

Technical Article

1kW 高密度 LLC 電源模組中使用的平面變壓器概觀



Brent McDonald

不斷增長的數據中心電源需求推動了伺服器設備製造商實現更高的電源轉換效率，以減少系統的熱能足跡。從 12V 配電匯流排轉換至 48V 匯流排，需要高效率、小體積的降壓式轉換器（48V 至 12V）。

電感器-電感器-電容器 (LLC) 轉換器是公認的匯流排轉換器選擇拓撲結構，因為其能在高切換頻率的廣泛負載範圍中維持零電壓切換。在這篇用電訣竅中，我將概述高密度 1MHz 1kW 八分之一磚型 LLC 轉換器中使用的變壓器，其效率超過 98%。

LLC 轉換器設計

任何實用的 LLC 轉換器設計都從諧振電路的設計開始。為了讓 LLC 轉換器盡可能高效，轉換器將以接近諧振的固定頻率開環控制運作。使用變壓器洩漏電感作為諧振電感器，將可縮小整體轉換器的尺寸。此設計將以 1MHz 運作，讓變壓器及相關被動元件的尺寸盡可能小。圖 1 顯示為此設計選擇的電路參數。有關如何選擇這些參數的詳細資訊，請參閱參考資料 [1] 和 [2]。

Turns ratio	4-to-1
L_r	7 nH
L_m	2 μ H
C_r	3.52 μ F

圖 1. 以 1MHz 運作設計的 LLC 電路參數。

為了將效率最大化，必須為同步整流器使用多個並聯場效電晶體 (FET)。圖 2 中所示的矩陣變壓器架構將強制多個 FET 共用。在功能方面，每個變壓器的一次繞組有兩匝，每個中心抽頭二次繞組有一匝。將一次繞組串聯，會迫使相同電流流入每個一次繞組，進而迫使二次繞組均攤電流。

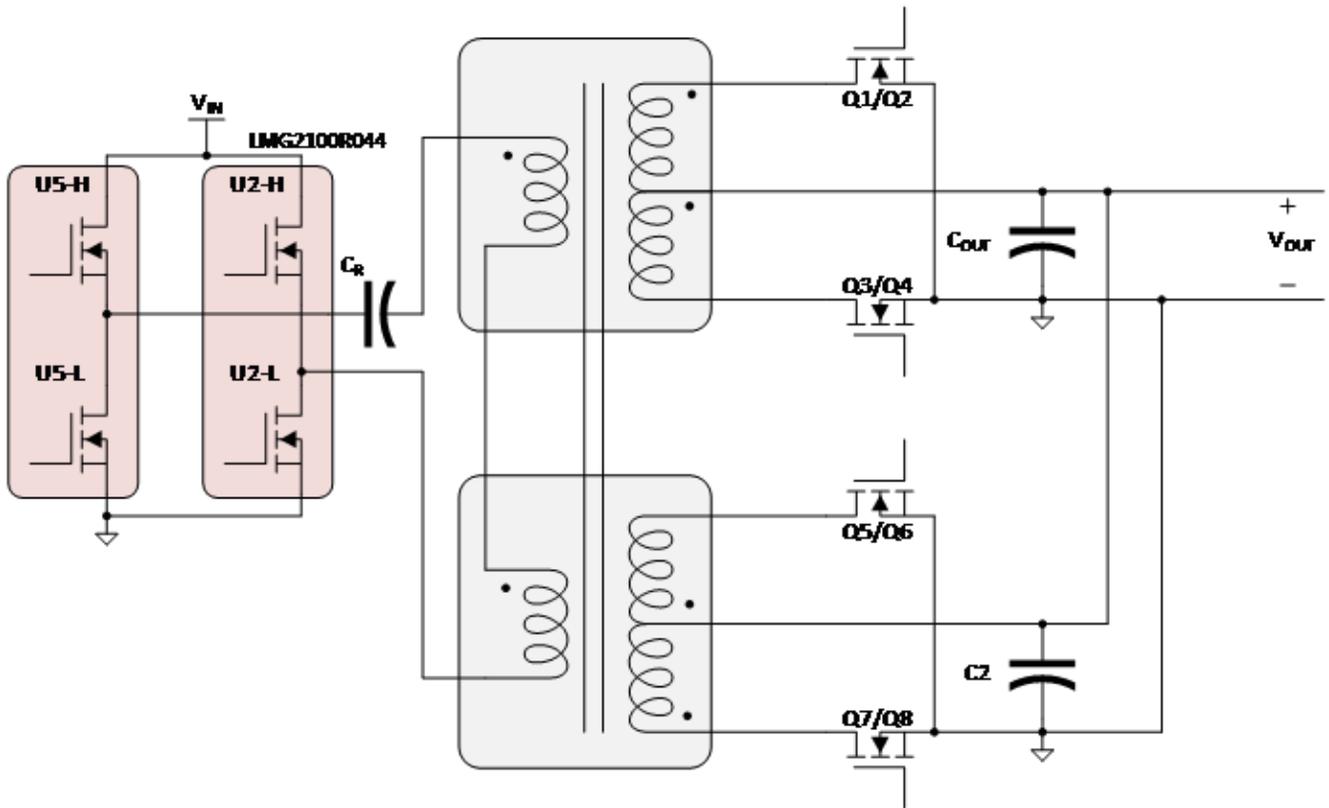


图 2. 搭載矩陣變壓器的 LLC 轉換器，可在多個 FET 間強制共享。來源：德州儀器

图 3 所示為兩個變壓器中的磁路徑，如 图 2 所示。第一張圖顯示兩個離散核心的情況。請注意，中間相鄰腿部的磁通相等，但方向相反。如 图 3 的中間圖所示，將兩個腿合併成單腿會導致淨磁通量為 0。由於核心的這一支腿沒有磁通量，所以可以消除該支腿，如最右邊的圖像所示。

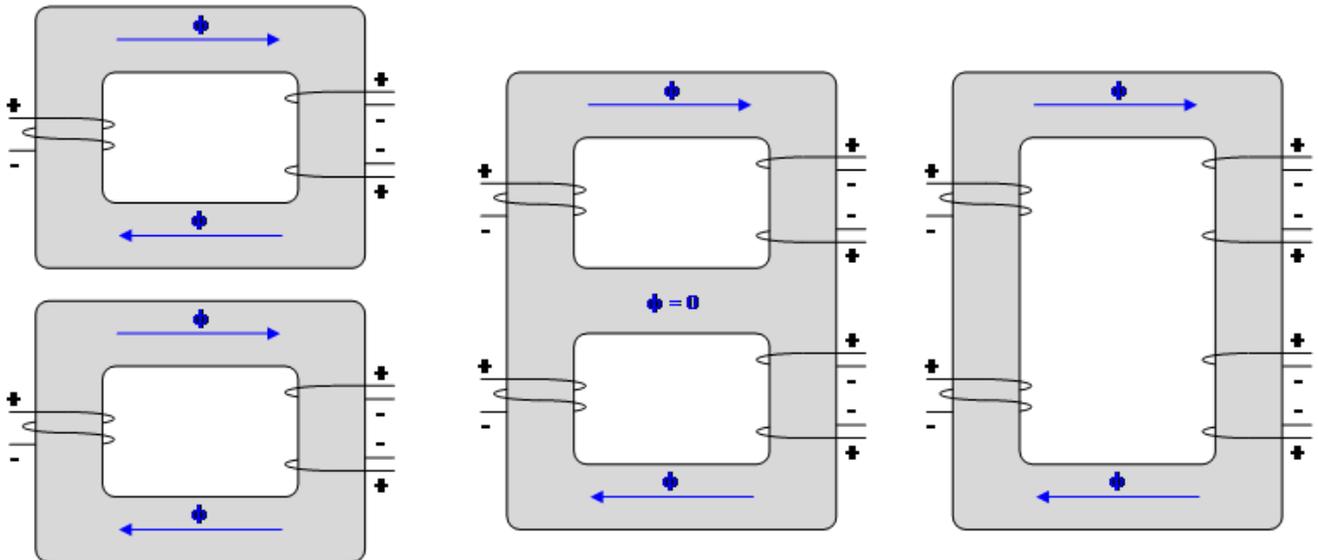


图 3. 矩陣變壓器整合的磁路徑如 图 2 所示。來源：德州儀器

因此，可以將 图 2 中所示的兩個矩陣變壓器元件整合到單一變壓器核心中。图 4 是具有單鐵氧體磁心上最終整合式矩陣變壓器的 LLC 轉換器示意圖 [3]。

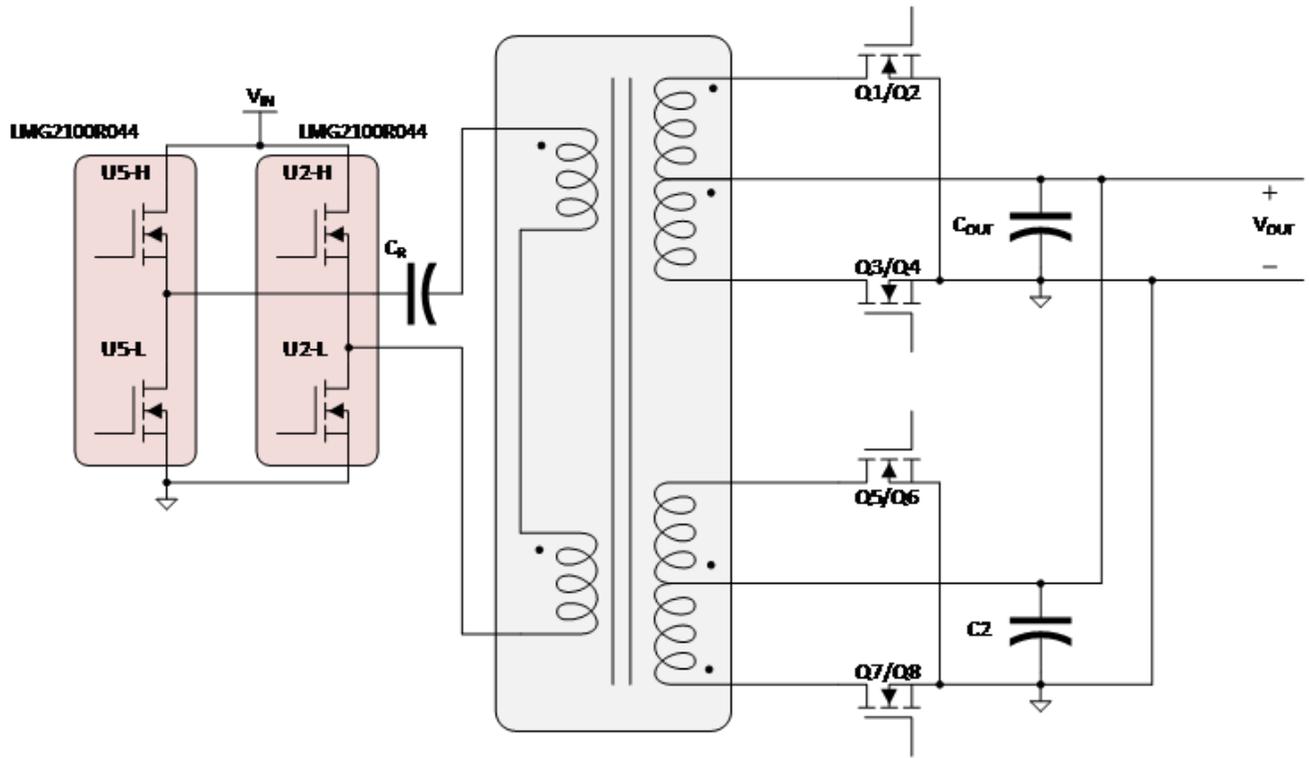


图 4. 在單鐵氧體磁心上具有整合式矩陣變壓器的 LLC 轉換器。來源：德州儀器

RMS 電流估算

轉換器中的多數損耗來自均方根 (RMS) 電流，因此需要準確方法來估算變壓器繞組中的 RMS 電流。[4] 中顯示的方法是假設轉換器以略低於諧振電路的切換頻率運作時，磁化電流會保持恆定。在此假設下，可以建立 LLC 轉換器主要波形的分段線性近似，而從這些分段電流的線性定義中，可以推導出變壓器一次電流和變壓器二次電流的 RMS 電流閉形表達式，如方程式 1 和 2 所示：

$$I_{1r,rms} = \frac{V_{out}}{4nf_r^{3/2}L_M} \sqrt{\frac{f_s(4\pi^2f_r^2L_M^2(2t_{dead}f_r+1)^2+n^4R_{load}^2)}{2R_{load}^2} + n^4f_r - n^4f_s} \quad (1)$$

$$I_{2sec,rms} = \frac{1}{4\sqrt{6}} \sqrt{\frac{f_sV_{out}^2}{f_r^3L_M^2} \left(\frac{3(4\pi^2f_r^2L_M^2(2t_{dead}f_r+1)^2+n^4R_{load}^2)}{R_{load}^2} - \frac{48n^4}{\pi^2} + 2n^4 \right)} \quad (2)$$

變壓器繞組設計

[2] 中說明的繞組交錯策略旨在將高頻相關損耗降到最低。图 5 說明印刷線路板 (PWB) 堆疊。

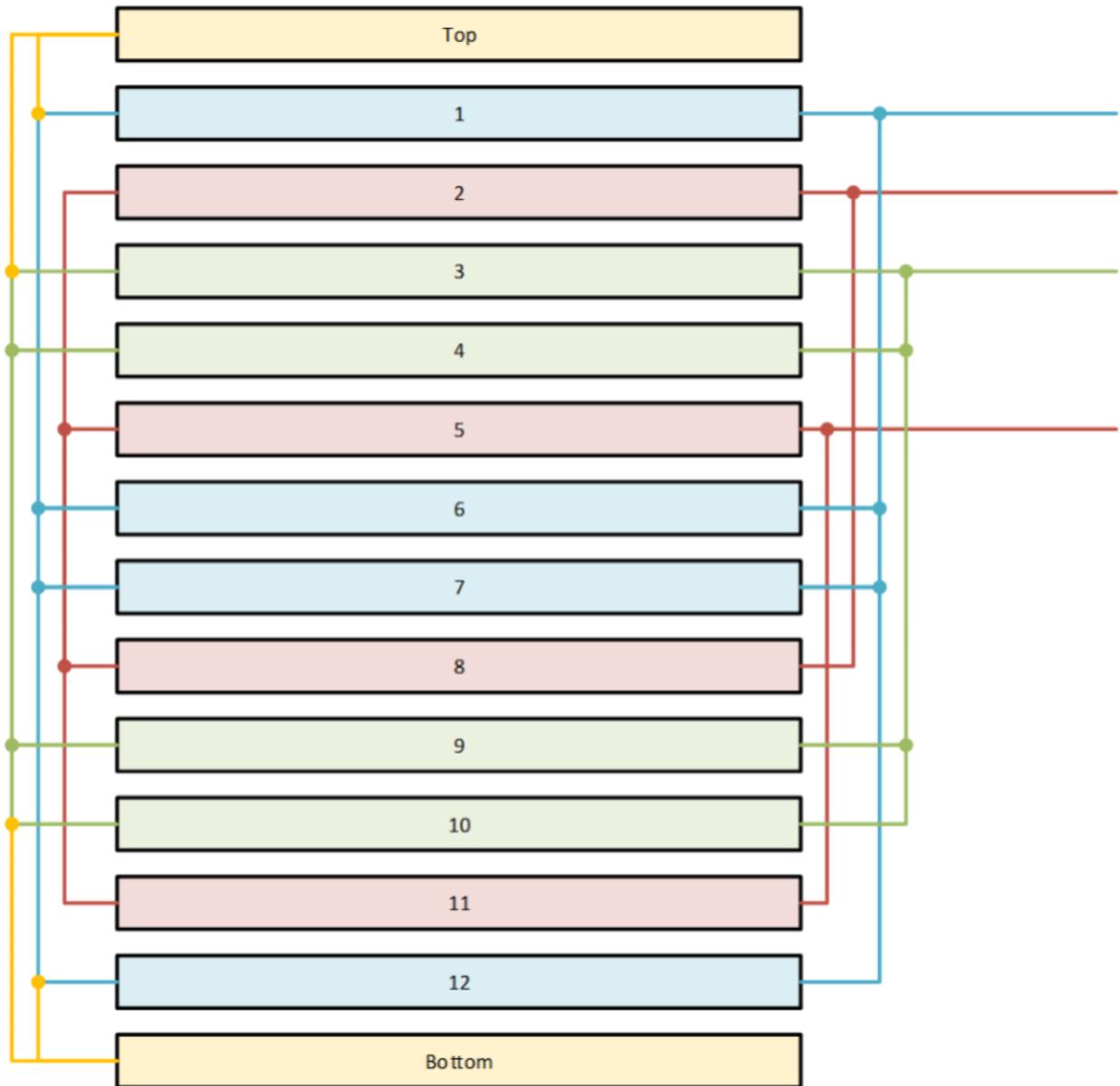


图 5. 變壓器 PWB 堆疊。來源：德州儀器

图 5 中的紅色繞組由四層 PWB 層組成。每層有兩匝。第二層和第五層是串聯的，第八層和第 11 層也是如此。此外，第二層和第五層與第八層和第 11 層並聯。图 6 顯示實際的 PWB 層。紅色和橙色的銅形狀為變壓器一次繞組。图 6 也會在切換週期的正半段以黃線顯示電流方向。

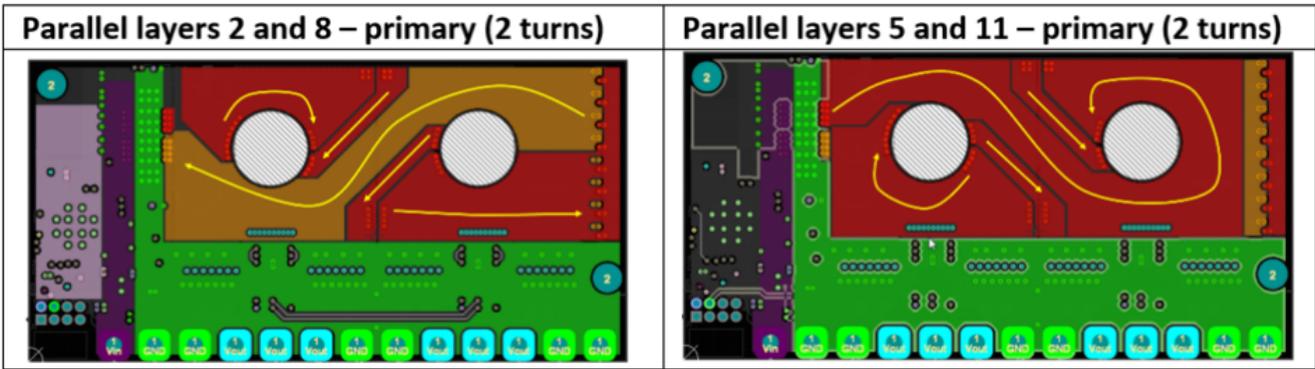


图 6. 變壓器一次繞組銅層以紅色和橙色顯示實際的 PWB 層。來源：德州儀器

图 5 中的藍色層全都並聯，構成變壓器二次繞組之一。图 5 中的綠色層與藍色層相同，但其對應的是變壓器的另一個二次繞組。图 7 顯示實際的 PWB 層。呈青藍色的銅形狀為變壓器二次繞組。中心分接頭的正半段顯示在左側，負半段顯示在右側。图 7 也會在切換週期的正半段以黃線顯示電流方向。

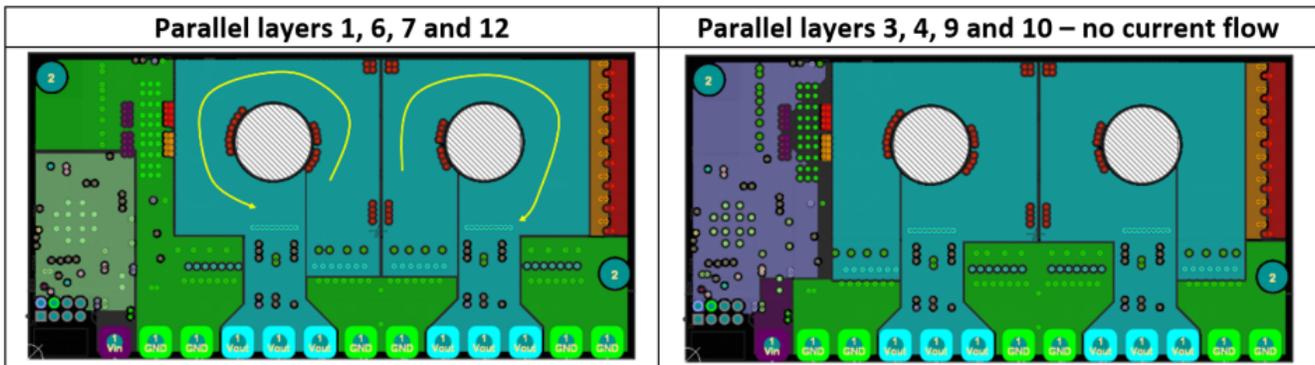


图 7. 實際 PWB 層，變壓器二次繞組的銅層為青藍色，中心分接頭的正半段（左）和負半段（右）。來源：德州儀器

雖然此繞組架構可有效減少 AC 損耗，但不會將繞組損耗降至零。為了更準確地估算這些損耗，首先必須更準確地估計繞組的 DC 電阻。這是透過計算實際繞組幾何的精確平面繞組弧線和直流有限元分析 (FEA) 模型之間的差異來完成的。準確平面弧線的電阻公式在方程式 3 中顯示：

$$R_{ca} = \frac{2 \times \pi}{\sigma \cdot h_{cu} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3)$$

σ 是銅的傳導率， h_{cu} 是銅層厚度， r_1 是弧線的內半徑， r_2 是弧線的外半徑。

图 8 是弧線的 DC FEA 模型與精確繞組幾何體之間的比較。僅使用四分之一模型可降低計算複雜性。 R_+ 和 R_- 是根據 FEA 模型結果計算繞組電阻的兩個獨立計算； R_{ca} 是方程式 3 的輸出。左圖根據方程式 3 校準 FEA 模型。右圖確定方程式 3 和實際幾何體之間的誤差。將此誤差用作比例因數可以調整模型，使其更貼近實際幾何體。

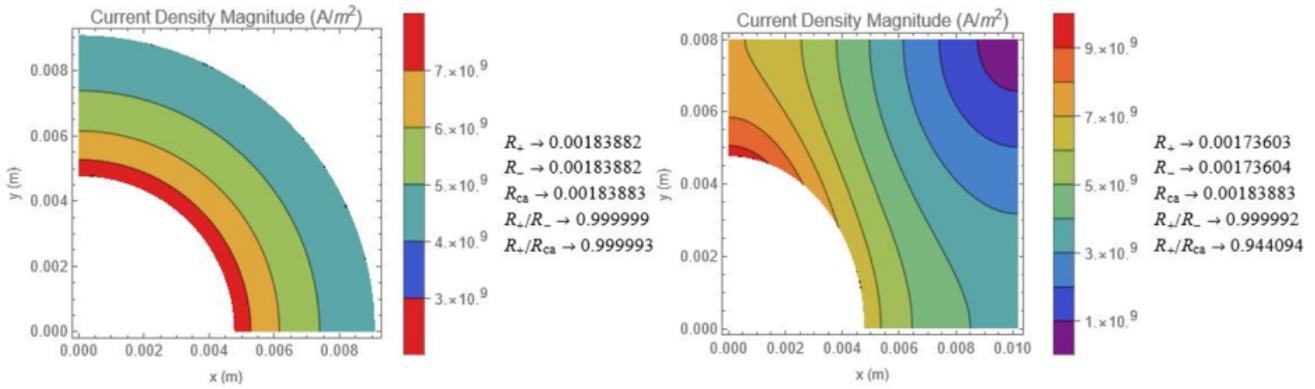


图 8. 有限元繞組 DC 電阻估計左圖根據方程式 3 校準 FEA 模型的位置，右圖確定方程式 3 與實際幾何體之間的誤差。來源：德州儀器

方程式 4 是最後一個繞組損耗方程式，其中包含來自 [5] 的校準和 AC 損耗影響：

$$R_{ac} = \frac{R_+}{R_{ca}} \frac{2 \times \pi}{\sigma \times h_{cu} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \times \text{Re}\left(\sqrt{j \times 2 \times \pi \times f_s \times \mu_0 \times \sigma \times h_{cu}} \times \coth\left(\sqrt{j \times 2 \times \pi \times f_s \times \mu_0 \times \sigma \times h_{cu}}\right)\right) \quad (4)$$

f_s 是切換頻率， μ_0 是 $4 \times \pi \times 10^{-7}$ 。

您可以使用 Ansys FEA 軟體檢查來自類比 LLC 轉換器波形的瞬態激磁下的變壓器繞組損耗。方程式 4 與 Ansys 瞬態 FEA 模型的吻合度在 1% 以內。

測試結果

图 9 是一張硬體圖像。

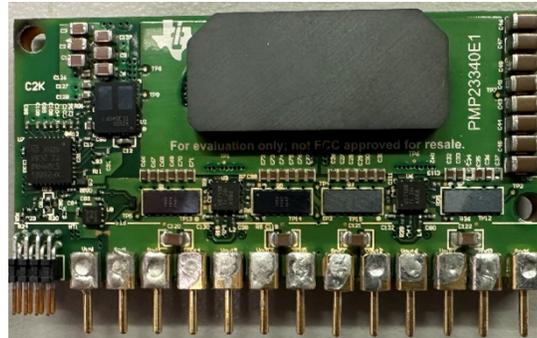


图 9. 八分之一磚型 LLC 轉換器則是原型硬體。來源：德州儀器

图 10 說明測量的硬體損耗和效率。此數據是以 48V 輸入恆定電流負載和強制空氣收集。图 10 也顯示模組效率，並比較預測與測量的損耗。

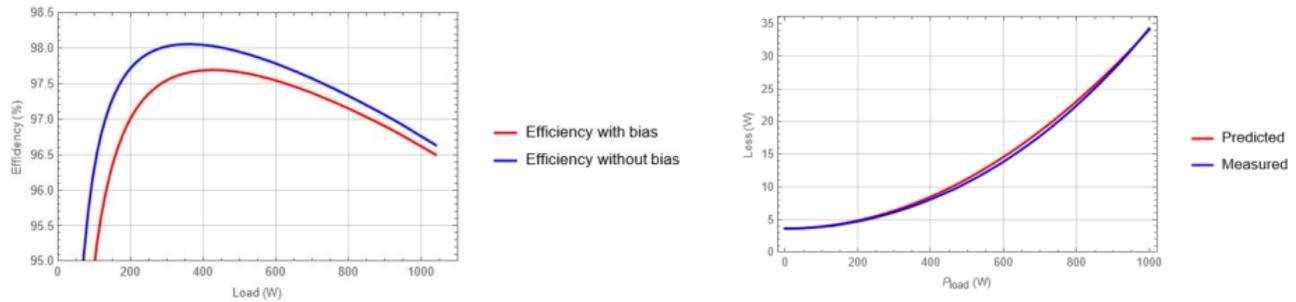


图 10. 測得的原型硬體效率、損耗和穩壓。來源：德州儀器

LLC 轉換器變壓器概覽

本用電訣竅為高效率 LLC 轉換器呈現分析良好的變壓器結構和繞組損耗估計方法。此方法搭配 LMG2100 [6] 等高性能 GaN 切換結合後，可讓數據中心電源供應設計人員設計出更小、更高效率的匯流排轉換器。

相關內容

- 用電訣竅 #121：使用主動式減震器提升相移全橋效率
- 用電訣竅 #120：隔離式偏壓變壓器寄生電容如何影響 EMI 效能
- 用電訣竅 #119：如何描繪電源變壓器的 EMI 效能特性
- 用電訣竅 #118：使用交錯式接地面來改善隔離式電源的雜訊過濾

參考資料

1. Huang, Hong。「設計 LLC 諧振半橋式電源轉換器」。德州儀器電源供應設計研討會 SEM1900，文件編號 SLUP263，2010-2011 年。
2. Bing Lu, Wendo Liu, Yan Liang, F.C.Lee 和 J.D. van Wyk。「LLC 諧振轉換器的最佳化設計方法。」發表於第 21 屆年度 IEEE 應用電力電子會議暨展覽會 (APEC)，2006 年 3 月 19 日至 23 日，6 頁。數位物件識別碼：10.1109/APEC.2006.1620590。
3. Ahmed, Mohamed。2019。「新一代微處理器的電源架構與設計。」維吉尼亞理工學院暨州立大學博士論文。
4. Liu, Ya。2007。「適用於寬負載範圍的 LLC 諧振轉換器高效率最佳化」維吉尼亞理工學院暨州立大學碩士論文。
5. Dowell, P.L。「變壓器繞組中的渦電流影響。」發表於《英國 IEE 學報》第 113 冊第 8 期 (1966 年 8 月)：第 1387-1394 頁。

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 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated