

Technical Article

用電訣竅：計算負載暫態所需的電容



John Betten

選擇降壓轉換器中的輸出電容通常會以所需的輸出漣波電壓位準為基礎。在許多情況下，計算出的電容值可能相當小，因此僅需使用單個陶瓷電容器。此外，由於陶瓷電容器具有極低的等效串聯電阻 (ESR)，其對輸出漣波的影響微乎其微。這是非常理想的狀況，因為其能降低成本，所以電容值越小越好。

但如果在設計展開後，您在測試過程中發現負載暫態使輸出電壓下降至無法接受的低位準，該怎麼辦？在這種情況下，唯一的解決方案是在輸出端增加更多電容，這將迫使您重新進行印刷電路板 (PCB) 佈局。

我有一個簡單的計算方法，可以防止這種災難發生。

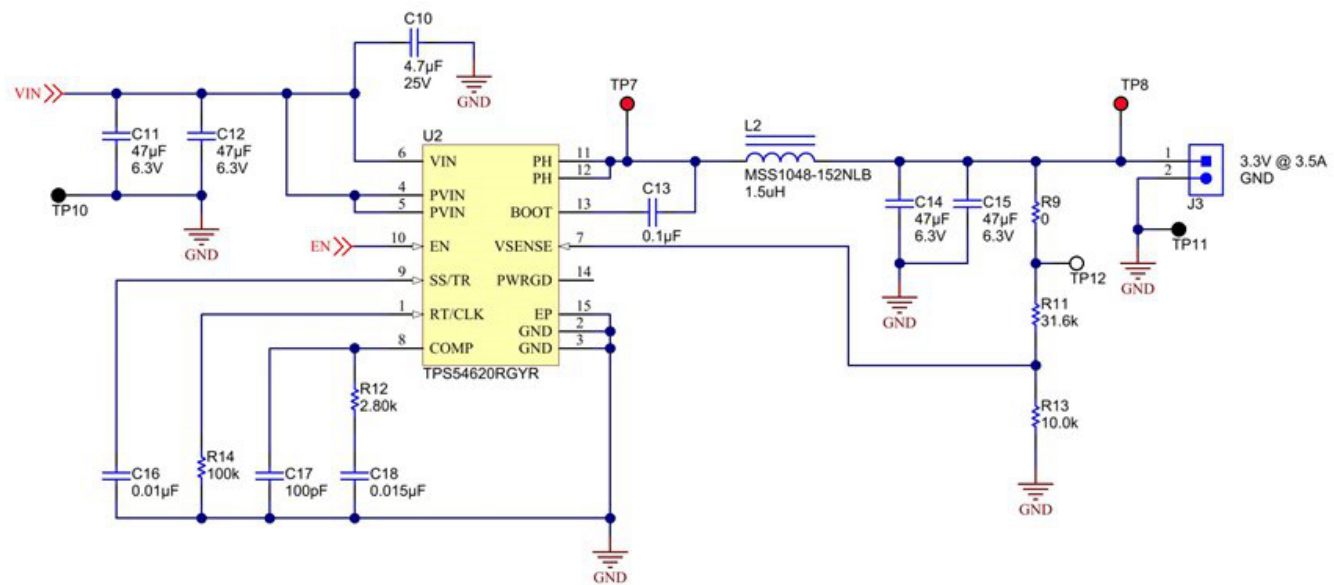


图 1. 採用陶瓷輸出電容器的 TPS54620 同步降壓轉換器

图 1 詳細說明了大幅增加輸出電容後的更新設計。為了深入了解負載暫態性能的實際狀況，我建立了如 图 2 所示的模擬模型。我使用此模型繪製了開環與閉合迴路輸出阻抗以及迴路增益（即轉換器的頻寬）。開環輸出阻抗即是在停用回饋的情況下，從轉換器輸出端看進去的阻抗。由於此設計採用電流模式控制，電感器充當恆定電流來源，因此不會出現在阻抗圖中。然而，如果此設計採用電壓模式控制，開環輸出阻抗圖在 L-C 諧振頻率處將會出現峰值。

電感器的影響不容忽視。較小的電感值允許轉換器在暫態期間更快地增加輸出電流，且電感尺寸不應過大，以免其反應速度慢於頻寬。图 2 中的開環輸出阻抗圖建模為單個 58µF 輸出電容，並串聯一個小的 ESR 和引線電感。兩個 47µF 6.3V 電容器在 3.3VDC 偏壓下的有效輸出電容為 58µF。此圖表呈現電容特性，斜率為 -1，直到頻率超過 500KHz 後轉為電感特性。

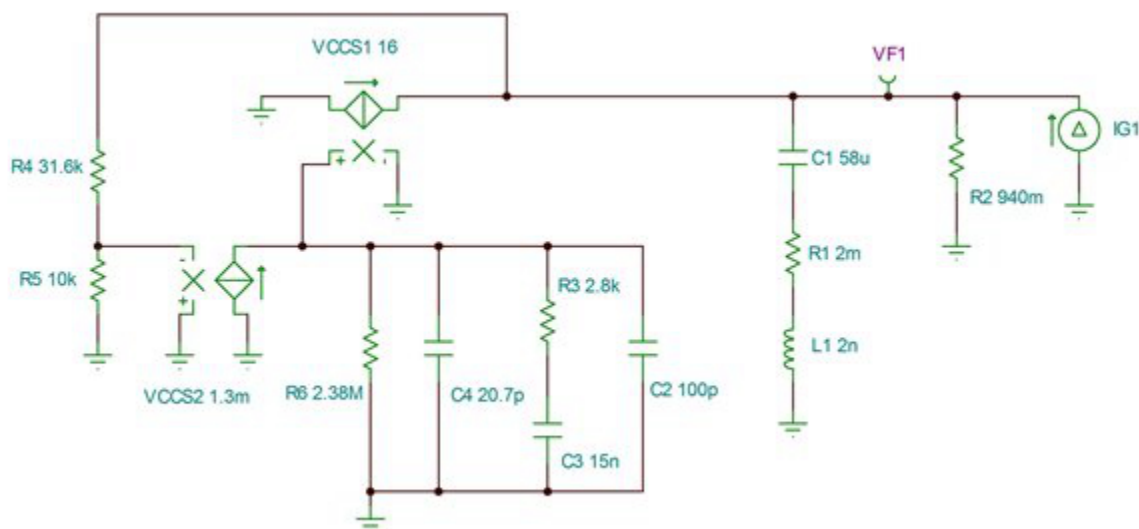


图 2. 顯示閉合迴路輸出阻抗的 TPS54260 模擬模型

閉合迴路輸出阻抗等於開環阻抗除以 $(1 + \text{迴路增益})$ 。轉換器的頻寬是指迴路增益等於 1 的頻率點。在此頻率之上，由於開環與閉合迴路曲線趨於一致，回饋對輸出阻抗幾乎沒有改善作用。在轉換器頻寬之下，回饋迴路的高增益會降低有效輸出阻抗。閉合迴路阻抗的峰值與迴路頻寬密切相關。這點相當重要，因為負載暫態引起的輸出電壓變化等於此阻抗乘以負載步進。由於在轉換器頻寬處，此阻抗的大小與輸出電容的阻抗幾乎相同，因此您可以利用其來估算負載步進響應。

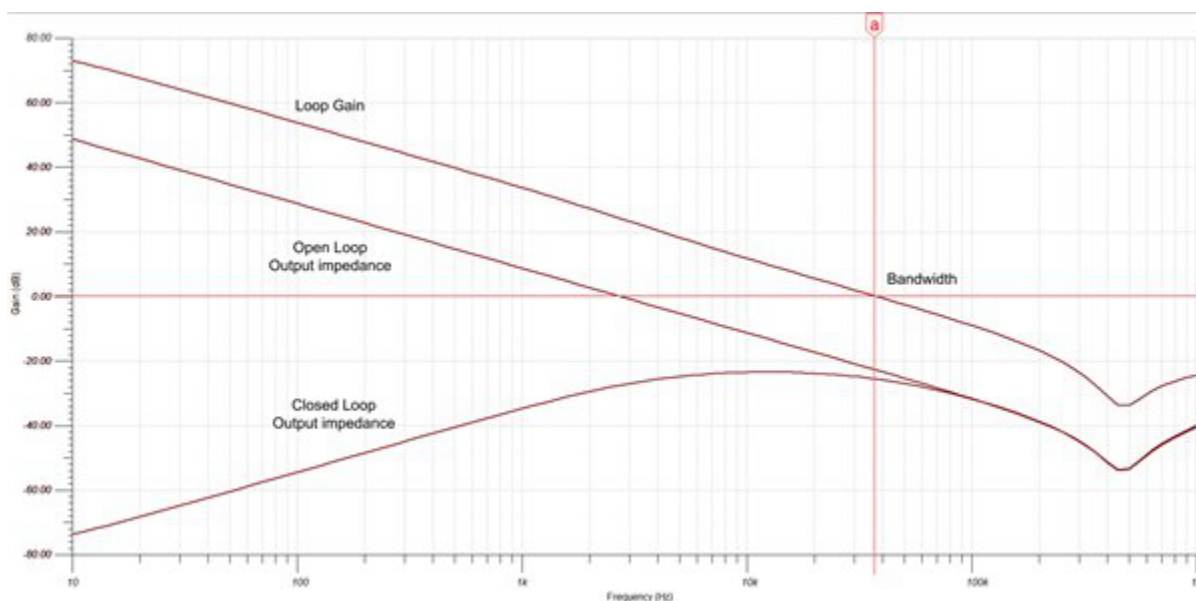


图 3. 模擬顯示閉合迴路輸出阻抗達到接近迴路頻寬頻率的最大值

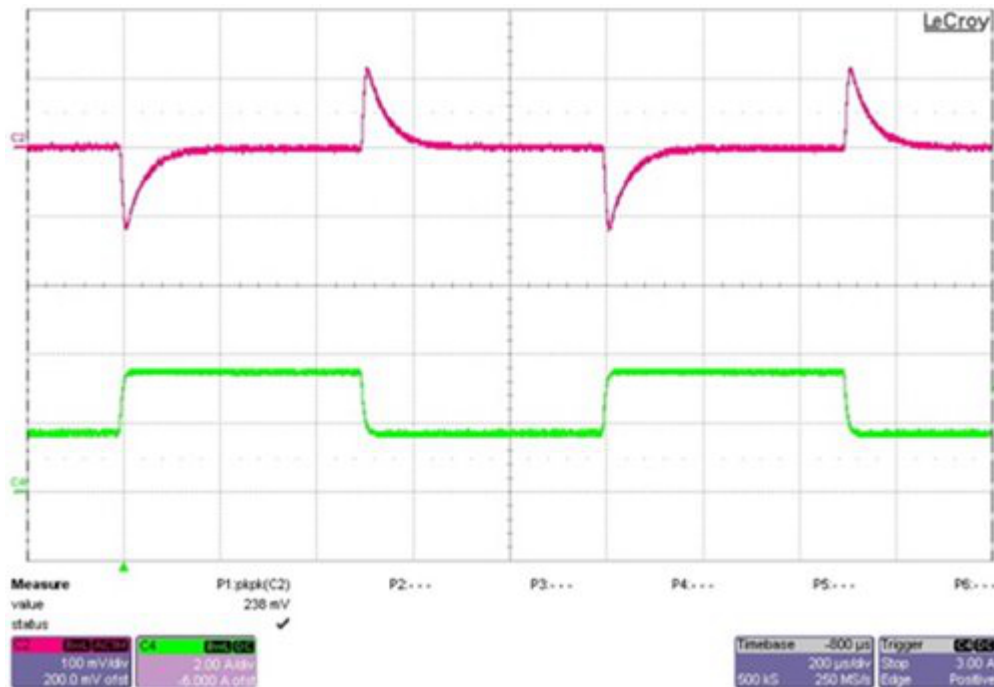


图 4. 1.75A 负载暂态的电路测试导致 115mV 的输出电压变化

电容器的阻抗为 $Z = 1 / (2\pi \times f \times C)$ ，若将其设为等于 $\Delta V_{out} / \Delta I_{tran}$ ，即可得到如方程式 图 5 所示的负载步进估算值：

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta I_{tran}}{2\pi f_{BW} C_{out}}$$

图 5. (1)

图 4 显示了 1.75A 负载步进的实验室测试，以及相应的 115mV 输出电压压降。方程式 图 5，使用测量的 38KHz 频宽，估算值为 126 mV。

方程式 图 5 可提供负载电流暂态所需的陶瓷输出电容的合理估算。在许多情况下，此电容计算值可能远大于维持低稳态涟波电压所需的数值。您只需要对转换器的频宽有准确的估计即可。请记住，具有高 ESR 的电容器（或使用混合电容器类型）可能会增加预期电压，因此可能需要额外留意（或进行模拟）。

其他资源

- 持续关注最新的「用电诀窍」影片系列
- 查阅「用电诀窍精选」电子书

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。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 或任何第三方的智慧財產權授權許可。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](#)、[TI 的通用品質指南](#) 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 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025