

Technical Article

在完整運作條件下進行測試之前測量您的 LLC 諧振電路



John Dorosa

半橋式串聯諧振轉換器可為超過 100W 的轉換器實現高效率和高功率密度。最常見的諧振拓撲結構 (圖 1) 是一個由串聯磁化電感器、諧振電感器和電容器組成的諧振電路 (縮寫為 LLC)。參數值的選擇會決定諧振電路增益曲線的形狀，進而影響諧振轉換器在系統中的表現。

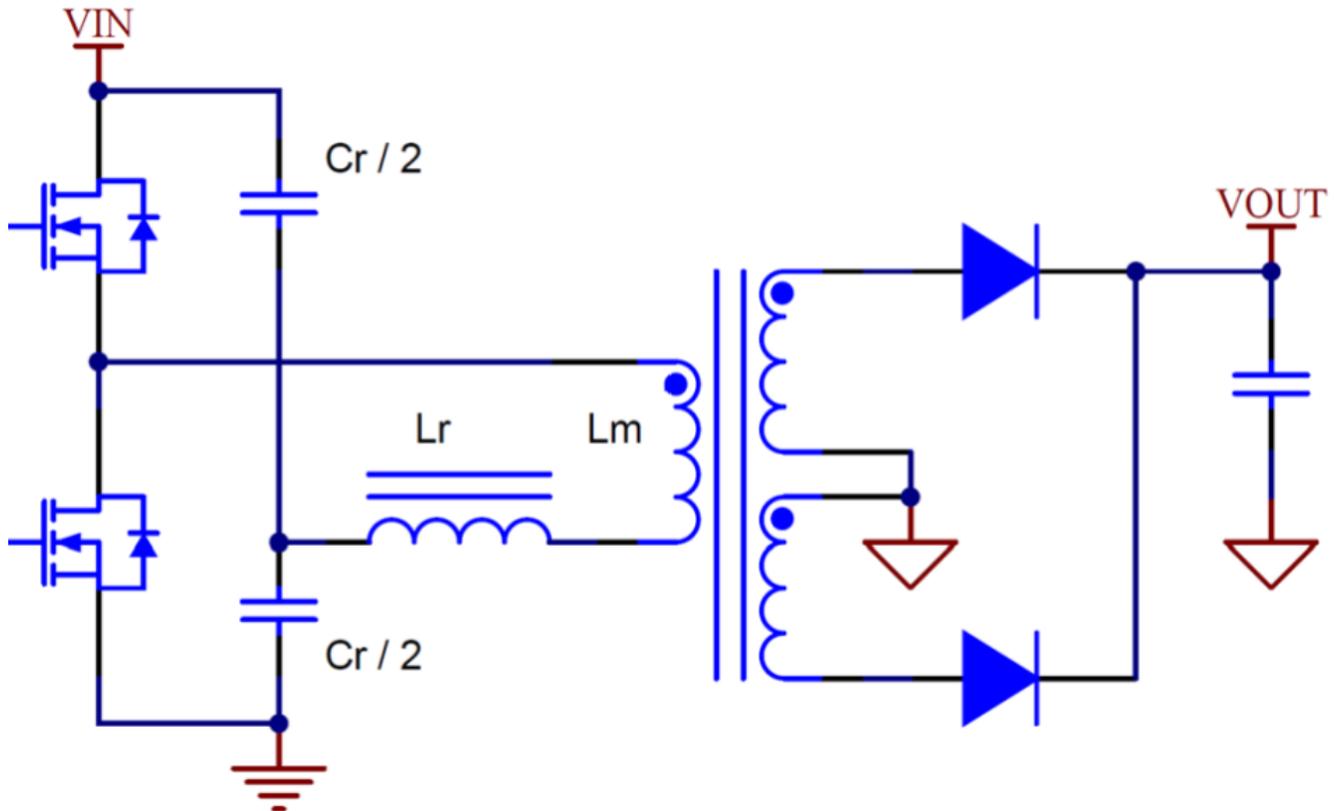


圖 1. 具有分離式諧振電容器的半橋式 LLC 功率級，參數值的選擇會決定諧振電路增益曲線的形狀，這需要在向電路施加能量前進行確認。來源：德州儀器

一旦您確定好一組參數並已選擇元件，請務必在向電路施加能量之前確認增益曲線。在本用電訣竅中，我將說明測量諧振電路增益曲線的技術及如何解讀結果，並會提供範例來呈現此技術的優點與限制。

