

Technical Article

設計 CCM 返馳式轉換器



John Betten

連續傳導模式 (CCM) 返馳式轉換器通常用於中功率的隔離應用中。CCM 操作的特性包括峰值切換電流較低、輸入與輸出電容低較少、EMI 較低、操作工作週期範圍比非連續傳導模式 (DCM) 操作窄等。這些優點及偏低的成本，意味著在商業和工業應用中已廣泛採用這類裝置。本文將提供功率級設計方程式，適用於在 5A 時為 53Vdc 至 12V 的 CCM 返馳；先前已在 [用電訣竅：返馳式轉換器設計考量](#) 中探討過此 CCM 返馳。

圖 1 顯示在 250 kHz 下運作時的詳細 60W 返馳電路圖。在最小輸入電壓為 51V 且具有最大負載時，選擇工作週期為最大 50%。雖然可以接受高於 50% 的運作，但在此設計中並非必要。由於 57V 的高線路輸入電壓相對較低，因此在 CCM 操作時的工作週期只會減少幾個百分點。然而，如果負載大幅減少，且轉換器進入 DCM 操作，工作週期也會大幅降低。

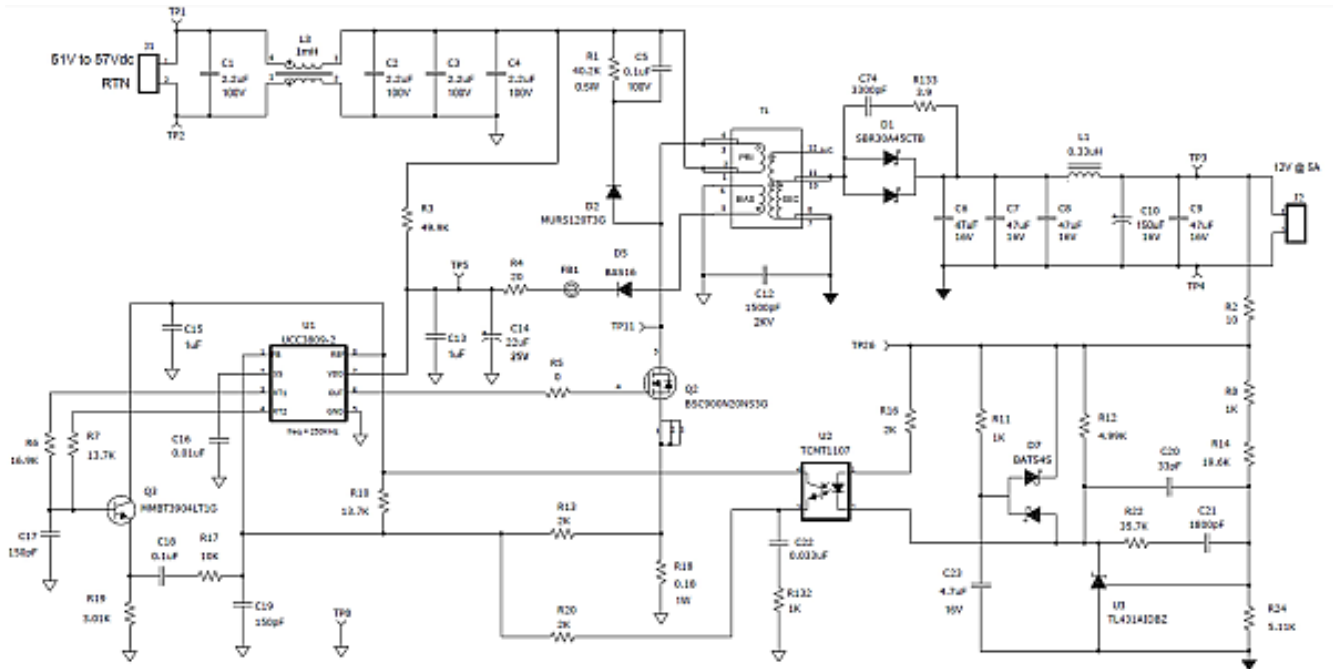


圖 1. 60W CCM 返馳式轉換器電路圖。

設計細節

為了防止芯飽和，繞組開/關時間的伏特-秒乘積必須達到平衡。這等於 [方程式 1](#)：

$$V_{inmin} \times d_{max} = (V_{out} + V_d) \times (1 - d_{max}) \times N_{ps}, \text{ where } N_{ps} = \frac{N_{pri}}{N_{sec}} \quad (1)$$

將 d_{max} 設定為 0.5，並計算 N_{ps12} (NPRI : N12V) 和 N_{ps14} (NPRI : N14V) 的匝比，如 [方程式 2](#) 和 [方程式 3](#) 所示：

$$N_{ps12} = \frac{V_{inmin}}{(V_{out} + V_d)} \times \frac{d_{max}}{(1 - d_{max})} = \frac{51V}{(12V + 0.5V)} \times \frac{0.5}{(1 - 0.5)} \sim 4 \text{ (4:1 step - down)} \quad (2)$$

$$N_{ps14} = \frac{V_{inmin}}{(V_{out} + V_d)} \times \frac{d_{max}}{(1 - d_{max})} = \frac{51V}{(14V + 0.5V)} \times \frac{0.5}{(1 - 0.5)} \sim 3.5 \text{ (3:5:1 step - down)} \quad (3)$$

由於現在已設定變壓器匝比，所以可計算操作工作週期和 FET 電壓 (方程式 4 和方程式 5)。

$$d = \frac{Nps12 \times (Vout + Vd)}{Vin + Nps12 (Vout + Vd)} \times \frac{4 \times (12V + 0.5V)}{57V + 4 \times (12V + 0.5V)} \sim 0.47 \quad (dmin \text{ at } Vin = 57V) \quad (4)$$

$$Vdsmax = Vinmax + Nps12 \times (Vout + Vd) = 57V + 4 \times (12V + 0.5V) = 107V \quad (5)$$

Vdsmax 代表 FET Q2 汲極上無振鈴的「平頂」電壓。振鈴通常與變壓器洩漏電感、寄生電容 (T1、Q1、D1) 及切換速度有關。選擇 200V FET，將 FET 電壓額外降額 25-50%。變壓器必須在繞組間具有極佳的耦合，且在可能情況下，最大洩漏電感必須小於或等於 1%，以將振鈴降至最低。

當 Q2 開啟時，二極體 D1 的反向電壓應力等於方程式 6：

$$VD1piv = Vout + \frac{Vinmax}{Nps12} = 12V + \left(\frac{57V}{4}\right) \sim 26V \quad (6)$$

當二次繞組因洩漏電感、二極體電容和反向復原特性而呈負擺幅時，振鈴是很常見的情況。請參閱方程式 7。

$$ID1 = \frac{Ioutmax}{(1 - dmax)} = \frac{5A}{(1 - 0.5)} = 10A \quad (7)$$

我選擇額定 30A/45V 的 D²PAK 封裝，以將 10A 時的順向電壓降減少至 0.33V。功耗等於方程式 8：

$$PD1 = Ioutmax \times Vd = 5A \times 0.33V \sim 1.7W \quad (8)$$

建議使用散熱器或氣流來實現適當的熱管理。您可以透過方程式 9 計算一次電感：

$$Lmin = \frac{Vinmin^2 \times dmax^2 \times n}{2 \times fsw \times Poutmin} = \frac{51V^2 \times 0.5^2 \times 0.91}{2 \times 250KHz \times 15W} \sim 80\mu H \quad (9)$$

P_{OUTMIN} 是轉換器進入 DCM 之處，其一般是 P_{OUTMAX} 的 20-30%。

峰值一次電流發生在 V_{INMIN} 時，且等於：

$$Ipri_{pk} = \frac{Ioutmax}{(1 - dmax) \times Nps12} + \frac{Vinmin \times dmax}{2 \times Lpri \times fsw} = \frac{5A}{(1 - 0.5) \times 4} + \frac{51V \times 0.5}{2 \times 80\mu H \times 250KHz} \sim 3.14A \quad (10)$$

這是確定最大電流感測電阻器 (R18) 值的必要項目，以防止控制器的一次過電流 (OC) 保護跳脫。就 UCC3809 而言，R18 上的電壓不能超過 0.9V，如此才可確保完整的輸出功率。在此範例中，我選擇 0.18 歐姆值。可接受較小的電阻，因為其可減少功率損耗。但電阻過小會增加雜訊靈敏度，並使 OC 閾值偏高，進而產生變壓器飽和風險，甚至更糟的是在 OC 故障期間發生與應力相關的電路故障。電流感應電阻器中的功耗為方程式 11：

$$PRs = \left[\frac{Ioutmax \times \sqrt{dmax}}{(1 - dmax) \times Nps12} \right]^2 \times Rs = \left[\frac{5A \times \sqrt{0.5}}{(1 - 0.5) \times 4} \right]^2 \times 0.18\Omega \sim 0.56W \quad (11)$$

根據方程式 12 和方程式 13 可估算計算出的 FET 傳導和關閉開關損耗：

$$Pcond = \left[\frac{Ioutmax \times \sqrt{d}}{(1 - d) \times Nps12} \right]^2 \times Rs = \left[\frac{5A \times \sqrt{0.47}}{(1 - 0.47) \times 4} \right]^2 \times 0.12\Omega \sim 0.3W \quad (Vin = 57V) \quad (12)$$

$$Psw = \frac{1}{4} \times tsw \times fsw \times Vds \times Ipri_{pk} = \frac{1}{4} \times 25nS \times 250KHz \times 160V \times 3.03A \sim 0.76W \quad (13)$$

與 Coss 相關的損耗計算會有些模糊，因為此電容的非線性程度較高，會隨著提高的 Vds 下降，而在此設計中，估算其為 0.2W。

電容器需求通常包含計算最大 RMS 電流、取得所需漣波電壓的所需最小電容，以及瞬態保持。輸出電容和 I_{OUTRMS} 的計算方式為方程式 14 和方程式 15：

$$Coutmin = \frac{Ioutmax \times dmax}{fsw \times Vripout} = \frac{5A \times 0.5}{250KHz \times 0.12V} = 83\mu F \quad (14)$$

$$I_{out\,rms} = I_{out\,max} \times \sqrt{\frac{d_{max}}{1 - d_{max}}} = 5A \times \sqrt{\frac{0.5}{1 - 0.5}} = 5A \quad (15)$$

僅適用陶瓷電容器，但需要七個電容器才能在 DC 偏壓效應後達到 83 μ F。因此，我只選擇足以處理 RMS 電流者，且隨後搭配電感器電容器濾波器以減少輸出漣波電壓，並改善負載瞬態。若存在偏大的負載瞬態，可能需要額外輸出電容才能減少電壓壓降。

輸入電容等於方程式 16：

$$C_{in\,min} = \frac{I_{pri\,pk} \times d_{max}}{2 \times f_{sw} \times V_{in\,rip}} = \frac{3.14A \times 0.5}{2 \times 250KHz \times 1.5V} = 2\mu F \quad (16)$$

同樣地，您必須考量會剝奪電容的 DC 偏壓效應。如方程式 17 所示，RMS 電流約為：

$$I_{in\,rms} = \frac{I_{out\,max}}{N_{ps}} \times \sqrt{\frac{d_{max}}{1 - d_{max}}} = \frac{5A}{4} \times \sqrt{\frac{0.5}{1 - 0.5}} = 1.25A \quad (17)$$

图 2 顯示原型轉換器的效率，而图 3 則顯示返馳評估板。

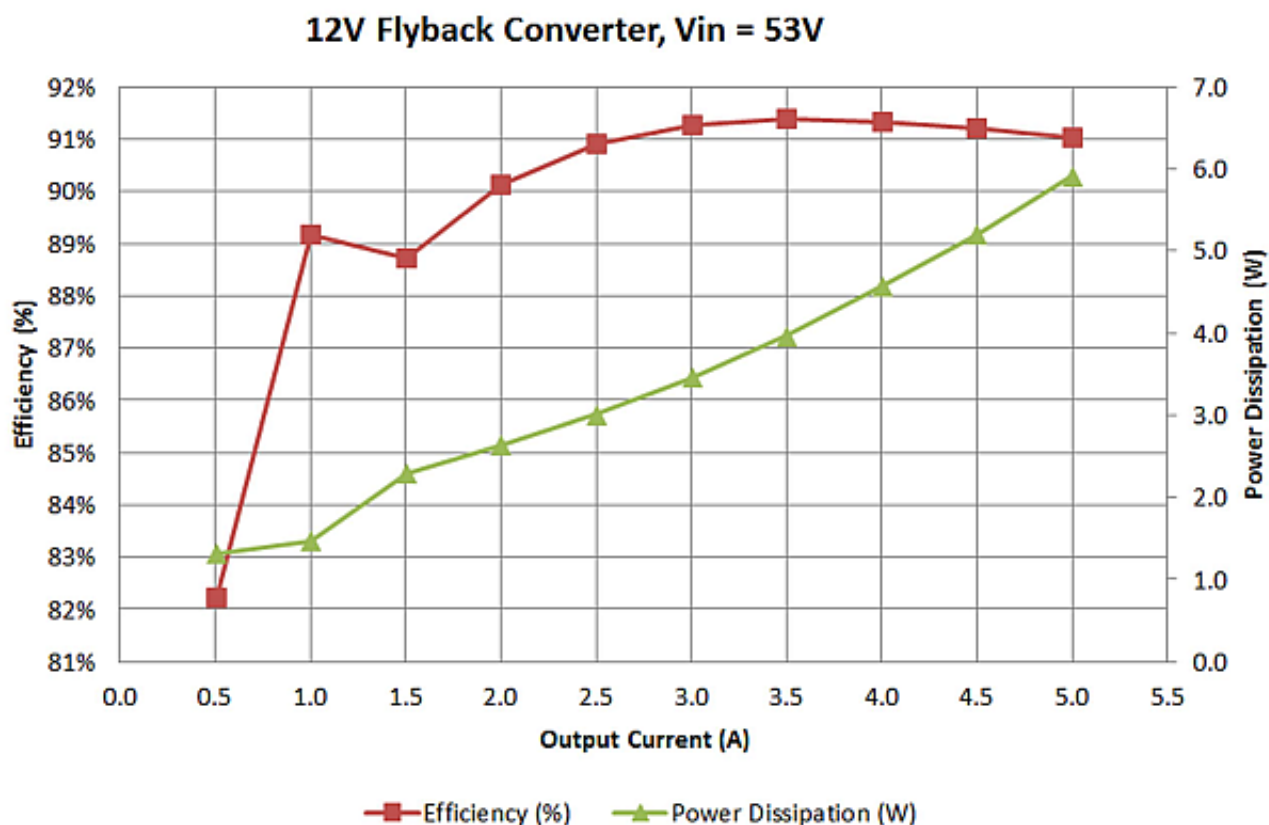


图 2. 轉換器效率和損耗決定封裝選擇與熱需求。

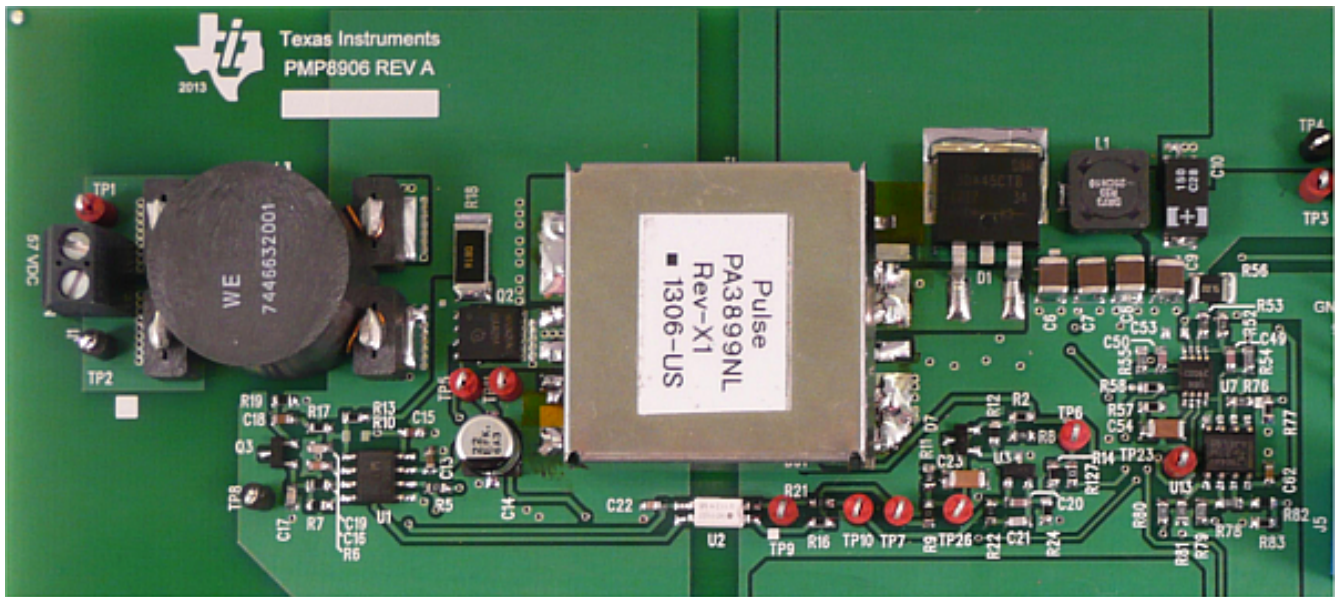


图 3. 60W 返馳評估硬體尺寸為 100mm x 35mm。

如需探索選擇正確補償元件值的協助資訊，請至此處：[補償隔離式電源供應器](#)。

此設計範例涵蓋功能 CCM 返馳設計的基本元件計算。不過，初始估算通常導致需要重複計算以進行微調。此外，在變壓器設計和控制迴路穩定等領域中，通常需要進行更多精細作業，才能獲得運作良好且最佳化的返馳。

歡迎查看 TI 在 Power House 的[用電訣竅部落格系列](#)。

另請參閱：

- [用電訣竅 #76：返馳式轉換器設計考量](#)
- [準諧振返馳式轉換器可輕鬆為儲能電容器充電](#)
- [如何將返馳式轉換器設計成雙級 LED 驅動器的前端](#)
- [HV 返馳式轉換器可提升效率](#)

先前發佈在 [EDN.com](#) 上。

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 © 2024, 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated