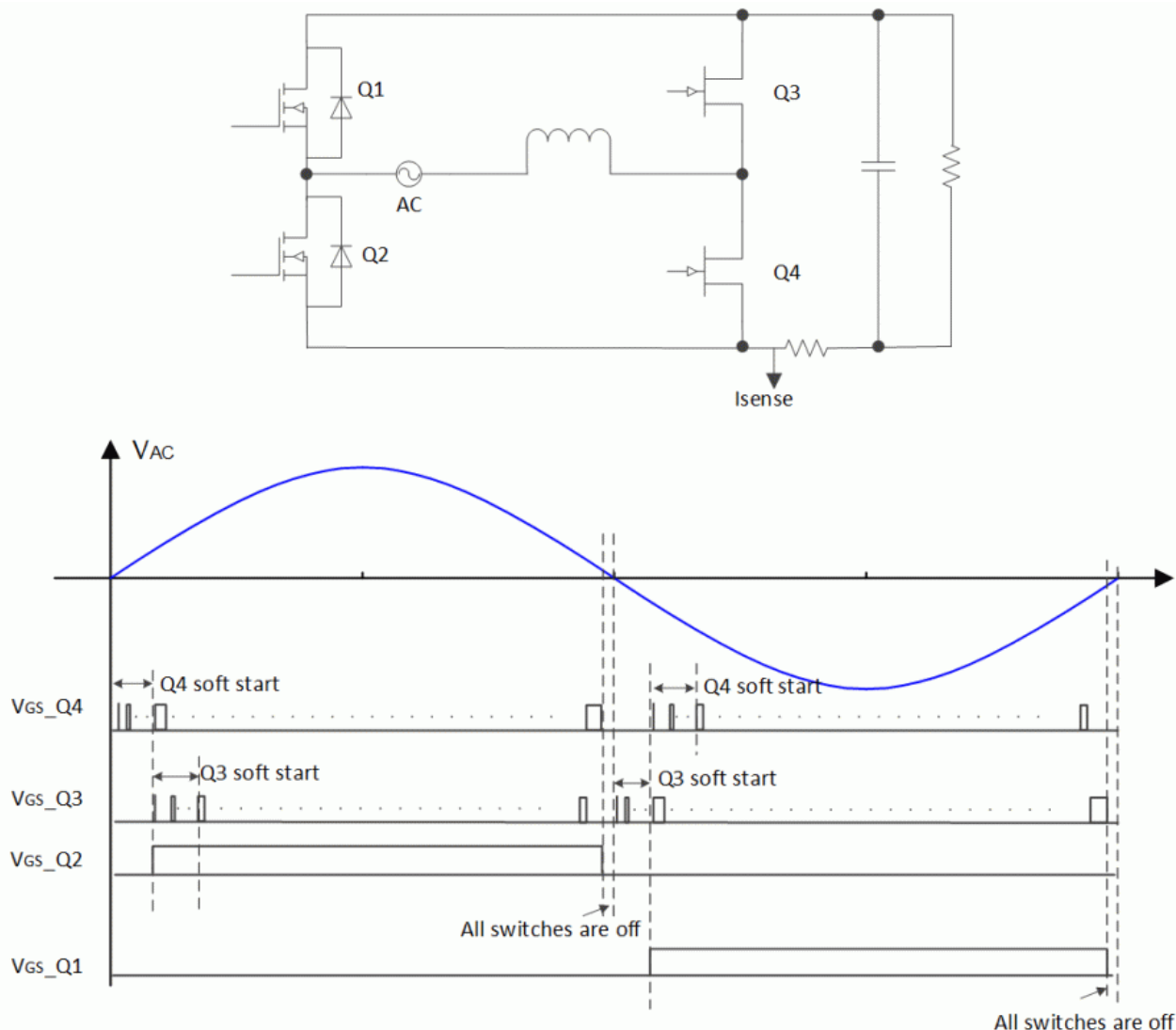


圖 1. AC 零交點的開極訊號計時。來源：德州儀器

在此解決方案中，當 V_{AC} 在 AC 零交點後從負週期轉變為正週期時，主動開關 Q4 會先以極小的脈衝寬度導通，然後逐漸增加至控制迴路所產生的工作週期 (D)。Q4 的緩啟動會將切換節點汲極至源極電壓 (V_{DS}) 逐漸放電至零。完成 Q4 的緩啟動後，同步的電晶體 Q3 開始導通。此程序會從微小的脈衝寬度開始，逐漸增加，直到脈衝寬度達到 $1-D$ 。當 Q4 的緩啟動完成且 Q3 的緩啟動開始時，低頻開關 Q2 即會導通。

