

Technical Article

使用 LLC 共振轉換器實現廣泛操作範圍的秘訣和技巧



Benjamin Lough

電感器 - 電感器 - 電容器 (LLC) 共振轉換器具備對於隔離式 DC/DC 轉換器應用非常有吸引力的特性，例如：切換損耗極小，低於諧振頻率運作時無反向復原，以及耐受變壓器內大型洩漏電感的能力。

挑戰

設計具有廣泛操作範圍的 LLC 轉換器時，面臨的主要挑戰是增益曲線相對於等效負載電阻的行為。這是因為隨著品質係數 (Q_e) 增加，可實現的最大增益會下降，可實現的最小增益；反之，當 Q_e 減少時，最小增益會提高。此過程如圖 1 所示。

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r C_r}}{R_e} \quad (1)$$

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (2)$$

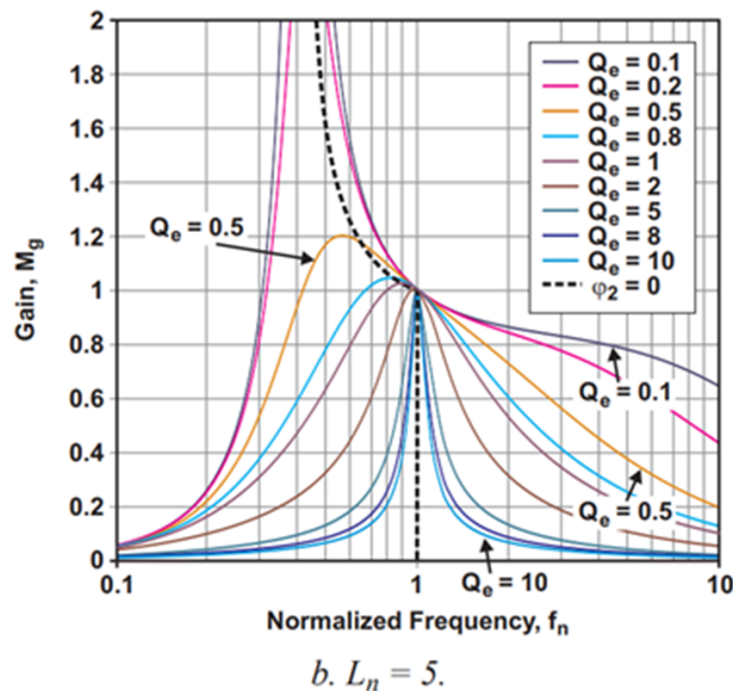


圖 1. LLC 增益曲線顯示，隨著 Q_e 增加，最大可實現增益會減少。來源：德州儀器

這種行為使得在功率級中維持合理均方根 (RMS) 電流和合理切換頻率範圍變得很困難。為了縮小所需頻率範圍，需要降低電感比 (L_n)；然而，較低的電感比會增加功率級中的磁化電流。本文將討論設計 LLC 轉換器並使其具備廣泛操作範圍的五個訣竅。

採用可重新設定的整流器

擴展 LLC 轉換器操作範圍的一種潛在方法是採用可重新設定的整流器，如圖 2 所示。

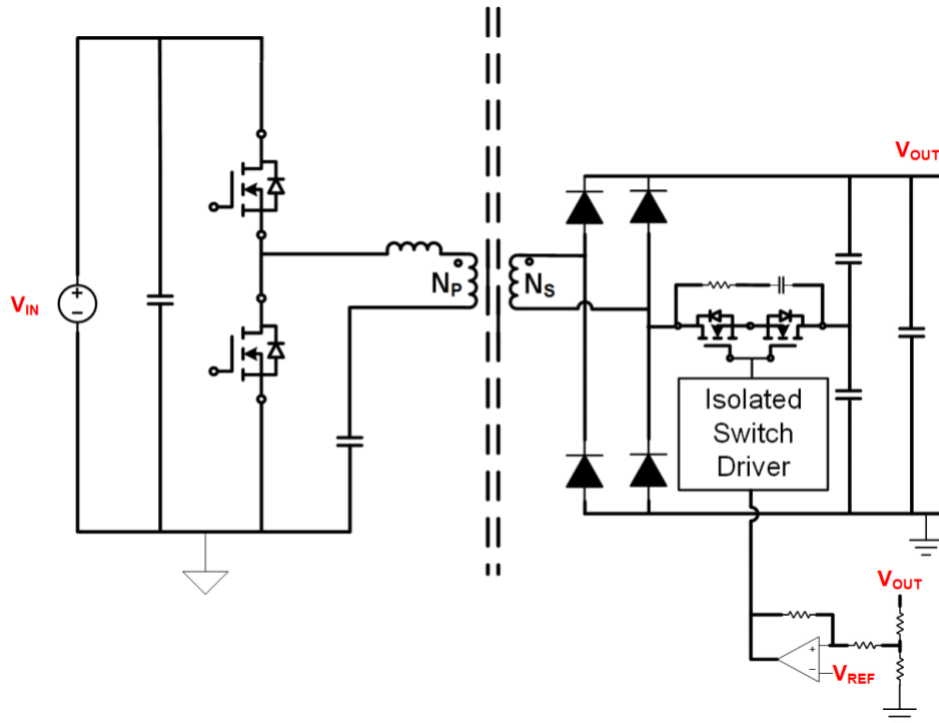


图 2. 顯示具有可重新設定整流器的 LLC 轉換器，該整流器可重新設定為全橋或電壓倍增器。來源：德州儀器

在此架構中，可透過比較器觀察輸出電壓，進而決定運作模式，將整流器配置為全橋或電壓倍增器整流器。以全橋整流器運作時，等式 3 會計算輸入至輸出的傳輸函數。

$$V_{out} = M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (3)$$

以電壓倍增器整流器運作時，輸入至輸出的傳輸函數為：

$$V_{out} = 2 \times M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (4)$$

图 3 顯示使用上述方法的 LLC 架構，在固定輸入電壓為 450V 的條件下，達成 140V 至 420V 輸出電壓範圍時的切換頻率與輸出電壓關係。此資料在輸出端接上 800mA 負載時測量而得。請注意，於 200V 處有一跳變，為比較器從全橋切換為倍壓所致。

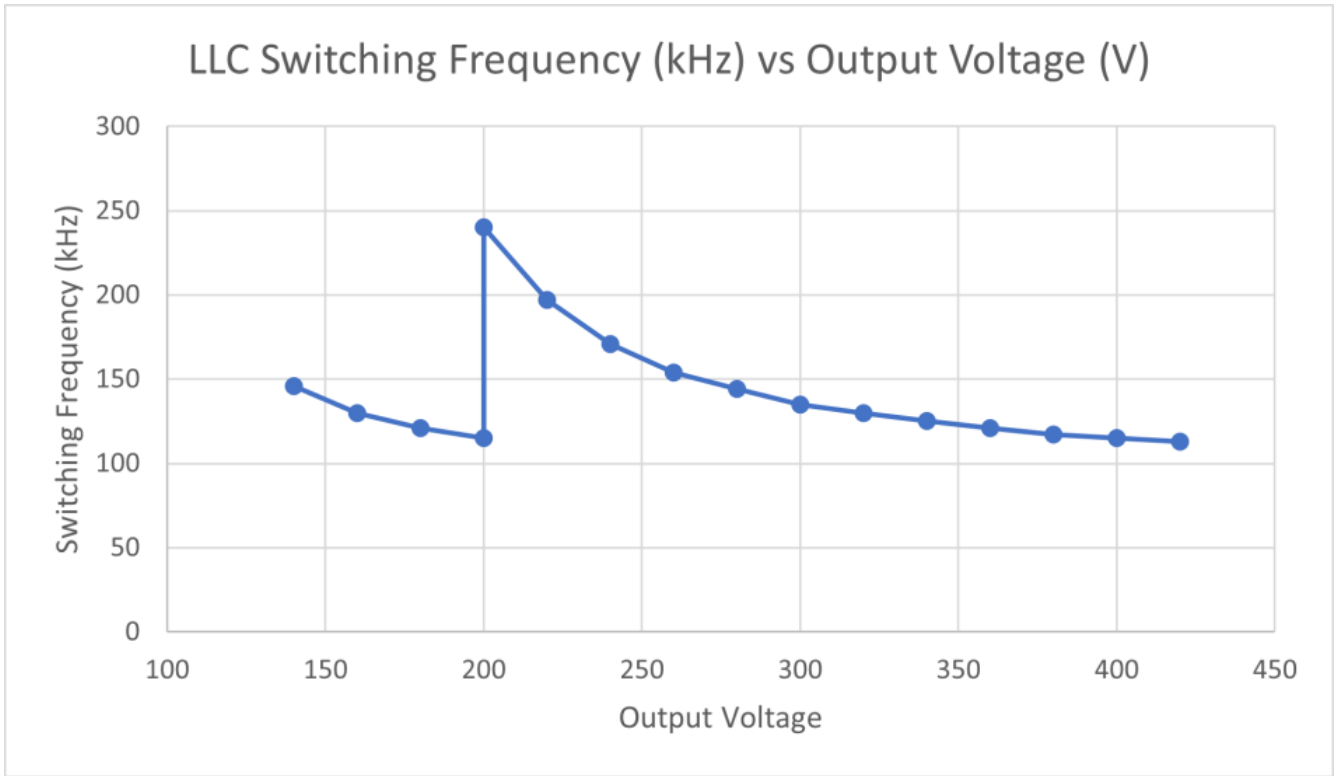


图 3. LED 驅動器參考設計的切換頻率與輸出電壓比較。來源：德州儀器

最小化繞組與整流器電容

如果操作點降至最小增益曲線以下，LLC 控制器將被迫在突衝模式下運作，以維持輸出電壓穩定。然而，突衝模式會導致低頻輸出漣波電壓上升。對於在輕負載和最小輸出電壓下需要極低輸出漣波的應用而言，這將成為一大隱憂。

在這種情況下，必須將變壓器內的繞組電容和整流器的輸出電容 (C_{oss}) 或接面電容 (C_j) 降至最低。這些寄生電容在運作頻率高於諧振點時，會造成增益曲線反轉。图 4 顯示傳統一次諧波近似 (FHA) 計算的 LLC 輕載增益曲線，並比較了考慮變壓器繞組電容與整流器 C_{oss} 時所得到的增益曲線。

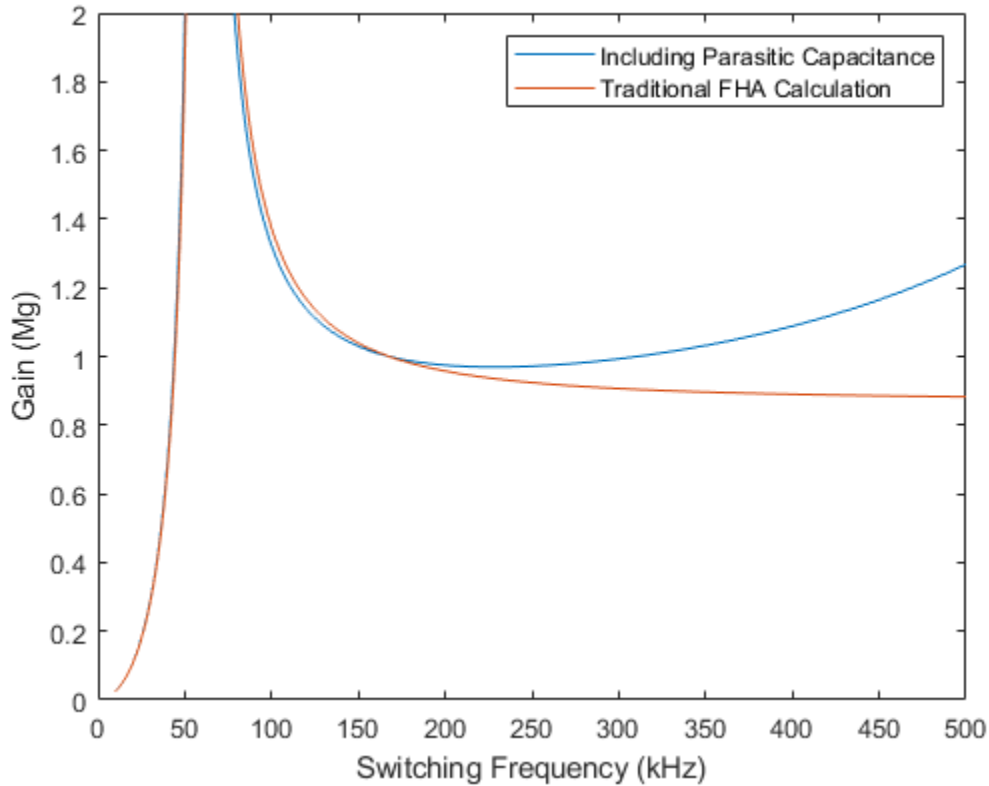


图 4. 低負載時寄生電容對 LLC 增益曲線的影響。來源：德州儀器

仔細設計變壓器內部繞組的堆疊方式，並選擇適當的整流元件，有助於減少增益曲線反轉的效應。與矽 MOSFET 或二極體相比，使用 SiC 二極體或 GaN 高電子移動電晶體 (HEMT) 等寬能隙裝置做為整流器可大幅降低 C_{oss} 。

使用具備高頻率略過模式的 LLC 控制器

與正常切換相比，高頻率略過模式可實現更低的增益。下列範例是一個 100W 半橋 LLC 轉換器，其輸入範圍為 70V 至 450V。在图 5 中，共振電流以綠色顯示，一次側切換節點則以藍色顯示。

右側是 LLC 轉換器以高頻略過模式運作的情形，每四個切換週期就省略一次切換。雖然名義切換頻率為 260kHz，但其實際以 77kHz 的突發頻率進行子調變。

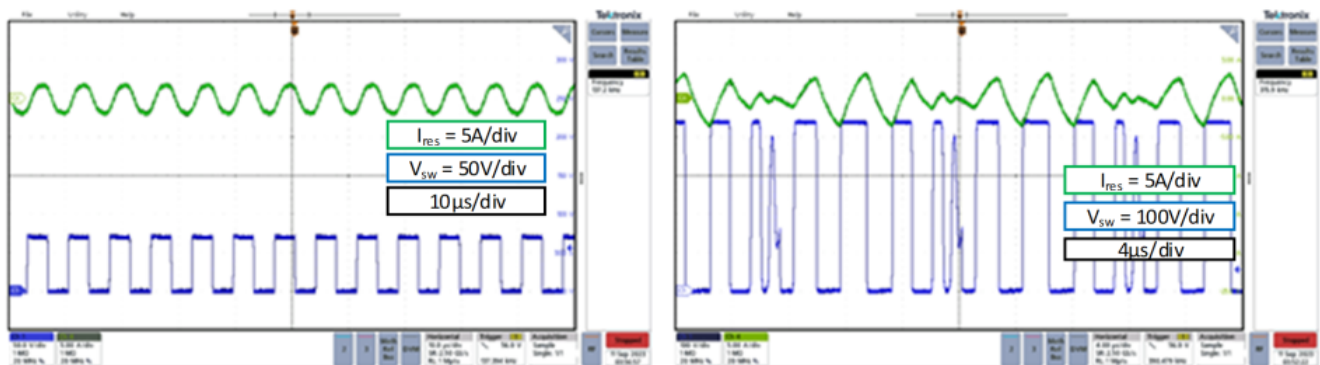


图 5. 100W LLC 轉換器在 70V 和 450V 輸入下的切換行為，共振電流為綠色，一次側切換節點為藍色。來源：德州儀器

管理輔助偏壓電壓

透過在 LLC 變壓器上加入輔助繞組，即可為電源供應器的一次和二次側產生必要的偏壓電壓。對於具有可變輸出電壓的 LLC 轉換器，輔助繞組電壓將隨輸出電壓變化而改變。這一情況在使用分段線束的 LLC 變壓器中更為明顯，因為其輔助繞組與次級繞組的耦合較差。使用簡單的低壓降穩壓器 (LDO) 架構來調節偏壓電壓時，效率會隨輸出電壓增加而下降。此時可能需要較大的實體封裝來處理功率消耗。

在圖 6 中， N_{aux1} 和 N_{aux2} 的繞比設計為：在最低輸出電壓時，透過 D1、Q1 與 D4 為 VCC 偏壓提供能量。隨著輸出電壓增加，C2 上的電壓受齊納二極體 D3 的崩潰電壓與 Q1 的閘源閾值電壓之差所限制。隨著輸出電壓進一步增加， N_{aux2} 所產生的電壓足以供應 VCC，此時 Q1 會因為閘源電壓低於關斷閾值而被強制關閉。

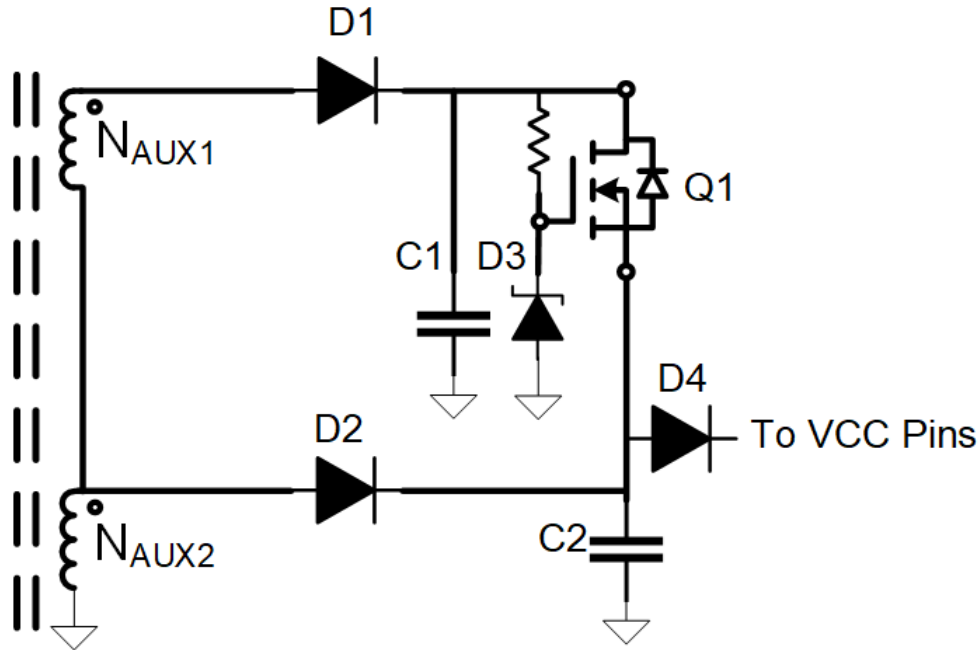


圖 6. 使用輔助繞組和 LDO 結構，為電源供應器的一次側和二次側產生必要的偏壓電壓。來源：德州儀器

此方法比單繞組配合 LDO 更有效率，但需要兩個輔助繞組。另一種只需一個輔助繞組的替代方式是使用降壓轉換器或升壓轉換器來取代 LDO。

管理深度放電電池的涓流充電

若 LLC 轉換器作為電池充電器使用，必須具備安全恢復深度放電電池的能力，需以涓流電流充電，直到電池組電壓達到可安全承受完整充電電流的程度。然而，LLC 無法在 0V 輸出電壓下提供穩定的小電流，因此難以直接支援此需求。

解決方法是在輸出端並聯一組小電流恆流電路及一顆旁通 FET，如圖 7 所示。在涓流充電模式下，旁路 FET 會關閉，輸出電流由配置成恆流模式的的 LM317 供應。如此一來，即使輸出電壓為 0V，LLC 轉換器的最小輸出電壓仍可大於 0V。此方法可讓 LLC 變壓器在一次側和二次側產生必要的偏壓電壓，並可在輸出電壓為 0V 時避免使用獨立的偏壓電源。電池組電壓上升至夠高的位準後，具離散充電幫浦電路的 FET 會繞過恆流電路。

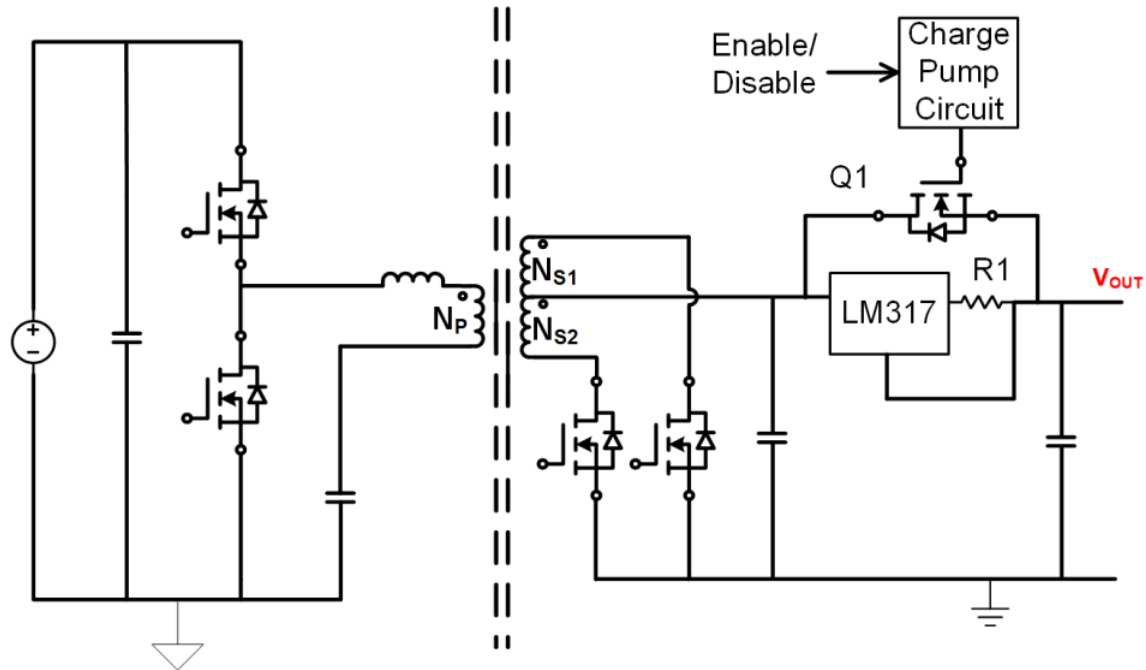


图 7. 搭載涓流充電電路的 LLC，可安全恢復深度放電的電池。來源：德州儀器

LLC 廣泛運作範圍

雖然由於 LLC 拓撲結構的本質，使用 LLC 轉換器實現廣泛操作範圍可能看起來很困難，但仍有多種策略可以讓這個目標更容易實現。此處列出的五個簡單秘訣和技巧皆適用於類比控制，無需使用更複雜的數位控制系統。

相關內容

- [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 #137](#)：以數位控制器在二次側實現 LLC 電流模式控制
- [用電訣竅 #84](#)：跳脫 LLC 串聯共振轉換器框架
- [用電訣竅 #103](#)：音訊放大器的 LLC 設計注意事項

先前發佈於 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