

Technical Article

不要採用艱難的方式進行切換；以 PWM 全橋實現 ZVS



John Dorosa

全橋式轉換器

全橋式轉換器為隔離電源轉換提供了高效的解決方案 (图 1)。在此拓撲結構中，控制方法的選擇將影響轉換器的整體效能。大多數工程師只考慮硬性切換全橋 (HSF B) 或相移全橋 (PSFB)。在此用電訣竅中，我將示範對脈衝寬度調變 (PWM) 控制全橋進行一項簡單修改，此修改可透過實現零電壓切換 (ZVS) 來提升效率，並消除變壓器繞組上的共振振鈴。

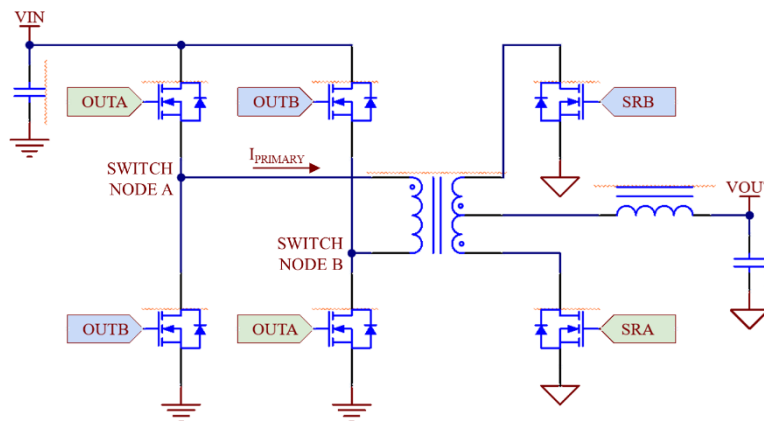


图 1. 同步 HSF B 轉換器的功率級範例。來源：德州儀器

HSFB

HSFB 轉換器使用兩個相位相差 180 度的輸出訊號 (OUTA 和 OUTB) 來控制一次側橋式電路上的對角 FET，如 图 1 所示。控制器允許一次側 FET 有三種狀態：OUTA 高和 OUTB 低、OUTB 高和 OUTA 低、OUTA 和 OUTB 都低。為維持穩壓，控制器會調變各狀態所花費時間的比率。

图 2 從下到上顯示 OUTA 和 OUTB 訊號、主要橋接器各側的切換節點電壓，以及主要繞組電流。當 OUTA 和 OUTB 皆為低時，切換節點會在失效時間內回到一半輸入電壓。

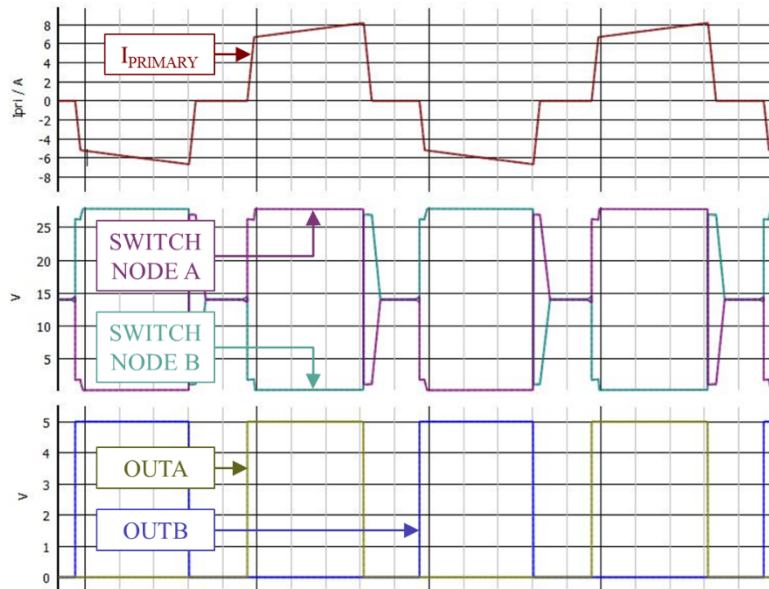


图 2. 驅動一次側對角 FET 的傳統配置 (1 μ s/div)。來源：德州儀器

當失效時間內沒有一次側 FET 導通時，二次側電流將持續透過同步整流器進行續流。此時，儲存在一次側的洩漏能量會與一次側 FET 的輸出電容產生共振，當 OUTA 或 OUTB 其中之一轉為低電位時，將產生巨大的洩漏突波。此共振會影響一次側的所有四個 FET。图 3 顯示洩漏突波可能到達的幅度。實務上，較大的洩漏突波可能需要使用較高電壓的元件。

