

Technical Article

為高切換頻率下的整流器設計主動箝位電路



Daniel Gao

簡介

在車輛電氣系統中，高電壓至低電壓 DC/DC 轉換器是可反轉的電子裝置，可將車輛的高電壓（400V 或 800V）電池的 DC 轉換為較低的 DC 電壓（12V）。這些轉換器可為單向或雙向。一般的功率位準為 1kW 至 3kW，其中系統需要額定值為 650V 至 1,200V 的元件供轉換器高壓電源網路（一次側）使用，且在 12V 電源網路（二次側）上的元件額定值為 60V。

由於需要更高的功率密度和更小的動力系統，電源元件的切換頻率提高到數百千赫，以幫助縮小磁性元件的尺寸。將高電壓至低電壓 DC/DC 轉換器小型化會暴露許多在低切換頻率下不那麼重要的問題，例如金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 的電磁相容性 (EMC)、散熱和主動箝位。在本用電訣竅中，我會探討同步整流器 MOSFET 在高切換頻率下的箝位電路設計。

傳統主動箝位

圖 1 所示的相移全橋 (PSFB) 是高電壓至低電壓 DC/DC 應用中常見的拓撲結構，因為它可實現開關的軟切換，以提升轉換器的效率。但是，您仍可看到同步整流器承受高電壓應力，因為其寄生電容會與變壓器的洩漏電感產生共振。整流器的電壓應力可高達方程式 1：

$$V_{ds_max} = 2V_{IN}x(N_s/N_p) \quad (1)$$

其中 N_p 和 N_s 分別是變壓器的一次和二次繞組。

考慮到高電壓至低電壓 DC/DC 轉換器的功率位準和電阻器電容器二極體減震器 [1] 之功率損耗，設計師常會將主動箝位電路用於同步整流器 MOSFET。圖 1 顯示典型電路。

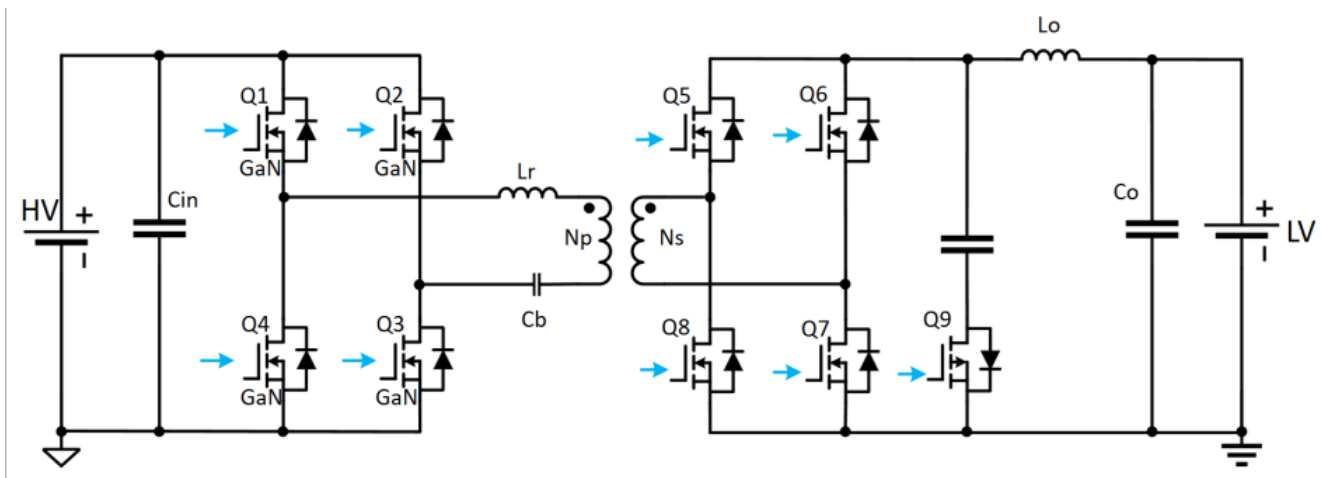


圖 1. PSFB 同步整流器 MOSFET 的傳統主動箝位電路。來源：德州儀器

在此電路圖中，您會看到 P 通道金屬氧化半導體 (PMOS) Q9 和減震器電容器，這兩個電容器為主動箝位電路的主要部分。減震器電容器的一個終端連接輸出扼流器，PMOS 源極接地。在 PSFB 的傳統主動箝位電路中，同步整流器 MOSFET Q5 和 Q7 具有相同的；Q6 和 Q8 也是如此。每次同步整流器 MOSFET 關機後，PMOS 都會在適當延遲時間內開啟。

圖 2 說明 PSFB 和主動箝位的控制方案。您很容易發現 PMOS 的切換頻率將為 f_{sw} 的兩倍。

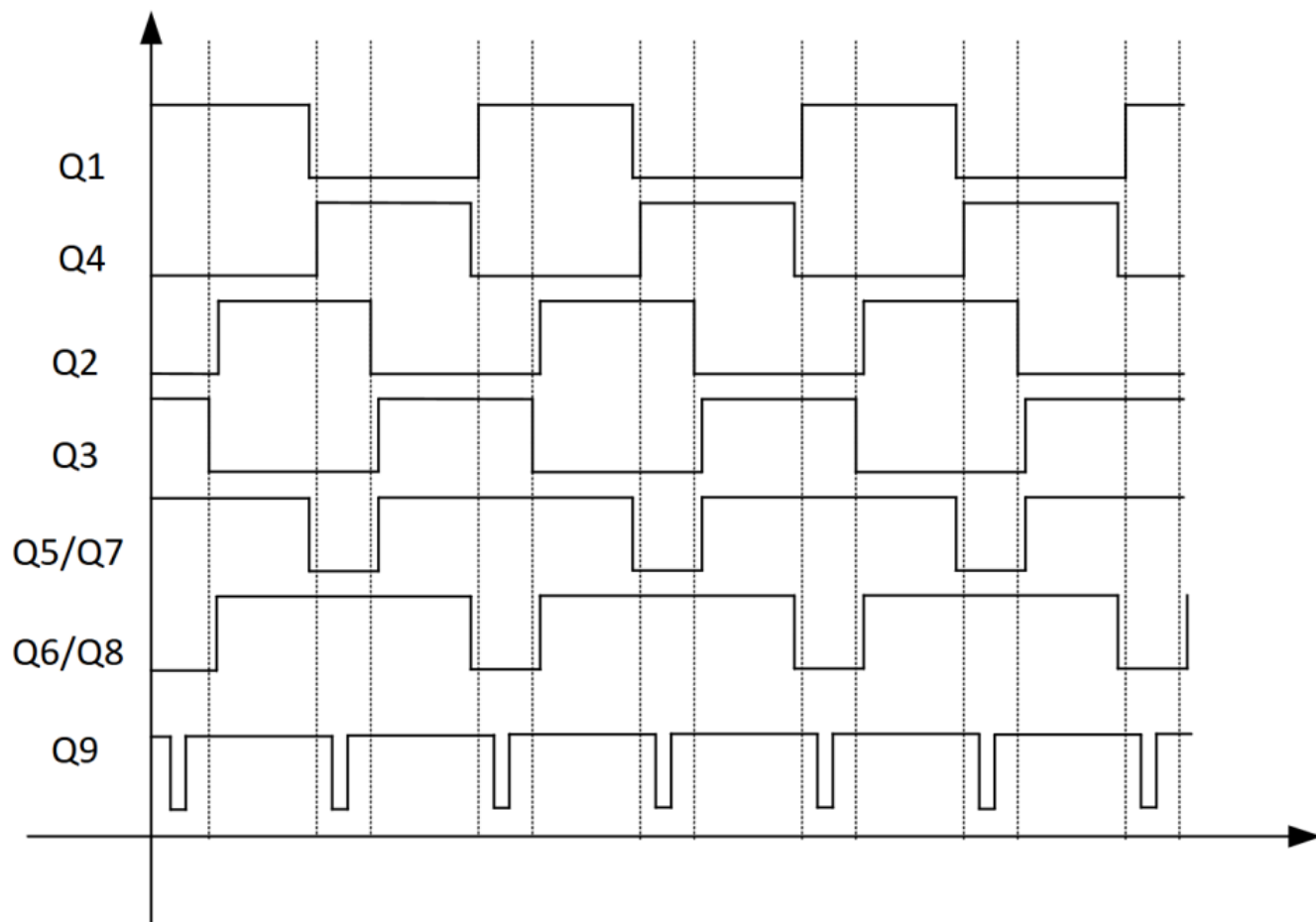


圖 2. 主動箝位 PMOS Q9 的控制方案，其中 PMOS 的切換頻率為 f_{sw} 的兩倍。來源：德州儀器

評估主動箝位損耗

您可使用方程式 2、方程式 3、方程式 4、方程式 5 和方程式 6 來評估主動箝位 PMOS 的損耗。除了 P_{on_state} 外，所有其他損耗都與 f_{sw} 成正比。當 PMOS 的切換頻率加倍時，損耗會加倍，因此您需要解決 PMOS 散熱問題。而當將 f_{sw} 推高以滿足小型化需求時，實際的散熱問題就更嚴重。

$$P_{on_state} = I_{rms}^2 \times R_{dson} \quad (2)$$

$$P_{turn_on} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{on} \times t_{on} \times f_{sw} \quad (3)$$

$$P_{turn_off} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{off} \times t_{off} \times f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{drive} = V_{drv} \times Q_g \times f_{sw} \quad (5)$$

$$P_{diode} = I_{snubber} \times V_{sd} \times t_d \times f_{sw} \quad (6)$$

建議的主動箝位

那我們應該怎麼辦？選擇品質因數較佳 (FOM) 的 PMOS，或是選擇傳導係數較高的導熱油脂？兩者都沒問題，但請記住主動箝位所造成的散熱問題仍集中在一個零件上，這會導致問題難以解決。我們能將散熱問題分成幾個部分嗎？可行的方式是使用兩個主動箝位電路，並將減震器電容器的終端連接至二次側的切換節點，如 [圖 3](#) 所示。您只能在 Q5 和 Q7 關閉後開啟 Q11，並在 Q6 和 Q8 關閉後開啟 Q10。[圖 4](#) 說明 PSFB 的控制方案和建議的主動箝位。