頻率響應分析儀向任何電路注入小型 AC 訊號，然後測量系統中兩點之間的電壓，以判讀已確定頻率範圍內的訊號增益和相位延遲。此設備最常用於測試控制迴路，但各位也可利用頻率響應分析儀來測量 LLC 轉換器功率級增益。圖 2 顯示了這種測量的接線圖。

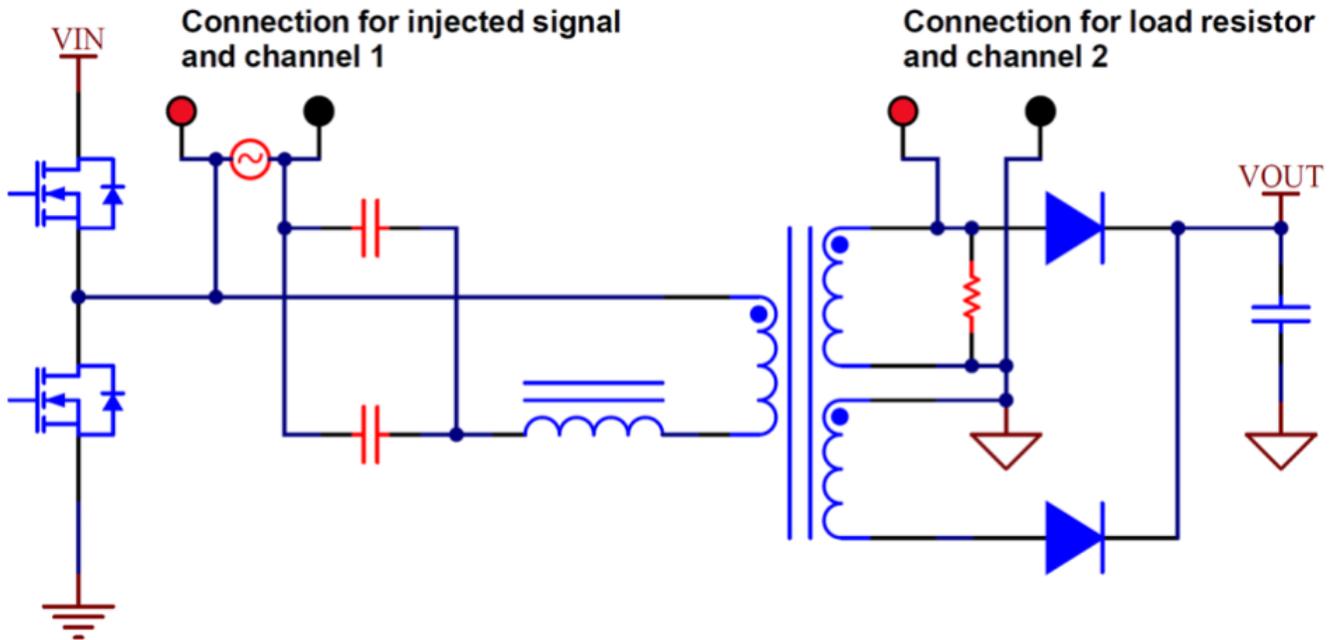


图 2. 將諧振電路連接至頻率響應分析儀以重新產生增益曲線圖的接線圖。功率級增益圖可透過顯示通道 2 電壓幅度除以通道 1 的電壓而得。來源：德州儀器

半橋式 LLC 具有一對諧振電容器，其中一個連接至輸入電壓，另一個則連接至主要接地。若要在此電路中執行測試，諧振電容器必須彼此並聯，並與主要繞組串聯。分析儀的注入訊號與通道 1 測量會透過一次側元件，從半橋的切換節點連接至諧振電容器的另一端。分析儀的二次通道 (通道 2) 透過二次繞組連接，並加入電阻以模擬負載條件。掃描注入的 AC 訊號頻率後，您可以藉由顯示通道 2 電壓幅度除以通道 1 電壓來繪製功率級增益。图 3 顯示了測試結果範例。