零交點偵測可能會因雜訊意外觸發。出於安全考慮，在半 AC 週期結束時，關斷所有開關。這會留下一個小的死角，防止輸入 AC 發生短路。從 AC 正週期到負週期的轉換完全相同。圖 2 顯示測試結果。

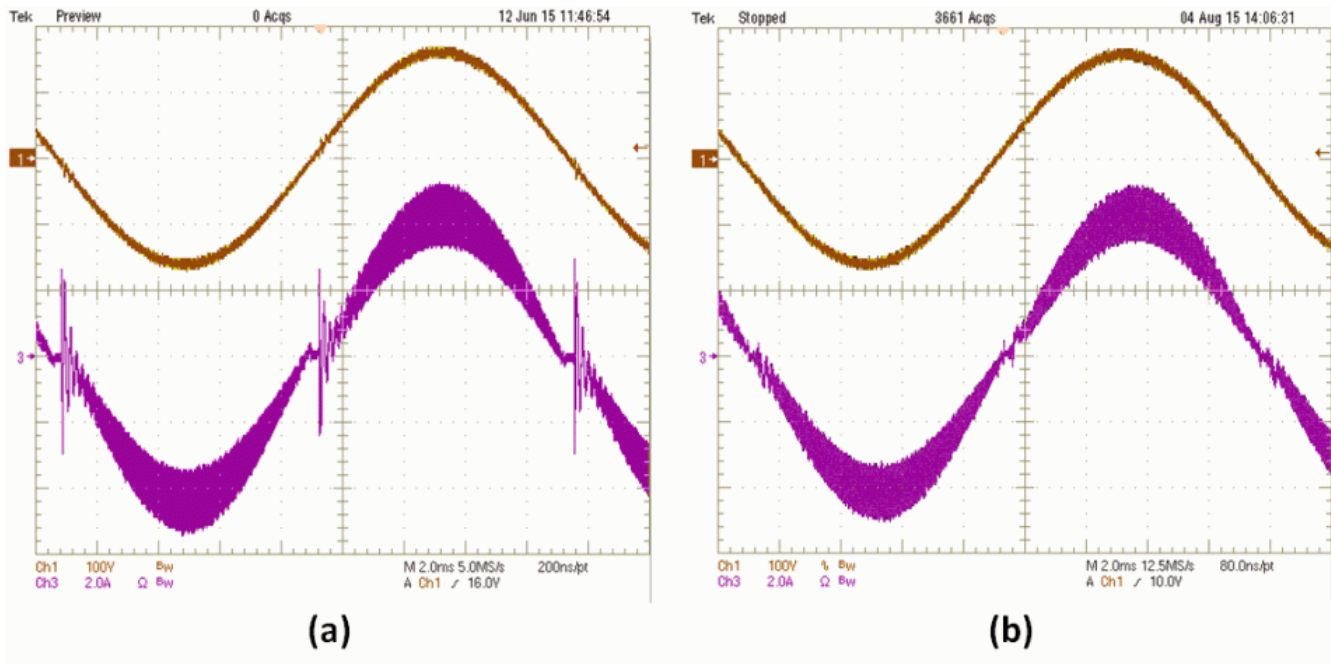


图 2. 不含 PWM 緩啟動或含有 PWM 緩啟動的電流波形：傳統控制方法 (a) 和 PWM 緩啟動 (b)。來源：德州儀器

降低電壓迴路效應

電壓迴路輸出上的雙線路頻率漣波會影響電流參考，進而影響 THD。為了盡量降低此頻率漣波效應，同時又不犧牲負載暫態響應，您可在 V_{OUT} 感測訊號與電壓迴路間新增數位陷波（帶阻）濾波器。此陷波濾波器可有效地衰減雙線頻率漣波，同時仍能通過所有其他頻率訊號，包括負載暫態造成的突然 V_{OUT} 變化。負載暫態將不會受到影響。

另一種方法是在 AC 零交點實例中感測 V_{OUT} 。由於 AC 零交點實例 $V_{out_zc}(t)$ 上的 V_{out} 值等於其平均值，並為穩定狀態下的「常數」，因此是電壓迴路控制的完美回饋訊號。若要處理負載暫態，請利用以下電壓迴路控制定律：

```

If ((Vref - Vout(t) < Threshold)
{
Error = Vref - Vout_zc(t);
VoltageLoop_output = Gv(Error, Kp, Ki);
}
Else
{
Error = Vref - Vout(t);
VoltageLoop_output = Gv(Error, Kp_nl, Ki_nl);
}

```

如果瞬時 V_{OUT} 誤差較小，請在 AC 零交點實例 $V_{out_zc}(t)$ 使用 V_{OUT} ，並針對電壓迴路補償器 G_v 使用小比例積分 (PI) 迴路增益 K_p 、 K_i 。當發生負載暫態而造成瞬時 V_{OUT} 誤差大於閾值時，請針對 G_v 使用瞬時 $V_{out}(t)$ 值和 PI 迴路增益 K_{p_nl} 、 K_{i_nl} 快速讓 V_{OUT} 回到其額定值。

過取樣

PFC 電感器電流是在各切換週期中具 DC 偏移的 SAW 波；電流隨後會進入訊號調整電路，如運算放大器，讓訊號適用於 PFC 控制電路。然而，此訊號調整電路無法對輸入電流漣波提供足夠的衰減。電流漣波仍會出現在放大

器的輸出端。如果在每個切換週期內僅對此訊號進行取樣一次，則不存在完美的固定位置使該處訊號可代表所有時間的平均電流。因此，在單一取樣中很難獲得良好 THD。

為了獲得更精確的回饋訊號，我建議使用過取樣機制。圖 3 顯示可以在每個切換週期中對電流回饋訊號均勻取樣八次，並平均結果，然後將其傳送至控制迴路。此過取樣可有效地平均輸出電流漣波，使量測的電流訊號更接近平均電流值。此外，控制器對雜訊的敏感度也會降低，包括訊號雜訊和測量雜訊。過取樣是減少電流波形失真最有效的方式之一。

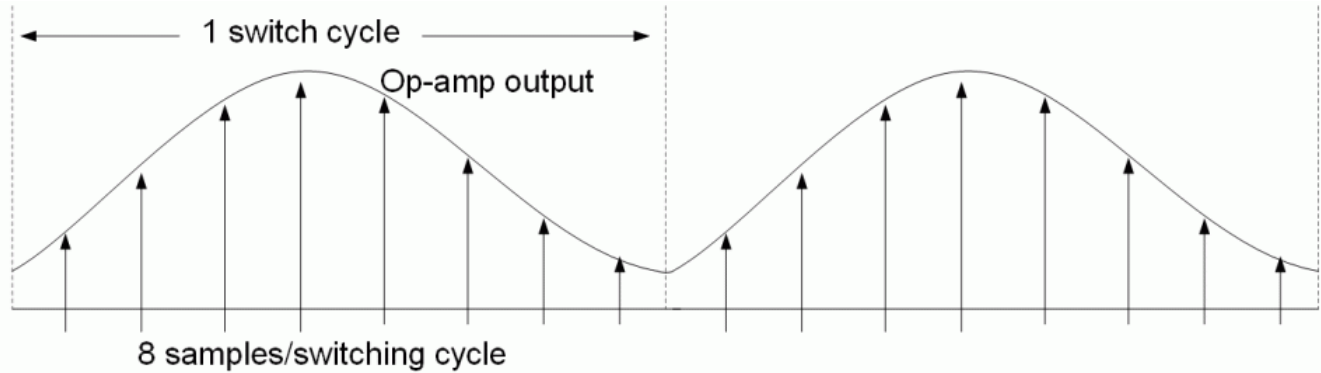


圖 3. 每個切換週期過取樣八次。來源：德州儀器

負載比前饋

負載比前饋控制 [3] 的基本概念是預先計算負載比，然後將此負載比加入回饋控制器。對於在連續傳導模式下運作的增壓拓撲，方程式 2 所提供的負載比 (d_{FF}) 為：

$$d_{FF} = \frac{v_{OUT} - v_{IN}}{v_{OUT}} \quad (2)$$

此負載比碼型可在開關中有效地產生電壓，其在切換週期內的平均值等於整流輸入電壓。常規電流迴路補償器會根據計算的負載比模式變更負載比碼型。

圖 4 描述產生的控制方案。使用方程式 2 計算 d_{FF} 後，其會加入傳統的平均電流模式控制輸出 (d_I)。然後，您可以使用最終負載比 (d) 產生 PWM 波形來控制 PFC。

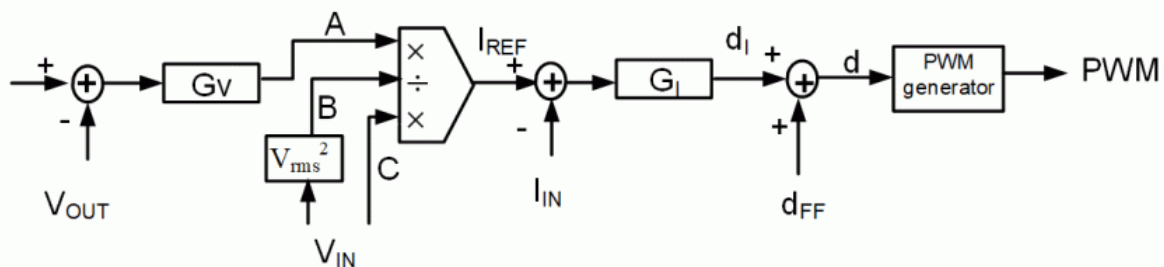


圖 4. 使用 d_{FF} 進行平均電流模式控制。來源：德州儀器

由於工作週期的大部分由負載比前饋產生，因此控制迴路只會稍微調整計算的負載。此技術有助於改善控制器迴路頻寬有限的應用的 THD。

AC 週期略過

一般而言，符合輕負載 THD 要求比重負載 THD 要求更難；對 M-CRP 規格中的 5% 負載 THD 要求尤其如此。若 PFC 除了在 5% 負載下符合所有其他 THD 要求，即使您已嘗試過目前提到的所有方法，AC 週期略過方法也能有所助益。

將 AC 週期略過視為特殊的突衝模式：當負載小於預先定義的閾值時，PFC 即會進入此模式，並視負載而略過一或多個 AC 週期。換言之，PFC 會在一或多個 AC 週期時關斷，並在下一個 AC 週期時再次導通。導通和關斷實例位於 AC 零交點，因此會略過整個 AC 週期。由於 PFC 在電流等於零處導通和關斷，因此應力和電磁干擾也較小。AC 週期略過與傳統 PWM 脈衝略過突衝模式不同，在此模式下您可隨機略過 PWM 脈衝。

要略過的 AC 週期次數與負載成反比；負載越少，略過的 AC 週期就越多。圖 5 所示為略過一個 AC 週期。通道 1 為 AC 電壓，通道 4 為 AC 電流。

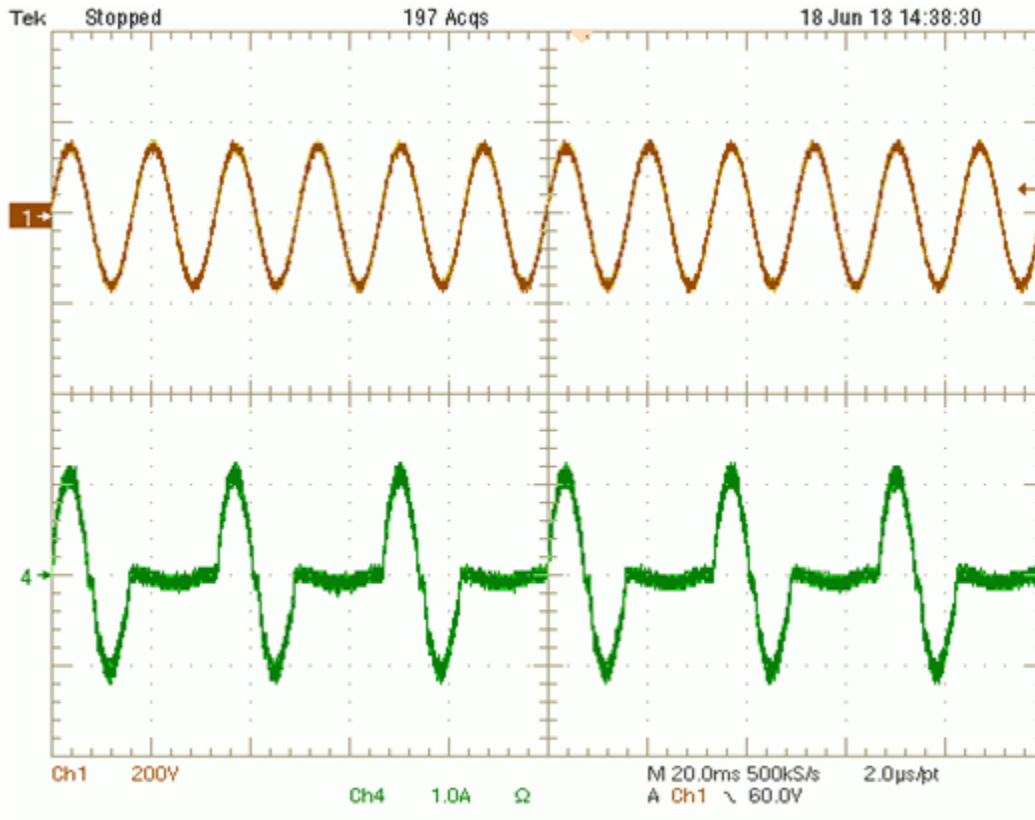


圖 5. 在輕負載時的 AC 週期略過。來源：德州儀器

因電流為零而關斷 PFC 時，THD 為零。由於 PFC 需要針對關斷期間進行補償，因此在導通時會提供大量功率，而這會大於平均值。基本上，這會以中負載或完全關斷 PFC 來運作。由於在中負載下 THD 遠低於輕負載，因此輕負載 THD 便會減少。

測試結果

我在由德州儀器 C2000™ 微控制器控制的 3-kW 圖騰柱免橋接 PFC [5] 上實作了本文中描述的方法。圖 6 顯示 240 V_{AC} 時的 THD 測試結果。

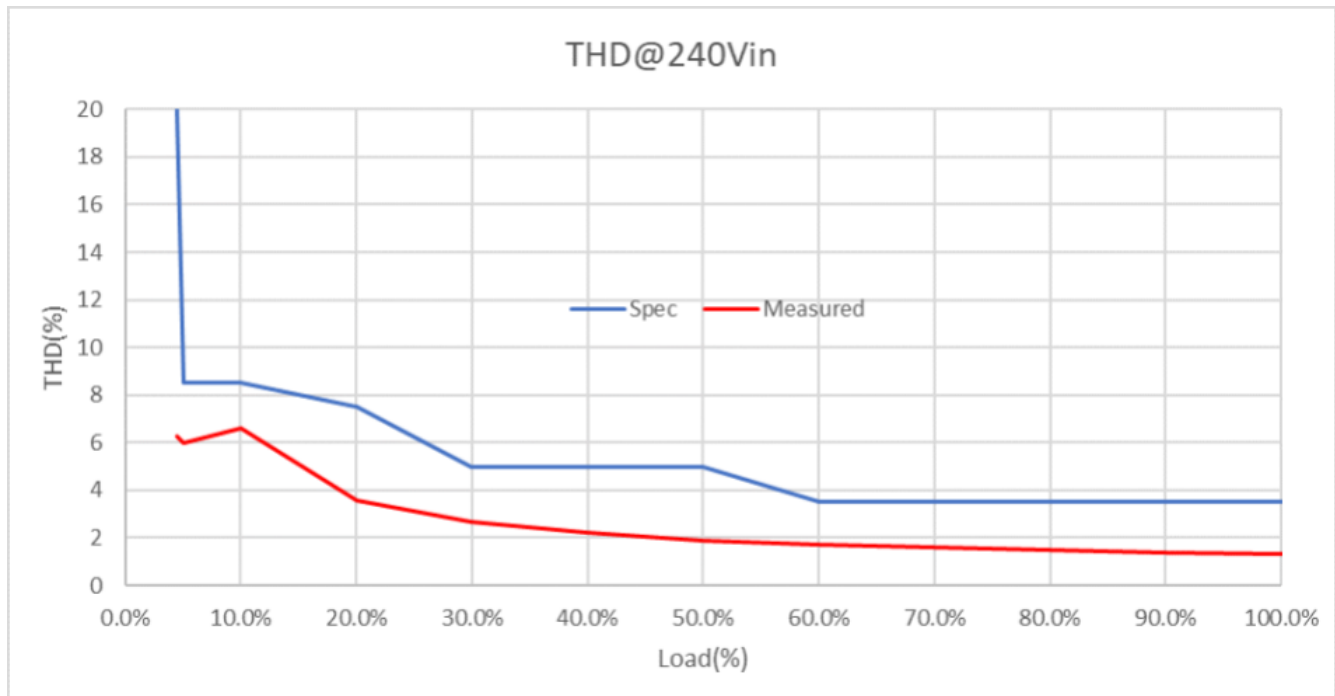


图 6. THD 測試結果。來源：德州儀器

THD 不僅符合最新的 M-CRPS THD 規格，而且具有充足的裕度，這可確保 PFC 在大量生產期間符合規格，即使存在硬體公差也是如此。

相關內容

- 用電訣竅 #115：GaN 開關整合如何在 PFC 中實現低 THD 與高效率
- 用電訣竅 #114：潛在韌體錯誤可能導致控制不穩定
- 用電訣竅 #113：8 W 以下的兩種簡單隔離式電源選項
- 用電訣竅 #112：用於故障測試的板載設備

參考資料

1. The Open Compute Project. n.d. [Open Possibilities](#). 存取日期：2023 年 4 月 10 日。
2. Sun, Bosheng. 「[如何減少圖騰柱 PFC 在 AC 零交點之電流突波](#)」。德州儀器 Analog Design Journal 文章，文件編號 SLYT650，2015 年第 4 季。
3. Van de Sype, D.M., Koen De Gussemé, A.P.M. Van den Bossche, and J.A. Melkebeek. “[Duty-Ratio Feedforward for Digitally Controlled Boost PFC Converters](#).” 《IEEE Transactions on Industrial Electronics》第 52 冊，編號 1 (2005 年 2 月)：第 108-115 頁。
4. Sun, Bosheng. 「[略過 AC 週期可改善 PFC 輕負載效率](#)」。德州儀器 Analog Design Journal 文章，文件編號 SLYT585，2014 年第 3 季。
5. Texas Instruments. n.d. 「[具 16-A 最大輸入的 3-kW、180-W/in³ 單相圖騰柱免橋接 PFC 參考設計](#)」。德州儀器參考設計編號 PMP23069。存取日期：2023 年 4 月 10 日。

先前已發表於 EDN.com。

註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025