

Technical Article

使用主動式緩衝器改善提升相位全橋效率



Ben Lough

圖 1 中所示的相移全橋式轉換器 (PSFB) 在超過 500 W 的應用中相當常見，因其可在輸入開關上實現軟切換，進而提升轉換器效率。雖然切換損耗大幅降低，但輸出整流器仍可能承受高電壓應力，因其寄生電容會與變壓器洩漏電感產生共振 (在圖 1 中以 L_r 表示)。輸出整流器的電壓應力可高達 $2V_{IN} N_S/N_P$ ，其中 N_P 和 N_S 分別是變壓器的主要與次要繞組。

傳統上，為了限制輸出整流器的最大電壓應力，需使用如電阻-電容-二極體 (RCD) 緩衝器等被動式緩衝器 [1]；但使用被動式緩衝器會耗散功率，進而造成效率損失。

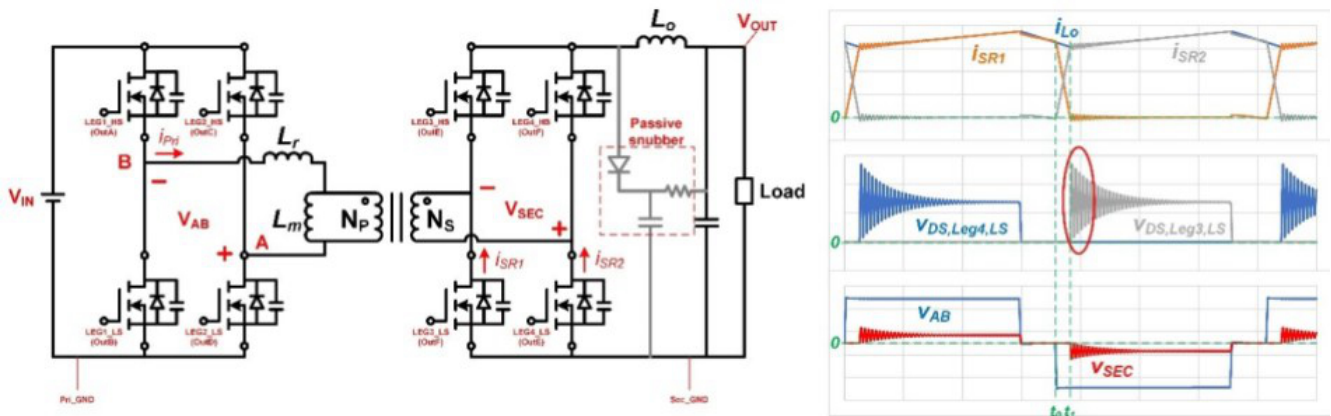


圖 1. 具備被動式箝位的 PSFB 功率級及其波形，使用被動式箝位會耗散功率，進而導致效率損失。來源：德州儀器

或者，您可以使用主動式緩衝器來箝制整流器電壓應力，而不會在緩衝電路中耗散功率 (假設為理想的開關) 2。圖 2 顯示在輸出電感器之前插入由電容 (C_{CL}) 與 MOSFET (Q_{CL}) 構成的主動式箝位腿 (ACL)。當輸出繞組電壓變成非零時，能量將從一次繞組轉移到二次繞組，為輸出電感器供電，同時透過 Q_{CL} 本體二極體傳導電流，為 C_{CL} 充電，即使 Q_{CL} 未導通。您可在本體二極體傳導電流後開啟 Q_{CL} 可確保 Q_{CL} 上的零電壓切換 (ZVS)。

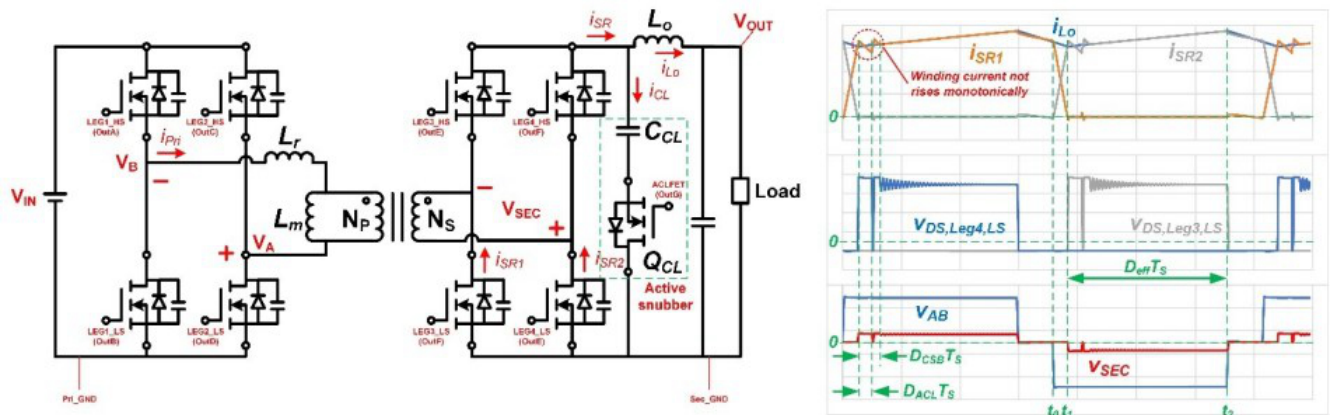


圖 2. 具主動箝位及波形的 PSFB 功率級。與被動式緩衝器不同，主動式緩衝器不會將振鈴能量耗散於功率電阻上，而是以無損緩衝方式在 LC 諧振槽中循環該能量。來源：德州儀器

在主動箝位 MOSFET (I_{CL}) 極性改變中的電流之前打開 Q_{CL} 是非常重要的，以便在有效工作週期 ($D_{eff}T_S$) 開始時完成 C_{CL} 上的電流 - 秒平衡。換句話說， Q_{CL} 只需導通足夠的時間，使主動式緩衝器的電流秒平衡機制如預期運作，將輸出整流器電壓箝位至 C_{CL} 壓 (V_{CL})。換句話說， Q_{CL} 不需要在整個 $D_{eff}T_S$ 中進行，而是在相對較短的時間內進行。因此， Q_{CL} 可以有固定的開啟時間，即 Q_{CL} 開啟時間 ($D_{ACL}T_S$) 為固定值，同時保持 $D_{eff}T_S$ 總是大於電流秒平衡 ($D_{CSB}T_S$) 完成所需的時間。

此方法可解決在使用主動式緩衝器時的一項挑戰：變壓器繞組電流不具單調上升特性，對於採用峰值電流模式控制而言，這將造成困擾。這是因為主動式緩衝器電容器能量也會參與輸出電感器通電，而不只是仰賴一次側的能量轉移。由於 $D_{eff}T_S$ 大於 $D_{CSB}T_S$ ，因此當變壓器電流單調上升時會發生峰值電流偵測。由於具有較大 D_{eff} 的 PSFB 通常效率較高，因此您可以將 PSFB 設計為在中至重負載時擁有較大的 D_{eff} ，並且 $D_{eff} \gg D_{CSB}$ 。輕負載時，轉換器應在不連續導通模式下運作，在相同的輸入/輸出電壓條件下， D_{eff} 將小於連續導通模式下的 D_{eff} 。為了即使在輕負載時也能保持 $D_{eff}T_S$ 大於 $D_{CSB}T_S$ ，可以使用降頻控制或突發模式控制。

由於 C_{CL} 漣波電壓會影響輸出整流器上的總電壓應力，因此必須選擇足夠大的 C_{CL} 以獲得低電容器漣波電壓。您也必須選擇合適的 C_{CL} 使 C_{CL} 與 L_r 所形成的電感 - 電容 (LC) 諧振週期遠大於開關週期 [3]，如公式 1 所示：

$$2\pi\sqrt{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times L_r \times C_{CL}} \gg T_S \quad (1)$$

整流器電壓應力會以主動式緩衝器箝位在 $V_{IN}N_s/N_p$ 周圍，約為無箝位電路下電壓應力的一半。與 [1] 中的被動式緩衝器不同，主動式緩衝器並非將振鈴能量耗散於功率電阻上，而是作為無損耗緩衝器，在 LC 諧振槽中循環能量。因此在相同規格下，具有主動緩衝器的 PSFB 效率會比具有被動緩衝器的 PSFB 效率更高。

若要瞭解決定 ACL 電流水準的因素，您需要先計算流經 ACL 本身的電流。圖 3 說明了 ACL 傳導週期周圍的波形。

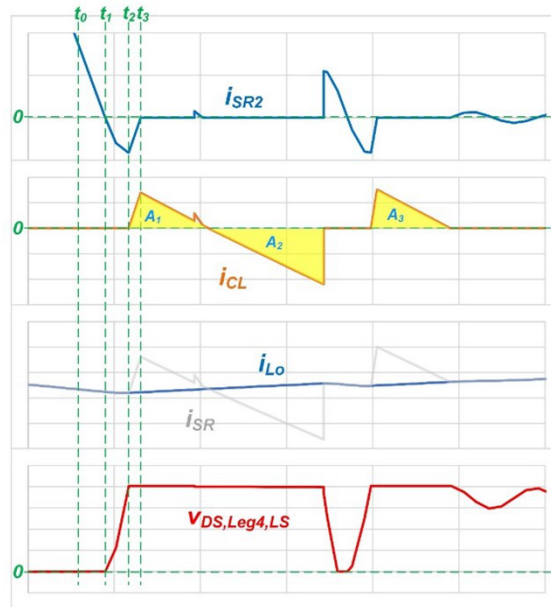


圖 3. 在 ACL 電流傳導期間形成波形。來源：德州儀器

假設 V_{CL} 為常數且 $L_m = \infty$ ，等式 2 會在汲極至源極電壓上升時產生輸出整流器一側的電流 (i_{SR2})：

$$i_{SR2} |_{t2} = \frac{V_{IN}}{N_s} \frac{N_s}{N_p} L_r (t_2 - t_1) \quad (2)$$

假設 i_{SR2} 電流以恆定速率下降，等式 3 可得到 $t_2 - t_1$ 的持續時間，如下所示：

$$(t_2 - t_1) = \sqrt{2C_{OSS} \frac{N_s V_{CL} L_r}{N_p V_{IN}}} \quad (3)$$

由於 C_{CL} 需維持電流秒平衡，因此區域 A1 和 A3 的總和將等於區域 A2。利用所有這些資訊，可以計算 I_{CL} 的均方根 (RMS) 值。如方程式 3 所示，同步整流器 (SR) 輸出電容 (C_{OSS}) 控制 ACL 上的尖峰電流。若選用具有較低 C_{OSS} SR FET，可降低 ACL 的 RMS 電流，進而提升轉換器效率。

圖 4 顯示了德州儀器 (TI) 的 54-V、3-kW 相移全橋 (PSFB) 主動箝位參考設計之波形。該設計為一款 400V 輸入、54V 輸出、3kW 的 PSFB 轉換器，並透過 TI 的 C2000™ 微控制器實現主動箝位功能。在此設計中，變壓器匝比為 $N_p : N_s = 16 : 3$ 。當 ACL FET 在輸出電感通電期間僅導通 300 ns 時，即使在 3 kW 負載下，輸出整流器的電壓應力 (圖 4 中的 Ch1) 仍可限制在 80 V。較低的電壓應力可使 SR FET 採用較低耐壓、且具有更佳品質因數的元件，有助於進一步提升 PSFB 的效率。

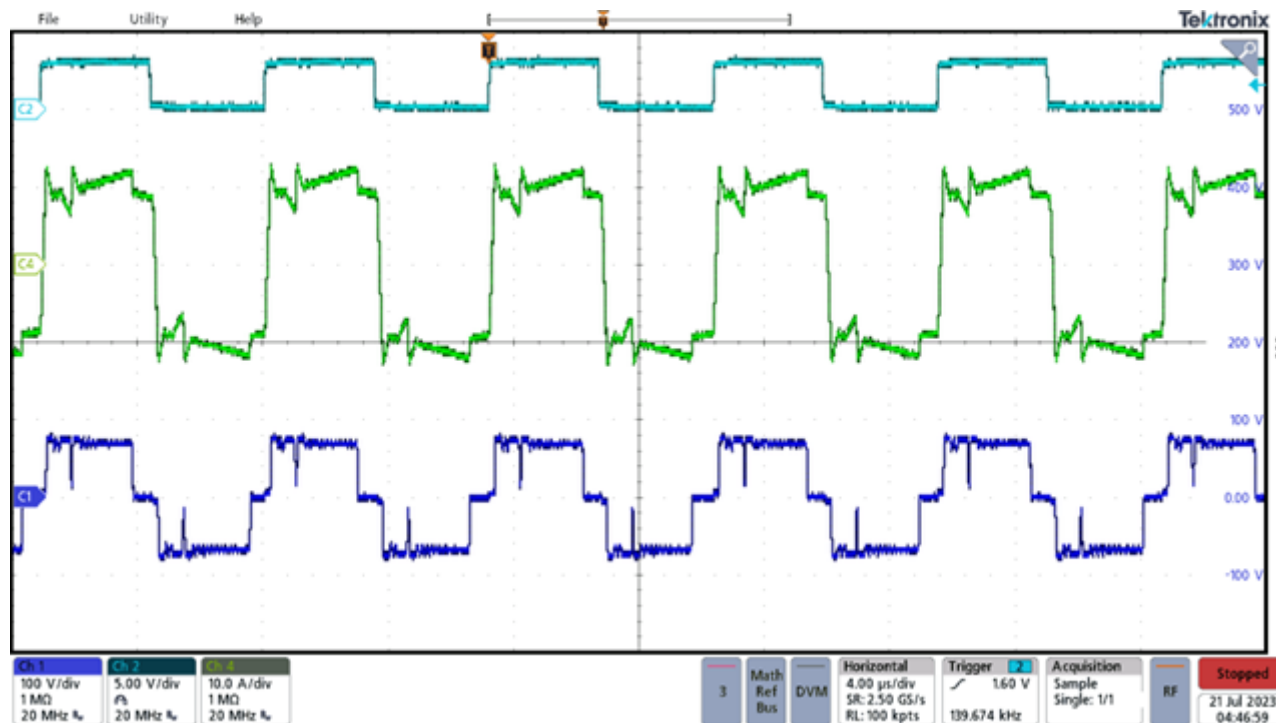


圖 4. 54V、3kW 主動箝位相移全橋參考設計的穩態波形。來源：德州儀器

此控制方法不限於具有單一 ACL 的全橋式整流器；您也可將其套用至具有其他類型整流器的主動式緩衝器，例如電流倍增器 (4) 或中心分接整流器。TI 的 3kW 主動箝位相移全橋 (PSFB) 參考設計，具備超過 270-W/in^3 的功率密度，為一款 400V 輸入、12V 輸出、3kW 的 PSFB 轉換器，並採用主動箝位架構，二次側使用中心分接整流器。在 3kW 負載下，輸出整流器應力 (圖 5 中的 Ch1) 限制為 40V。

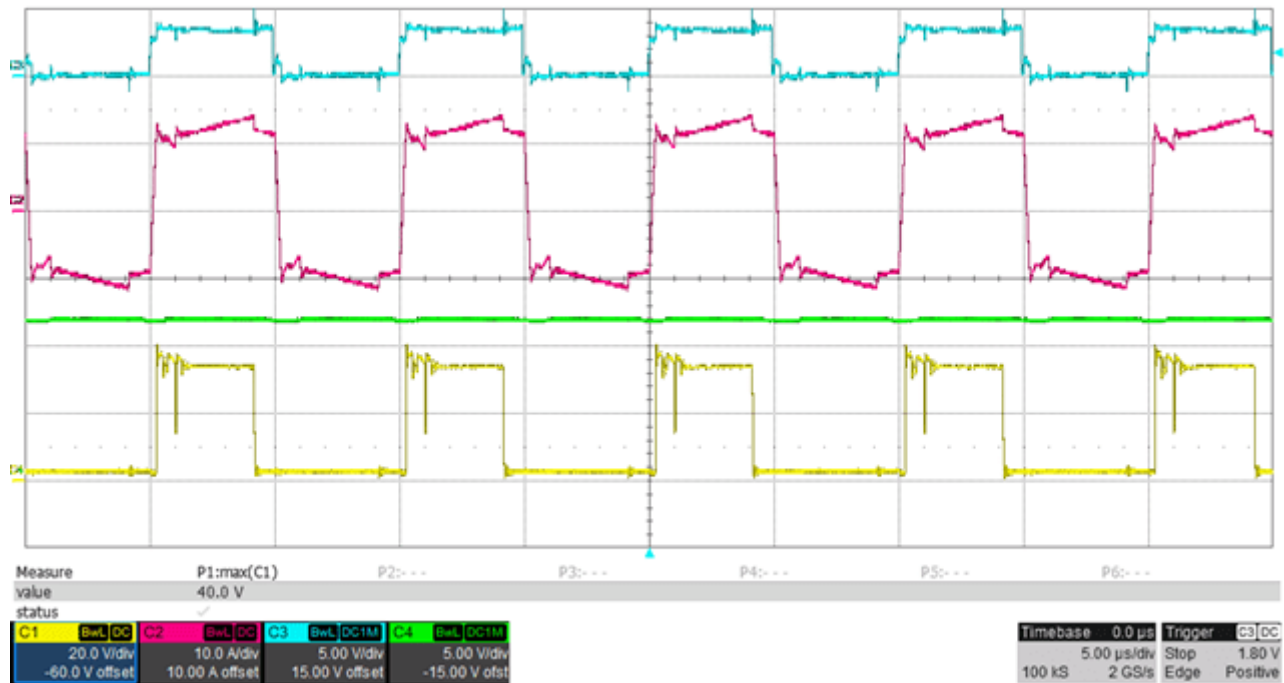


圖 5. 具主動箝位參考設計且具 $>270\text{W}/\text{in}^3$ 功率密度穩定狀態波形的 3kW 全橋相移式轉換器。來源：德州儀器

PSFB 轉換器中主動箝位的優點

PSFB 轉換器中的主動式緩衝器實作可大幅降低輸出整流器的最大電壓應力。電壓應力的減少可讓 SR FET 使用汲極至源極額定電壓較低，品質因素較佳。雖然主動箝位可能會對峰值電流模式控制的實作帶來挑戰，但若能夠適當實作，即可和諧地使用主動箝位和峰值電流模式控制。相較於傳統 PSFB 實作方式，此組合可實現更高的功率密度與效率。

相關內容

- [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](#)
- [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](#)

參考資料

1. Lin, Song-Yi 和 Chern-Lin Chen. 「應用在相移全橋 ZVS 轉換器輸出整流器中的 RCD 箝位緩衝器之分析語設計。」發表於《IEEE Transactions on Industrial Electronics》第 45 冊，編號 2 (1998 年 4 月)：第 358-359 頁。
2. Sabate, J.A., V. Vlatkovic, R.B.Ridley 與 F.C.Lee. 「採用主動式緩衝器的高電壓、高功率 ZVS 全橋 PWM 轉換器。」發表於《Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition (APEC) 》，1991 年 3 月 10 日至 15 日，第 158-163 頁。
3. Nene. 「汽車應用雙向 DC-DC 轉換器數位控制。」發表於《28th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 》，2013 年 3 月 17 日至 21 日，第 1360-1365 頁。
4. Balogh, Laszlo. 「設計審核：具電流倍增器同步整流的 100W、400kHz DC/DC 轉換器使效率達到 92%。」德州儀器電源供應設計研討會 SEM100，文獻編號 SLUP111，1996 年。

先前已發表於 EDN.com。

Trademarks

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