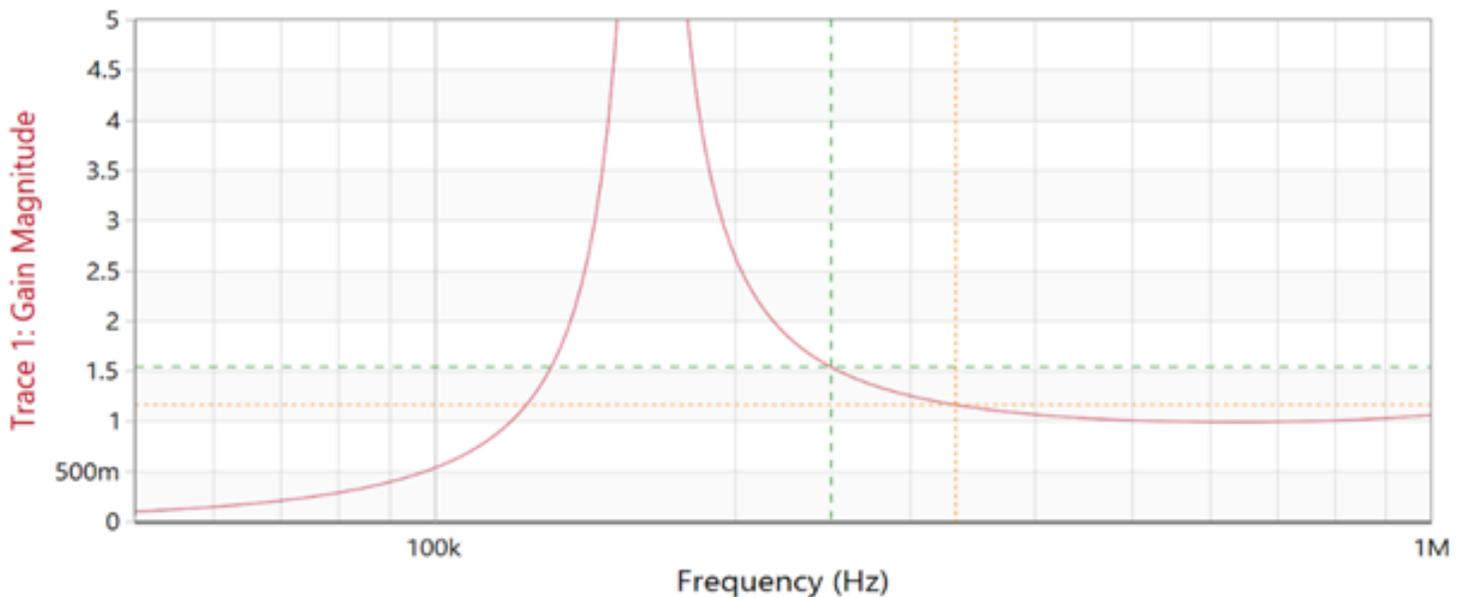


图 3. 可以從图 2 中所示的測試設定中觀察到的 LLC 諧振電路增益曲線測量範例。來源：德州儀器

您可以根據變壓器匝比和功率級一次側及二次側的開關與繞組配置，將功率級增益轉換為電壓增益。半橋式 LLC 功率級通常顯示為中心分接二次繞組和兩個輸出整流器。在此範例中，輸出電壓約為諧振電路於運作頻率下的輸入電壓、匝比與增益的乘積。图 4 中繪製的其他二次配置選項，可讓諧振電路轉換為更高的輸出電壓。請注意，如果一次側配置了全橋，則需要將這些比率乘以兩倍。

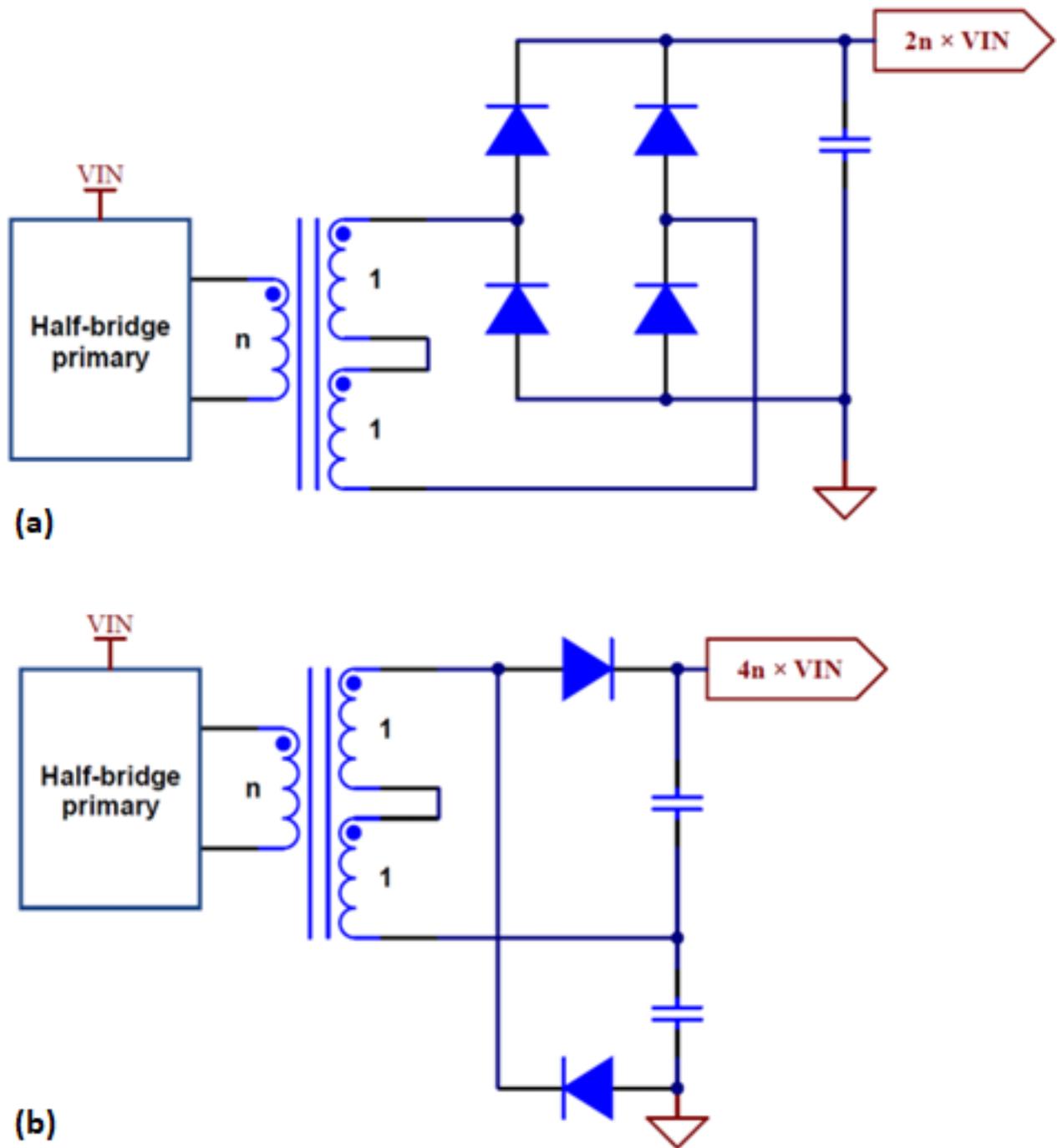


图 4. 在二次側配置一個全波整流器會使傳輸的能量 (a) 翻倍；雙端二次配置則可達到四倍電壓增益 (b)。來源：德州儀器

此技術的優點是可直接在 PCB 上進行測量，並在測試結果中考慮功率級寄生元件。TI E2E™ 設計支援論壇文章「[為什麼您的 LLC 諧振轉換器頻率會偏離](#)」使用替代模型來解釋變壓器結構如何在電路中引入其他電感 (图 5)。您可將這些固有寄生元件作為設計主軸，或將其整合至您的設計中。舉例來說，您可將洩漏電感作為諧振電感器，這樣便可從設計中移除實體元件來節省成本並提升效率。透過這個快速測試，可以使用此方法簡化諧振電路設計的最佳化過程。

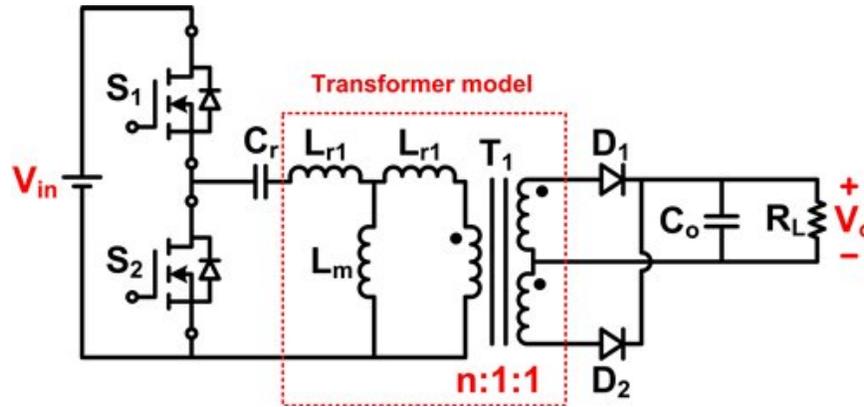


图 5. 使用洩漏電感作為 LLC 轉換器諧振元件的變壓器模型，讓設計人員能夠以固有寄生元件為設計主軸，或將其整合至設計中。來源：德州儀器

在二次側使用同步整流器，可進一步提升 LLC 轉換器效率。這麼做會降低傳導損耗，傳導損耗往往主導了元件的總損耗特性；不過，MOSFET 的選擇會改變增益曲線的形狀。低電阻 MOSFET 的輸出電容較大。變壓器匝比可以放大此電容，在某些情況下可能會造成問題。如我先前所提，測試電路中的增益曲線有助於計算整個功率級的其他寄生元件。图 6 重點呈現了初始諧振電路設計中，可能未注意到的 MOSFET 輸出電容所造成的影響。

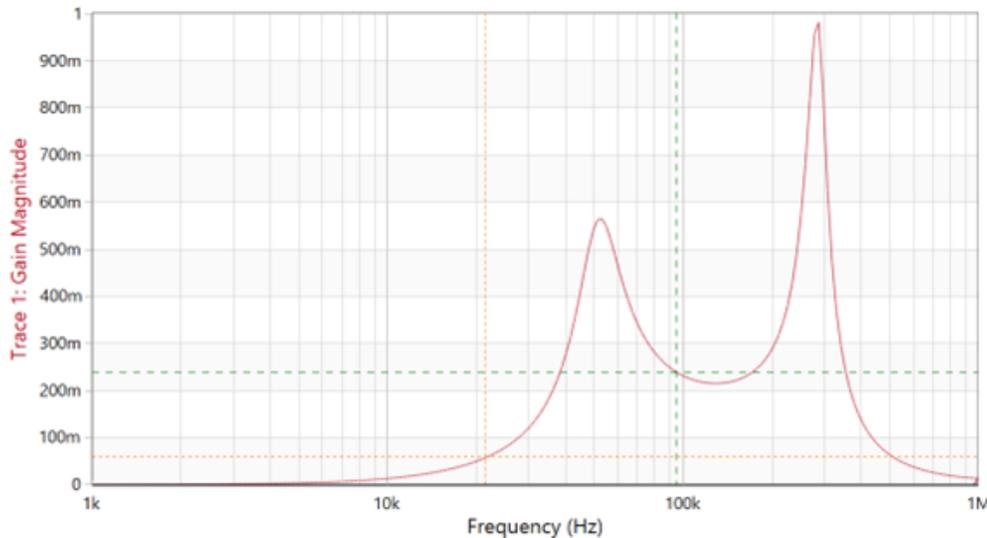


图 6. 在此設計中，寄生電容會增加 300kHz 左右的諧振，這並非設計階段所需。來源：德州儀器

但是，使用頻率響應分析儀無法將所有設計寄生元件納入考量。例如，測量結果不會顯示彼此耦合不良的二次繞組對中心分接頭結構的影響。一次繞組和二次繞組之間的鬆散耦合將形成洩漏電感，這在 LLC 設計中有一定的好處。不過二次繞組彼此耦合不良將會降低功率級的性能。在 AC 分析中不可能觀察到這種情況的影響，但在監測二次繞組電壓時會很明顯。

例如，图 7 中的設計具有正確的增益曲線。不過，觀察二次繞組的電壓時會發現，位準一開始時較高，然後降至低於輸出電壓的位準。在理想情況下，這些電壓波形應看起來更像方波。鬆散耦合還會在二次整流器的關閉邊緣產生大洩漏突波。隨著負載的增加，二次側彼此鬆散耦合的扭曲效應變得更加明顯，並限制可能的輸出電源。

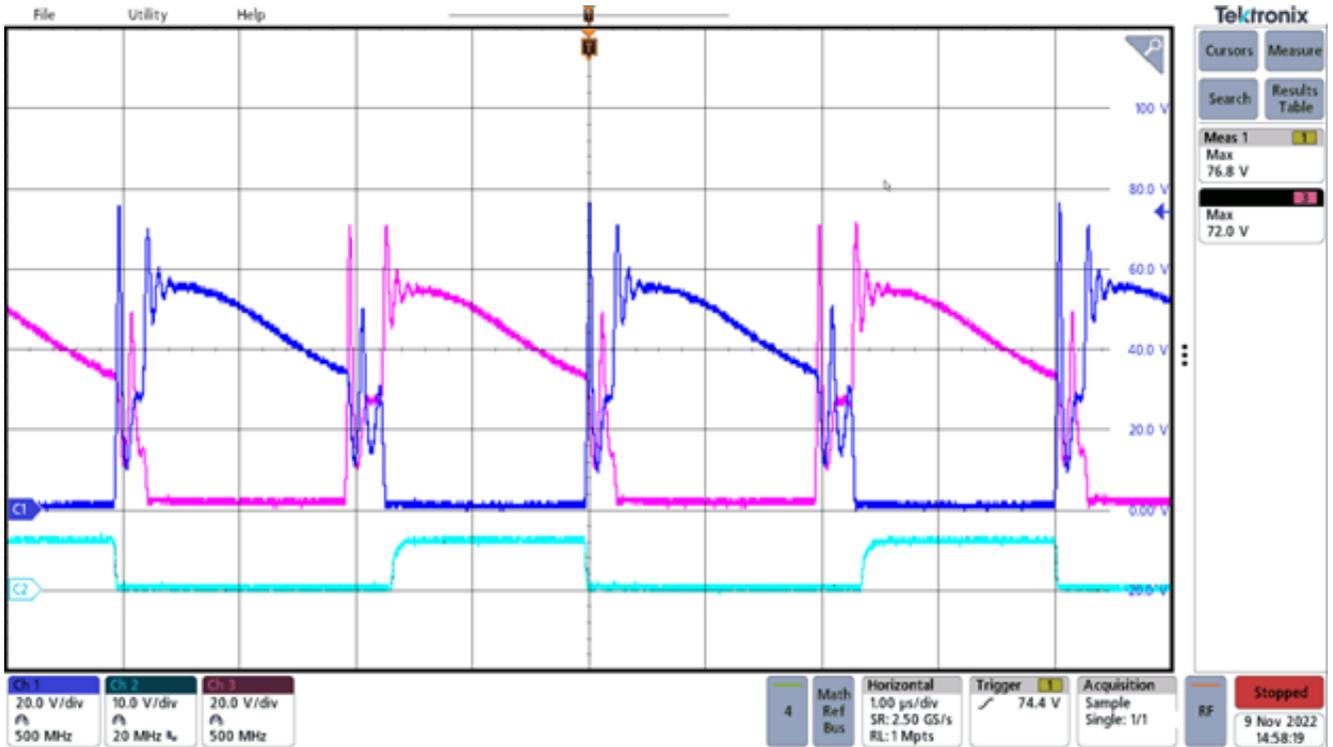


图 7. 變壓器設計中的鬆散耦合在切換波形中很明顯，但在增益曲線中並非如此。來源：德州儀器

即使重新配置此變壓器設計使二次繞組更好地耦合，產生的諧振電感和磁化電感仍保持不變。正如預期，增益曲線測量無肉眼可察覺的差異。但 图 8 中的切換波形描繪出新設計的顯著改善。

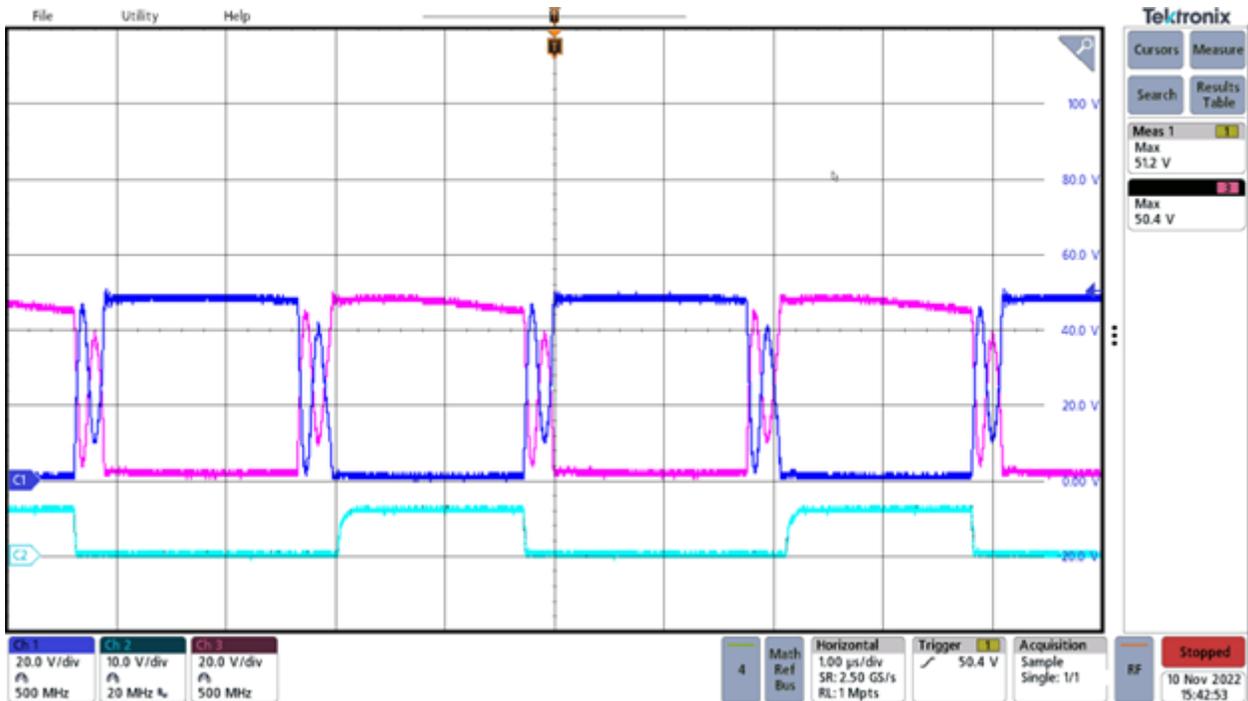


图 8. 改良版變壓器設計利用最佳的耦合減少電壓下降，同時維持增益曲線形狀。來源：德州儀器

重新配置二次繞組後，切換波形看起來更接近預期；波形更趨於方形，阻斷電壓等於輸出電壓。關閉邊緣的洩漏尖峰也得到消除。

兩種變壓器設計實際上相同，不需額外元件，不過這些變化對整體效率產生了很大的影響。

設計諧振轉換器時，請驗證諧振電路的增益曲線來開始評估。雖然無法偵測所有故障，但您仍能夠深入了解可達到的增益，以及預期的運作頻率範圍。

相關內容

- [用電訣竅 #84：跳脫 LLC 串聯諧振轉換器框架](#)
- [用電訣竅 #103：音訊放大器的 LLC 設計注意事項](#)
- [用電訣竅 #89：高頻諧振轉換器設計注意事項第 1 部分](#)
- [用電訣竅 #92：高頻諧振轉換器設計注意事項第 2 部分](#)
- [用電訣竅 #97：型塑 LLC-SRC 增益曲線以符合電池充電器需求](#)

其他資源

- [用電訣竅：了解 LLC 串聯諧振轉換器設計](#)
- [用電訣竅：LLC 串聯諧振轉換器的功用範圍](#)
- [用電訣竅：設計 LLC 諧振半橋式電源轉換器](#)

前述內容發佈於 [EDN.com](#)。

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 © 2024, Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), 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 will 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](#) 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.

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated