

## Technical Article

## 同步整流器可改善返馳電源供應器的交互穩壓



Brian King

在需要從單一電源產生多組輸出的系統拓撲選擇中，**返馳**是一個合乎邏輯的選擇。由於變壓器每個繞組上的電壓與其繞組匝數成正比，因此只要提供正確的繞組匝數，就能設定各輸出電壓。在理想情況下，如果對其中一組輸出電壓進行調節，所有其他輸出也會依據繞組匝數比例而縮放，並保持受控狀態。

然而，在現實世界中，寄生元件會影響，導致未受調節的輸出電壓的負載調節特性下降。在[用電訣竅 72](#)中，Robert Kollman 曾示範如何計算整流器正向壓降所引起的調節誤差。在這篇用電訣竅裡，我將進一步探討寄生電感的影響，以及如何透過使用同步整流器取代二極體，大幅改善反激式電源供應中的交叉調節能力。

舉例來說，如圖 1 簡化模擬模型所示，假設有一個返馳電路，能從 48V 輸入產生兩組 12V (1A) 的輸出。理想二極體模型假設具有零正向壓降與可忽略的電阻。變壓器繞組電阻被忽略，僅針對變壓器引腳串聯的寄生電感進行建模。這些電感代表變壓器內的洩漏電感，以及印刷電路板 (PCB) 佈線和二極體內的寄生電感。當設定這些電值時，兩個輸出會完美地互相追蹤，因為在開關週期的 1-D 期間二極體導通時，變壓器的完美耦合會強制兩個輸出相等。