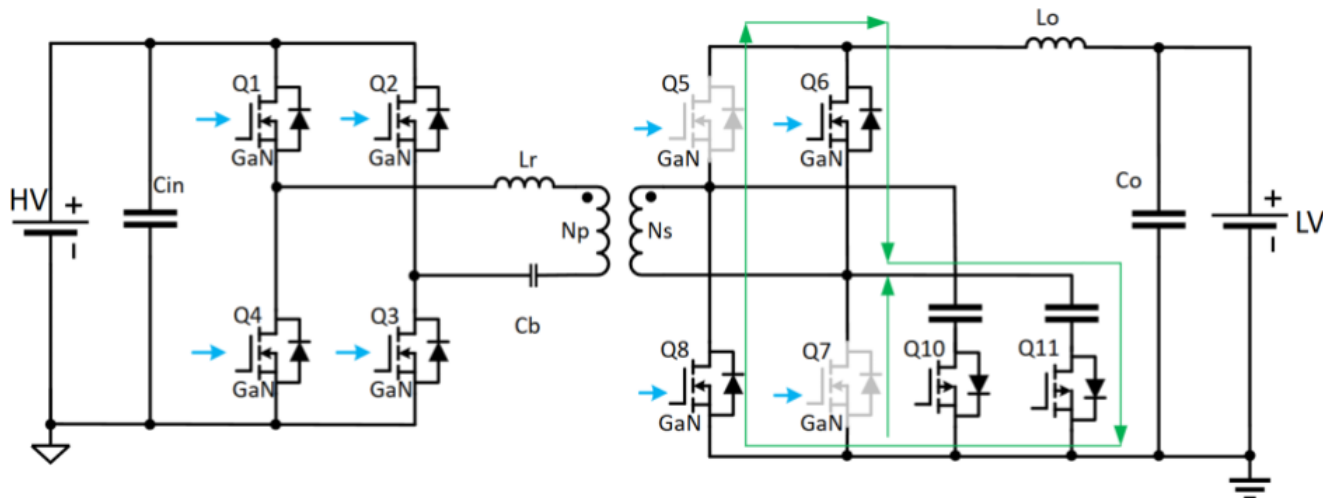


图 3. PSFB 同步整流器 MOSFET 的建議主動箝位電路。來源：德州儀器

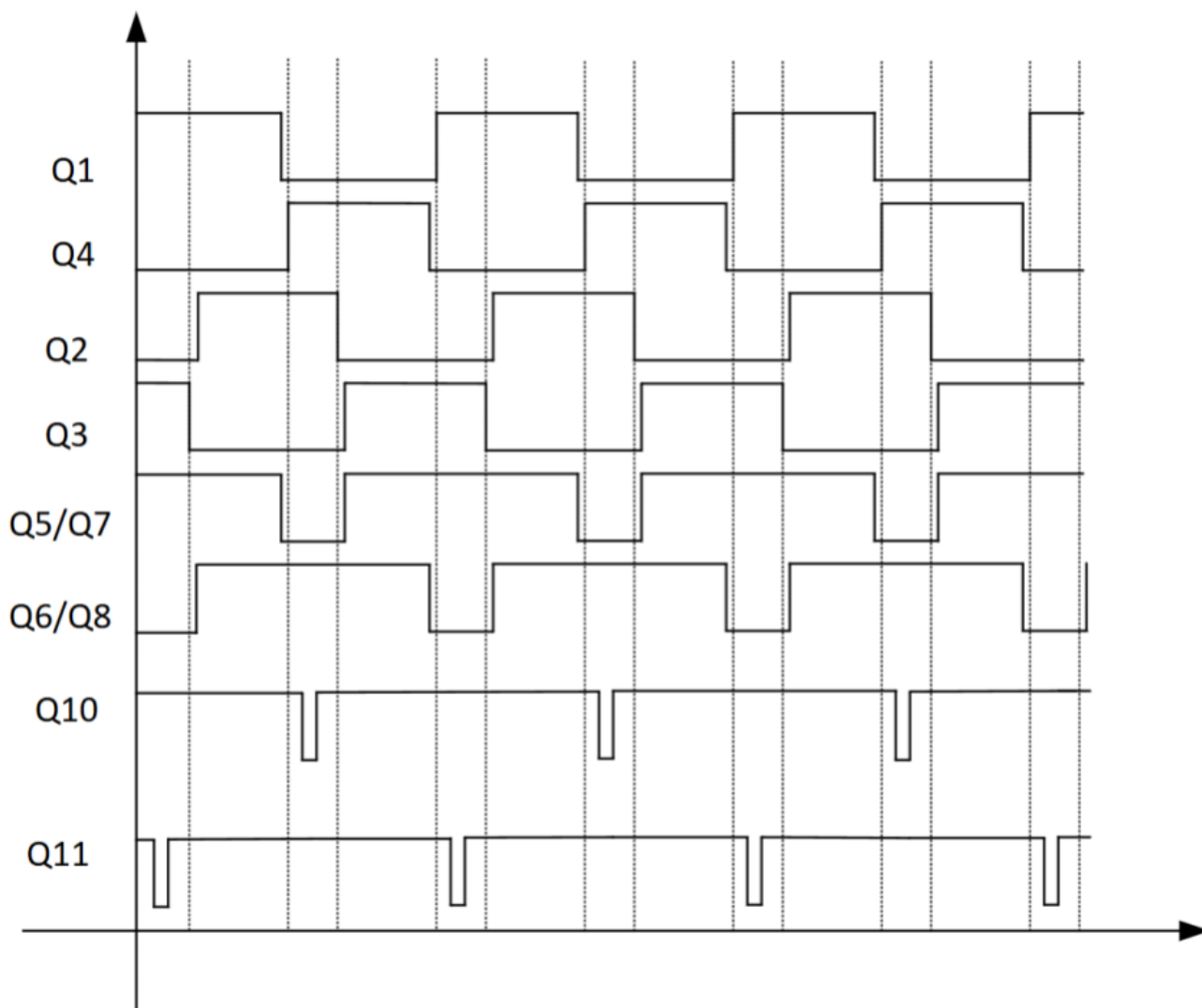


图 4. PSFB 控制方案和建議的主動箝位。來源：德州儀器

當 Q5 和 Q7 關閉時，Q6 和 Q8 仍會開啟。因此，您可以依據 图 3 中綠色箭頭所示的位置，找到 Q5 和 Q7 的箝位迴路。Q10 和 Q11 的切換頻率均為 f_{sw} ，而不是 f_{sw} 的兩倍。

因此，根據方程式 2、方程式 3、方程式 4、方程式 5 和方程式 6，各 PMOS 的 P_{on_state} 將是原始的四分之一， P_{turn_on} 、 P_{turn_off} 、 P_{drive} 、 P_{diode} 將是原始的一半。顯然，建議的方法會將箝位電路的損耗分為兩個部分甚至更少，因此較容易處理散熱問題。

我們回到箝位迴路。Q5 的迴路大於 Q7；這類似於 Q6 和 Q8。您需要注意同步整流器的配置，才能獲得 Q5 和 Q6 的最小箝位迴路。

建議的主動箝位性能

图 5 和 图 6 展示了德州儀器《採用 GaN HEMT 的高電壓至低電壓 DC/DC 轉換器參考設計》中的相關測試，其中使用建議的主動箝位電路，該電路以 200kHz 切換頻率運作。图 5 顯示整流器的電壓應力。

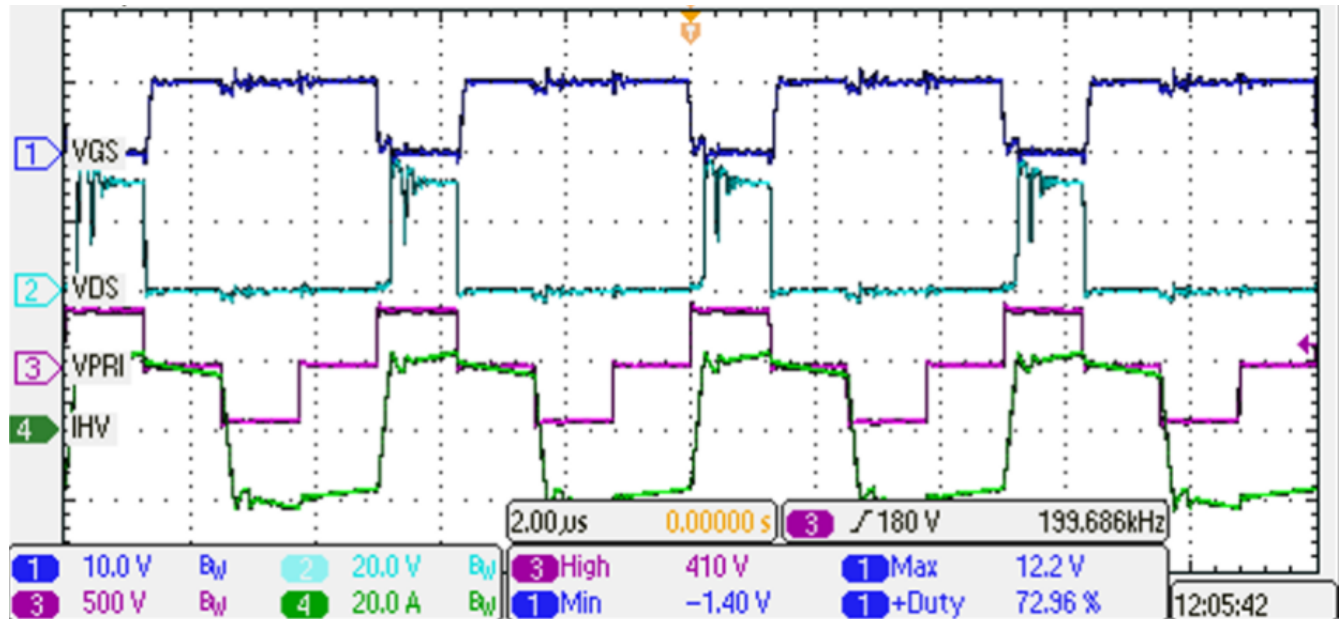


图 5. 整流器的電壓應力，其中 CH1 是整流器的 V_{gs} ，CH2 是整流器的 V_{ds} ，CH3 是一次側變壓器繞組的電壓，CH4 是一次側變壓器繞組的電流。來源：德州儀器

CH1 是整流器的 V_{gs} ，CH2 是整流器的 V_{ds} ，CH3 是一次側變壓器繞組的電壓，CH4 是一次側變壓器繞組的電流。整流器的最大電壓應力在 $400V_{IN}$ 、 $13.5V_{OUT}$ 、 $250A I_{OUT}$ 時低於 45V。在 $400V_{IN}$ 、 $13.5V_{OUT}$ 、 $180A I_{OUT}$ [2] 下，主動箝位電路的最高溫度為 $46.6^{\circ}C$ ，如 图 6 所示。因此，建議的控制方案可為箝位 MOSFET 實現相當好的散熱性能。

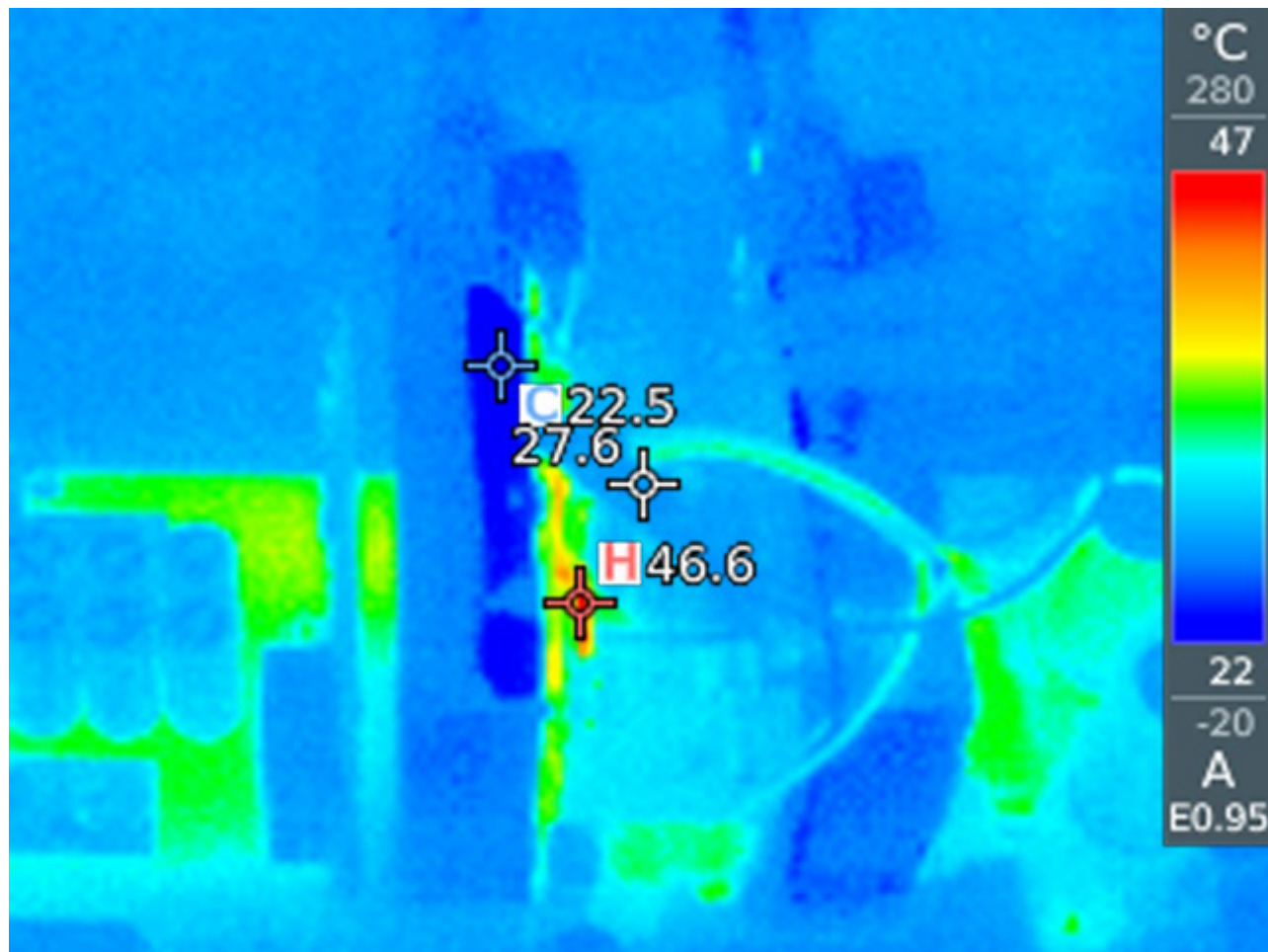


图 6. 主動鉗位電路的散熱性能，在 $400V_{IN}$ 、 $13.5V_{OUT}$ 、 $180A I_{OUT}$ 下，主動鉗位電路的最大溫度為 $46.6^{\circ}C$ 。來源：德州儀器

500-kHz 主動鉗位電路，無散熱問題

當將開關頻率從 200kHz 提升至 500kHz 時，變壓器的體積將縮小約 45% [2]，這將有助於提高高電壓至低電壓 DC/DC 轉換器的功率密度。採用建議的方法後，BOM 成本會稍微增加，但設計師可以在 500kHz 切換頻率下運作主動鉗位，而不產生散熱問題，進而提升性能。考慮到 PMOS 的脈衝汲極電流遠小於 NMOS，設計師也可視需要在主動鉗位中使用 NMOS 與隔離驅動器及偏壓電源供應器。

相關內容

- 用電訣竅 #135：ESS 中雙向 CLLLC 共振轉換器的控制方案
- 用電訣竅 #134：不要採用艱難的方式進行切換；以 PWM 全橋實現 ZVS
- 用電訣竅 #133：測量 TLVR 中的總洩漏電感，以將效能最佳化
- 精密鉗位保護資料記錄器
- 反相雙極電晶體可兼作訊號鉗位
- 高速鉗位的功能如同脈衝成形電路

參考資料

1. Betten, John. 2016. 「用電訣竅：用七個步驟計算 R-C 減震器」 TI E2E™ 設計支援論壇技術文章，2016 年 5 月。
2. 「具有 GaN HEMT 的高電壓至低電壓 DC-DC 轉換器參考設計。」 2024.德州儀器參考設計測試報告編號 PMP41078，文獻編號 TIDT403A。存取於 2024 年 12 月 16 日。

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