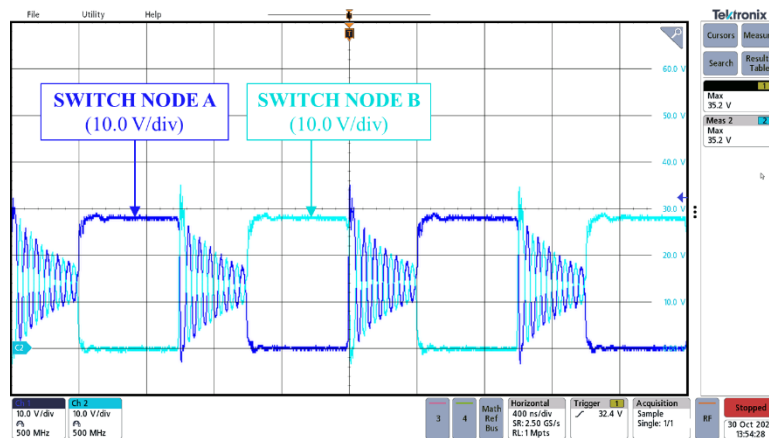


图 3. 傳統配置下的一次側切換節點 (400ns/div)。來源：德州儀器

互補邏輯的替代方法

另一種方法是使用互補邏輯，分別控制橋式電路兩側的一次側 FET。在此方法中，PWM 高會開啟高側 FET，而 PWM 低則會開啟低側 FET。图 4 說明使用此方法的圖表。

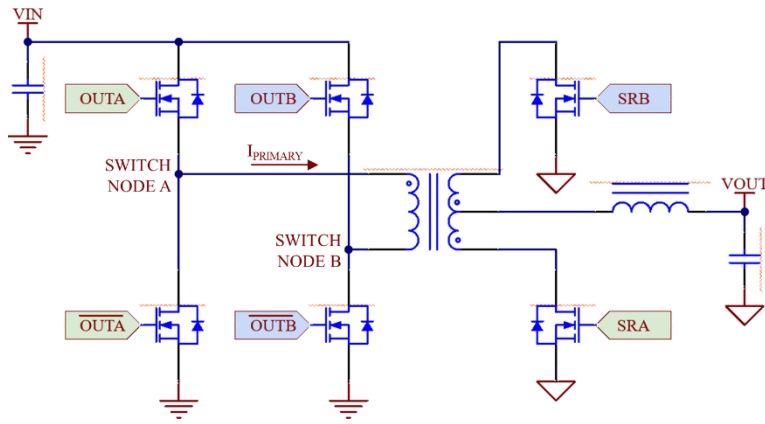


图 4. 同步 ZVS 全橋式轉換器功率級範例。來源：德州儀器

图 5 顯示此方法的 PWM、切換節點電壓與一次側電流。由於一次側各有互補訊號，兩個低側 FET 現在都會在失效時間開啟。在傳統方法中屬於死區時間的期間，此設計可讓一次側電流持續透過兩個低側 FET 進行續流。

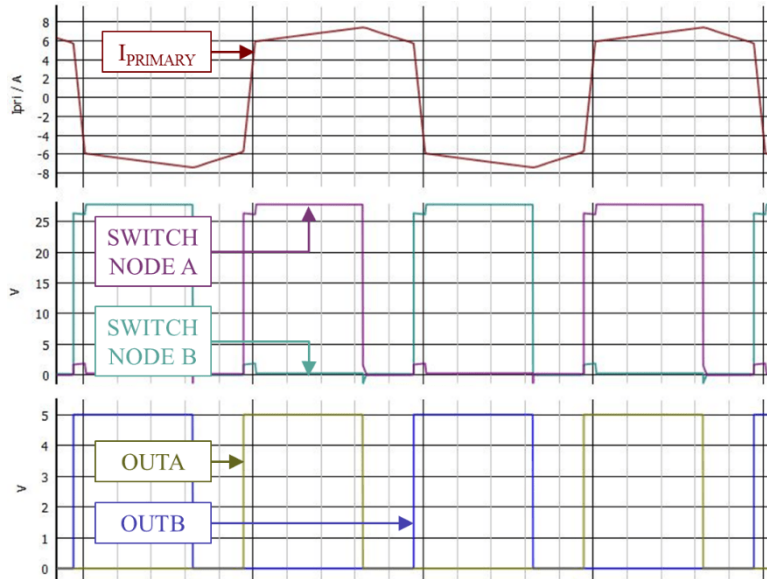


图 5. 驅動一次側 FET (1 μ s/div) 的互補 PWM。來源：德州儀器

一次側的續流電流具有多項優點。首先，一次側 FET 可實現 ZVS。图 6 顯示 ZVS 事件期間全橋一側的主要切換節點和 PWM 邏輯。在產生表示 ZVS 的閘極驅動訊號之前，汲極至源極電壓降至零。

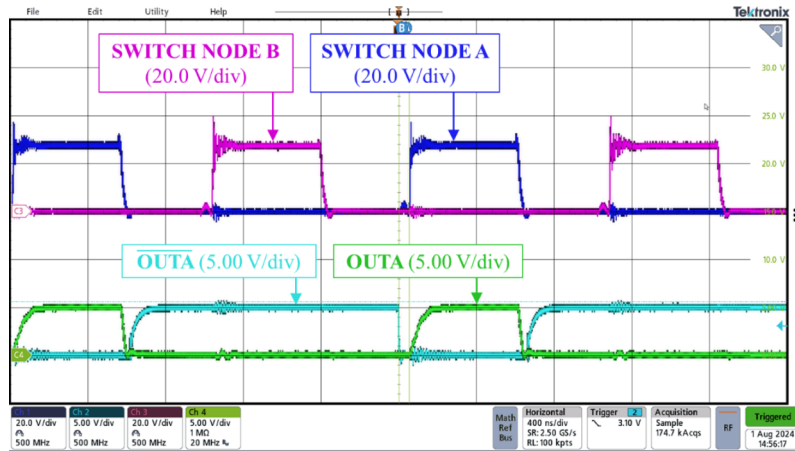


图 6. 互补 PWM 配置下的一次侧切换节点 (400ns/div)。来源：德州仪器

另一个优点是可减少整个转换器的杂讯。当主要切换节点波形由图 3 转换为图 6 时，大幅洩漏突波与共谐振铃将被消除。二次整流器在变更一次侧以取得 ZVS 后，杂讯也有所降低。

图 7 比较两种设计选项的二次整流器汲极至源极电压。HSFB 变化明显含有更多振铃，需要使用缓冲器来减轻压力，但代价是整体系统效率下降。在一次侧改成 ZVS 会减少二次侧 FET 上的振铃。此情况下虽仍存在洩漏突波，但使用二极体箝位电路会比采用缓冲器更为合适。

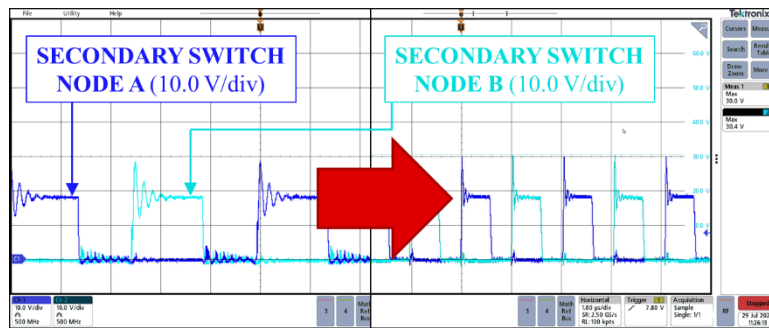


图 7. 传统配置 (400ns/div) (左)；使用互补 1.00μs 讯号 (PWM/div) (右)。来源：德州仪器

修改的 HSFB 参考设计

仅引入 ZVS，便可在各种负载条件下提升效率。图 8 比较了修改后的 HSFB 参考设计「适用于 100kRad 应用的 100W、5V 输出硬切换全桥式转换器参考设计」，该设计在一次侧采用 ZVS 逻辑，并与原始的 HSFB 资料进行比较。一次侧 FET 的逻辑是唯一的变更；若进一步最佳化一次侧 FET 驱动器并改善二次侧保护电路，将可进一步提升此方法的效益。

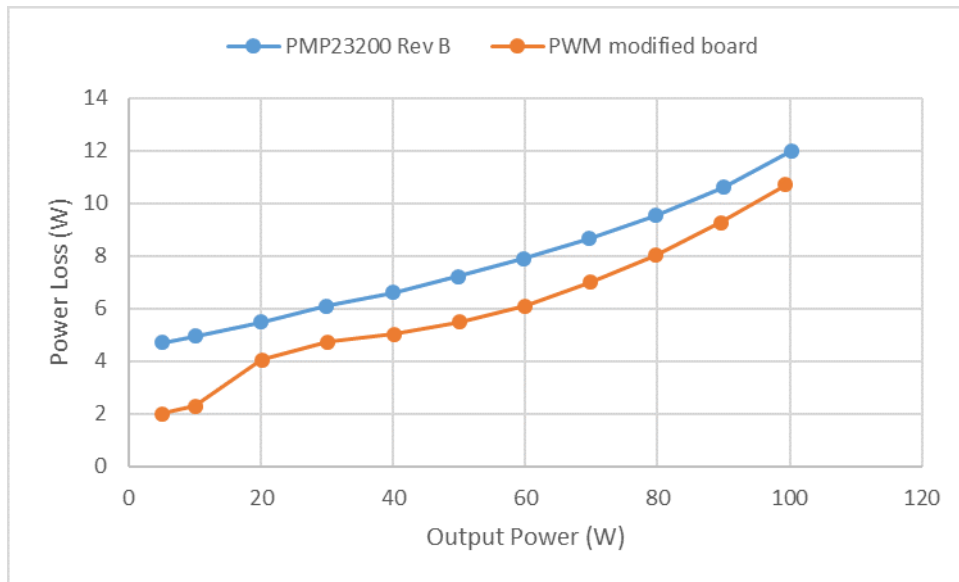


图 8. 傳統配置 (TI HSFB 參考設計修訂版 B) 與 PWM 配置 (修改板) 的總功率損耗與輸出功率比較。來源：德州儀器

互補邏輯的共模限制

在全橋式轉換器上使用互補邏輯，可讓主要 FET 達到 ZVS。此方法對系統效率有許多優點，而且易於實作。

在測試案例中，標準同步全橋式轉換器只需要調整邏輯即可產生互補訊號。您可利用邏輯 NOR 閘進行此調整；或者，HSFB 參考設計中使用的德州儀器 [TPS7H6003-SP](#) 閘極驅動器等部分驅動器具備 PWM 模式，其中在訊號偏高時，單一輸入訊號會驅動高壓側 FET，而在訊號偏低時則會驅動低壓側 FET。如您所見，控制邏輯的這種微妙改變可在系統效能上帶來巨大效益。

相關內容

- [用電訣竅 #133](#)：測量 TLVR 中的總洩漏電感，以將效能最佳化
- [用電訣竅 #123](#)：使用雙升壓轉換器來延伸高轉換比設計的功率範圍
- [用電訣竅 #117](#)：在完整操作條件下進行測試之前，先測量 LLC 諧振電路
- [用電訣竅 #97](#)：型塑 LLC-SRC 增益曲線以符合電池充電器需求
- [用電訣竅 #94](#)：倒置降壓如何為非隔離式返馳提供拓撲替代方案

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