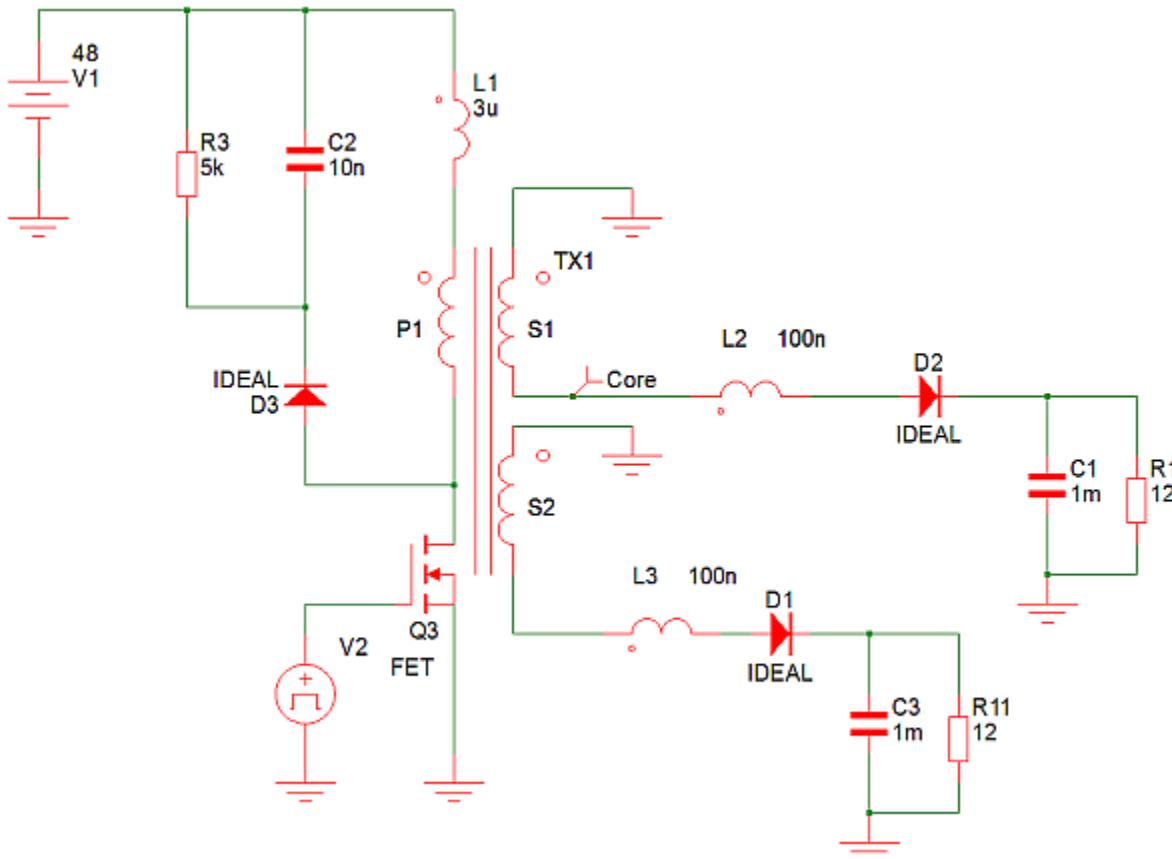


圖 1. 這個簡化的返馳模型模擬了漏感對輸出電壓調節的影響。

現在，假設在變壓器的兩個次級繞組引腳中各加入 100nH 的漏感，並在一次級繞組串聯 3μH 的漏感，會發生什麼情況呢？這些電感模擬電流路徑中的寄生電感，包括變壓器內部的漏感，以及 PCB 和其他元件中的電感。當一

次場效電晶體 (FET) 關閉時，一次洩漏電感仍有電流流動，次級洩漏電感則以 0A 的初始條件開始 1-D 期間。變壓器磁芯上出現在所有繞組中共通的基準電壓。這個基準電壓使一次級漏感電流能夠下降至 0A，而次級漏感電流則上升，將電流輸送至負載。

當兩個輸出皆為高負載時，電流會在整個 1-D 期間持續流動，輸出電壓也能維持良好的平衡，如图 2 所示。然而，當其中一個輸出設為高負載而另一個為輕負載時，輕負載輸出上的輸出電容容易由此基準電壓產生峰值電荷；此時，其輸出二極體會因電流迅速回到零而停止導通。請參見图 3 中的波形。由這些寄生電感所造成的峰值充電效應，其交叉調節影響通常遠比整流器順向壓降單獨造成的影響嚴重。

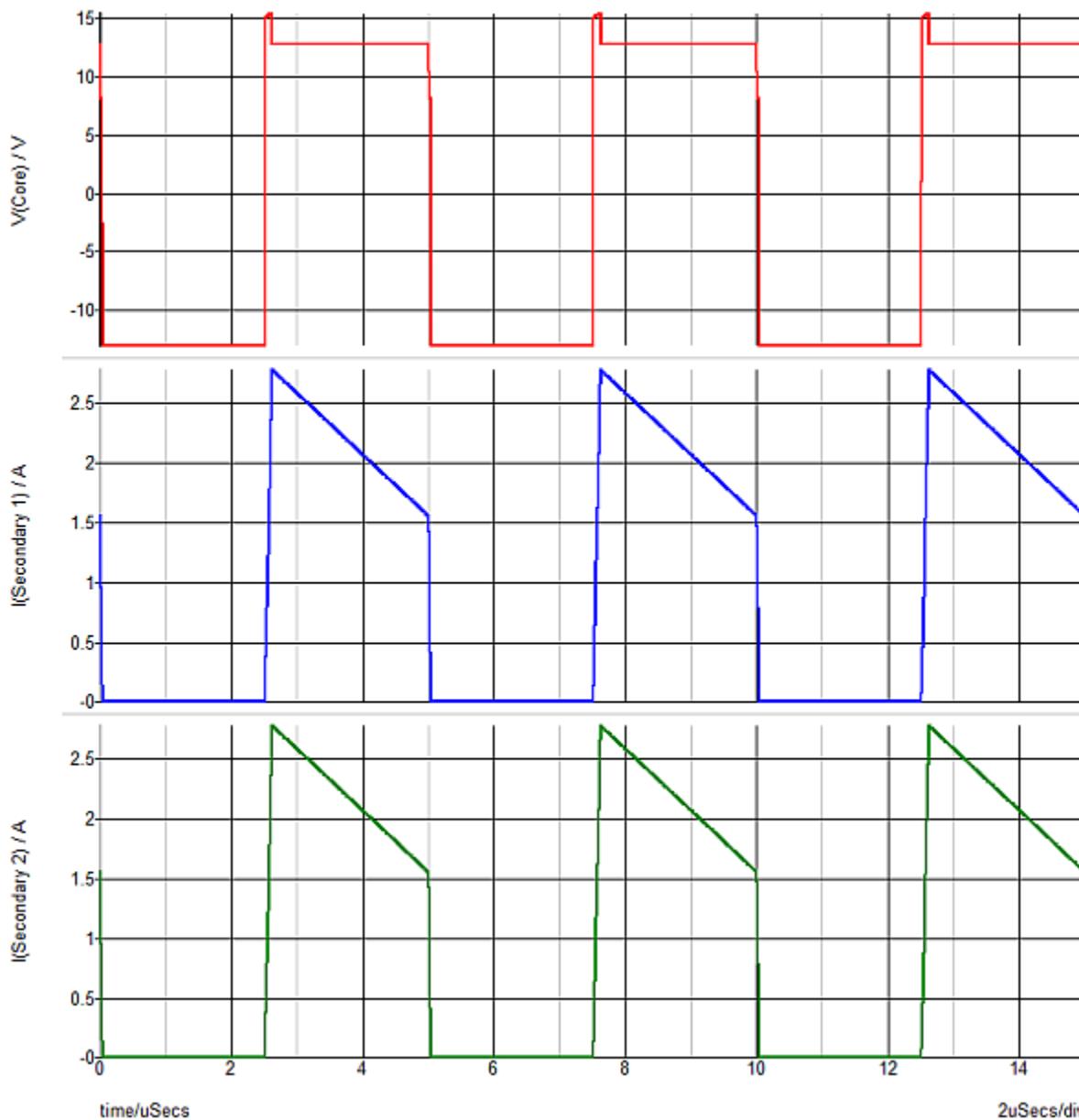


图 2. 當兩個輸出皆承受高負載時，次級繞組電流會在整個 1-D 期間流經兩個次級繞組。可以在上方紅色曲線中看到基準電壓。

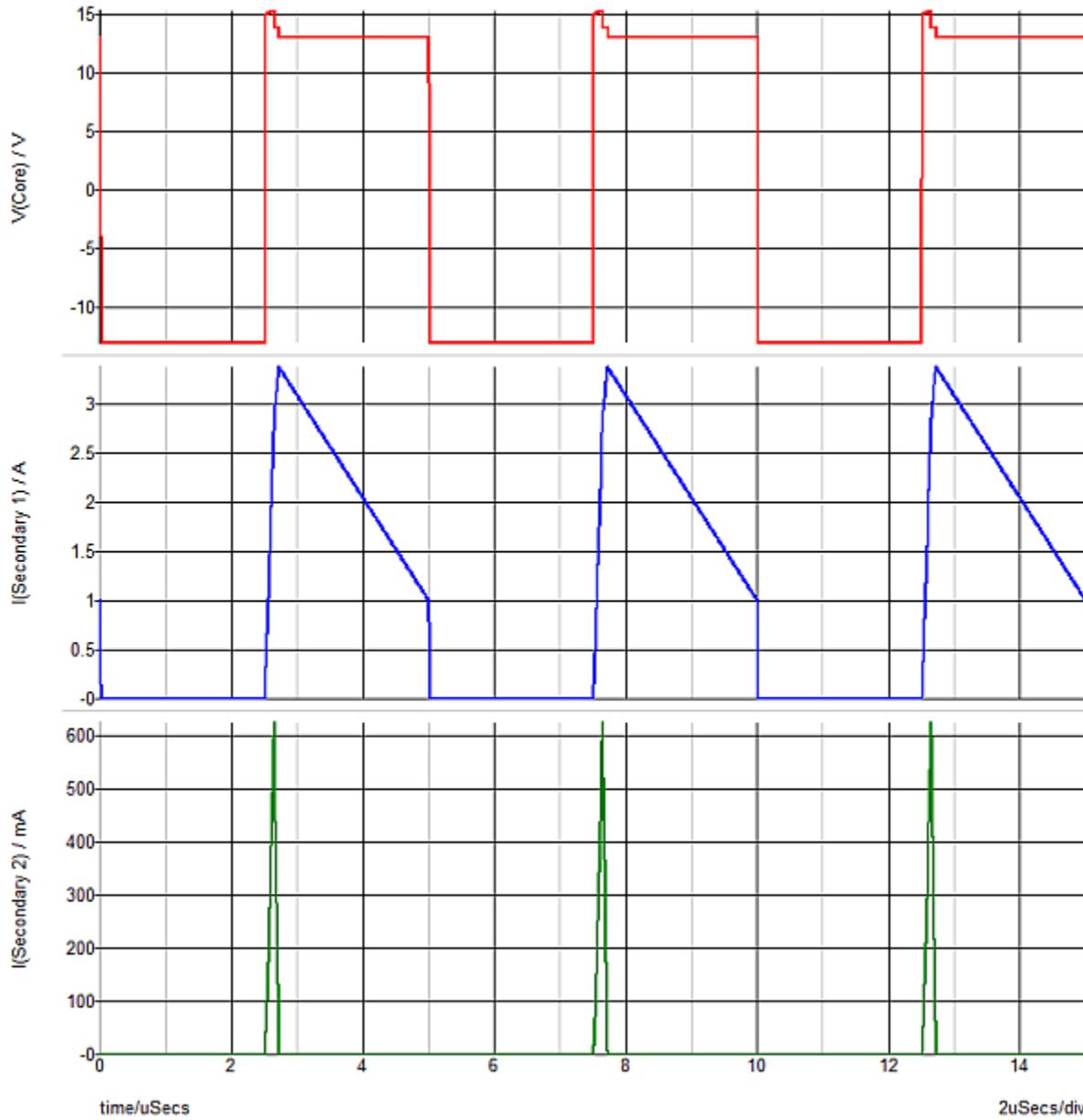


图 3. 次級 1 為重負載，而次級 2 為輕負載。基準電壓會使次級 2 的輸出電容產生峰值充電。

同步整流器能夠改善此問題，因為它會強制電流在整個 1-D 期間流經兩個繞組，而不受負載條件影響。圖 4 顯示了與圖 3 相同負載條件下的波形，但將理想二極體替換為理想同步整流器。由於同步整流器在基準電壓衰減後仍保持導通，即使在嚴重不平衡的負載情況下，兩個輸出電壓依然能夠良好地同步追蹤。

雖然次級 2 的平均電流非常小，但其均方根值 (RMS) 成分仍可能相當高。這是因為，不同於圖 3 中的理想二極體，同步整流器會在整個 1-D 期間強制維持連續電流流動。有趣的是，為了讓平均電流值保持低水準，在這段期間中電流必須有相當長一部分為負值。

顯而易見，這是在以較高的循環電流為代價來換取更佳的電壓調節。然而，這並不必然意味著會導致更高的整體損耗。由於同步整流器的順向壓降通常遠低於二極體，因此在高負載條件下，其效率往往能顯著優於傳統二極體設計。

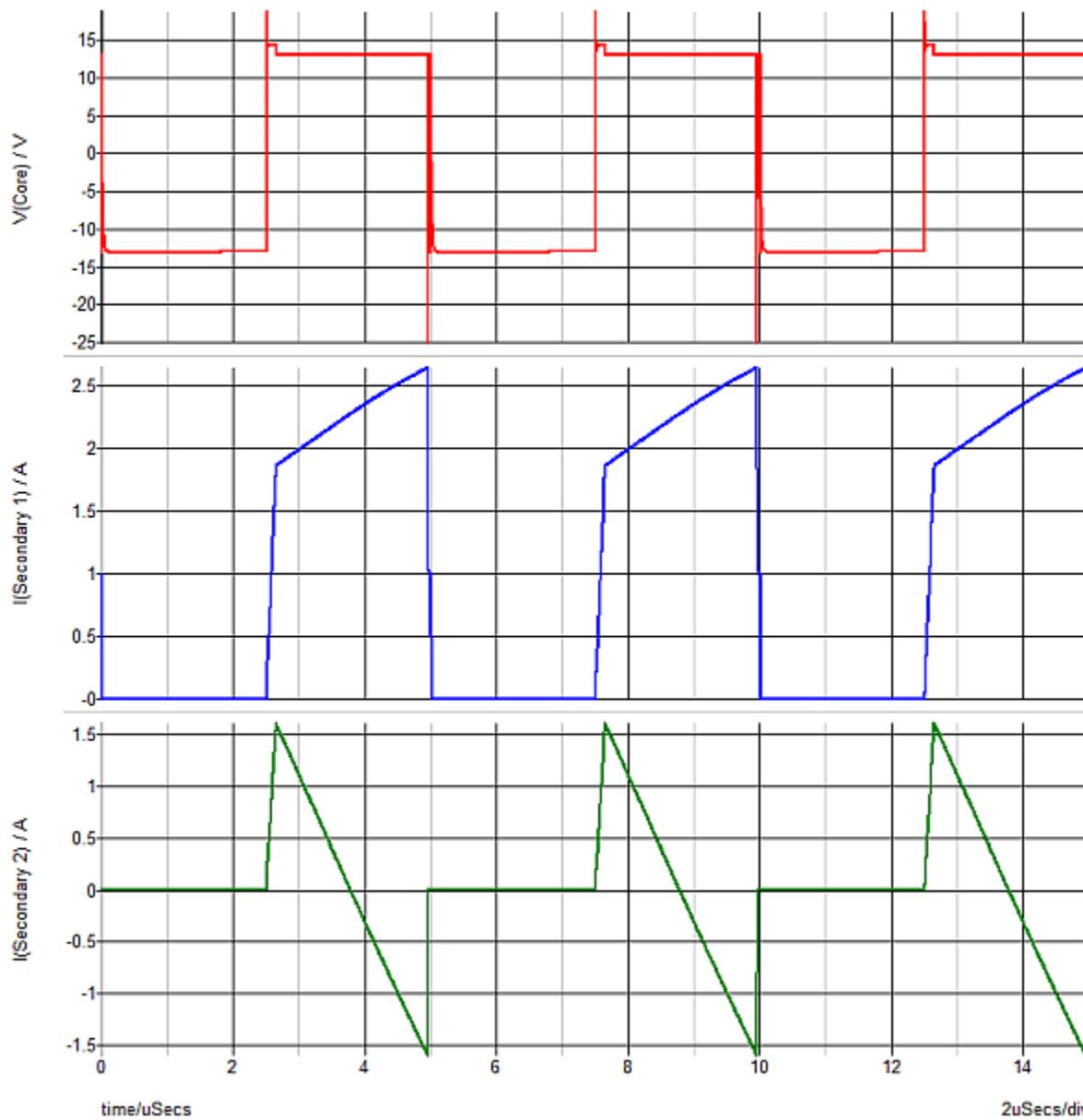


图 4. 將二極體替換為同步整流器會強制電流同時流經兩組次級繞組，並消除由基準電壓引起的峰值充電效應。

您可以在图 5 中清楚看到對交叉調節的影響。在此情境下，輸出 1 的負載固定為 1A，而輸出 2 的負載則由 10mA 掃描至 1A。當負載低於 100mA 時，若使用二極體，由於基準電壓造成的峰值充電效應，交叉調節性能會嚴重劣化。

注意，這裡僅觀察漏電感的影響，因為模擬中使用的是理想二極體與理想同步整流器。當再考慮到電阻以及整流器順向壓降的影響時，採用同步整流器的優勢會進一步放大，正如《用電訣竅 72》所述。

因此，若希望在多輸出反激式電源中達到卓越的交叉調節性能，請考慮使用同步整流器。額外的好處是，這也很可能同時提升您的電源轉換效率。請參考 TI 的 40V 至 60V DC 輸；40W 雙路輸出隔離返馳式轉換器 (6V@4.33A) 和 適用於 PoE 應用的 3 級雙路輸出隔離返馳式轉換器 參考設計，作為採用同步整流器的反激式電源範例。

## Effects of Leakage Inductance on Cross Regulation

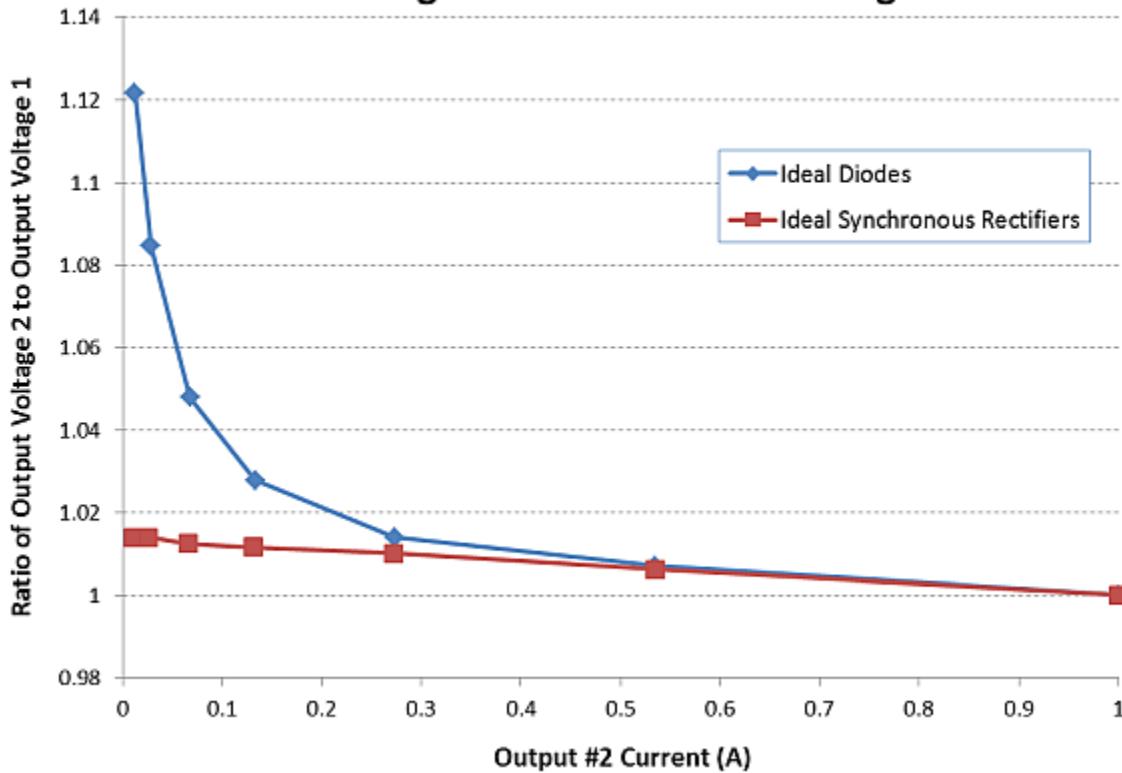


图 5. 本圖顯示在輸出 1 維持 1A 穩定負載的同時，隨著輸出 2 的負載變化，兩組輸出之間的交叉調節情況，突顯出同步整流器如何緩解漏感的影響。

如需其他用電訣竅，請參閱 Power House 上的 TI [用電訣竅部落格系列](#)。

其他資源：

- 觀看影片「[拓撲教學課程：什麼是返馳？](#)」
- 下載 TI 的[返馳與返馳選擇工具](#)，協助您根據規格選擇適當的隔離式 DC/DC 拓撲結構。

另請參閱：

- [用電訣竅 72：為多重輸出返馳選擇適當的整流器](#)
- 該方法可為同步整流器提供自我定時機制
- 同步整流可減少功耗，進而提升效率
- [LLC 同步整流簡化設計、更堅固且效率更高](#)

先前已發表於 EDN.com。

### 註冊商標

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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 的產品受均受 [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 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](#) 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