

Technical Article

以 TOLL GaN 突破太陽能系統的效能邊界



Sai Madhav , Poorva Moharil



太陽能系統正蓬勃發展，而光伏逆變器的性能正是技術創新的核心，旨在盡可能高效地利用太陽能。

其中一項創新包含使用氮化鎵 (GaN)，進而快速取代矽 (Si) 與絕緣閘雙極電晶體 (IGBT) 系統。GaN 有助於實現更高效率、更低散熱、更小尺寸、更易安裝及更低整體系統成本的太陽能系統性能提升。

GaN 與 SiC 與 IGBT 比較

GaN 透過其更優異的單位晶粒面積電阻 (R_{sp})、更低的輸入輸出電容 (C_{iss} 與 C_{oss}) 以及零反向恢復電荷等特性，提升功率轉換系統的性能。這些特性對於降低傳導損耗與開關損耗至關重要，同時能提高開關頻率，進而縮小被動元件體積，使系統更輕巧緊湊。

研究人員正積極透過改進製造技術、 R_{sp} 與封裝工藝，以最大化 GaN 的潛力。例如，如圖 [表 1](#) 所示，電晶體無引腳 (TOLL) 表面黏著封裝相較於雙十瓦封裝 (D2PAK) 或電晶體外殼 (TO)-247 等表面黏著封裝，具備更優異的熱性能與更低寄生參數。

表 1. 採用 TO-247、D2PAK 與 TOLL 封裝的 GaN 元件熱阻值比較

封裝	封裝尺寸	R_{DSon}	$R_{\theta JC}$
TO-247	21.0mm × 15.8mm	50mΩ	0.95
D2PAK	9.15mm × 10.16mm	50mΩ	1.05
TOLL	9.8mm × 11.6mm	70mΩ	0.73

TOLL 封裝簡介

作為無引腳封裝，TOLL 封裝的寄生電感極低，可實現更快的開關速度（降低開關損耗）、更高的壓擺率以及更低的電磁干擾。TOLL 封裝尺寸為 9.9mm x 11.68mm x 2.3mm，相較於 TO-247 封裝的 15.94mm x 20.95mm x 5.02mm 顯著縮小，能在電路板上節省 70% 的面積。經優化的 GaN 製程能實現具有極低漏源導通電阻 (RDS(on)) 的 GaN 場效電晶體 (FET)，適用於高功率應用場景。TOLL 封裝的緊湊尺寸有助於加速散熱，提升熱效率。

將 GaN FET 與驅動器整合可進一步提升效率與降低成本，有助縮小開極電感迴路，並能在功率級中嵌入過流與過熱保護功能。透過整合設計能更充分發揮 TOLL 封裝的優勢，進一步降低寄生參數與系統成本。TI 的 [LMG3650](#) 等裝置，結合了整合優勢與熱效封裝技術，適用於熱性能為首要考量之高電壓電源轉換系統，尤其在主動散熱受限的場景中表現出色。

能源基礎設施應用中的 TOLL

太陽能微逆變器、串列逆變器與儲能系統，因其在商業與住宅場景中的需求，各自的電源轉換級均對效率、尺寸及成本具有高度敏感性。

在太陽能應用中，逆變器輸出通常需與交流電網連接，因此 FET 需具備最高 650V 的耐壓等級。此外，此類逆變器應盡可能緊湊，以便靈活應用於住宅或商業系統中。高壓 GaN FET 的絕對最大耐壓等級達 800V，並能提高開關頻率以縮小被動元件體積，從而同時滿足高電壓與小尺寸的系統需求。TOLL 封裝具備優異熱效能，適用於系統環境溫度高於室溫且散熱效率至關重要的太陽能應用場景。

LMG3650 的整合功率級具備過溫保護、過流保護及欠壓鎖定等保護功能，有助省去外部保護電路，降低設計複雜性與尺寸。其具備零電壓檢測與零交越檢測等進階功能，可優化死區時間並降低損耗，同時提供 5V 低壓差線性穩壓器輸出，以驅動任何輔助電路的電流源能力。這些特性有助於優化能源轉換系統的性能與成本。

[基於 GaN 的 600W 單相循環變流器參考設計](#)採用循環變流器拓撲，高壓側使用 LMG3650，低壓側使用 LMG2100。此參考設計彰顯了整合式 GaN 裝置的潛力，其功率密度達 640W/L，峰值效率為 96.1%，且開關頻率最高可達 600kHz。

以 TOLL 裝置進行設計

選擇合適的 [GaN 裝置](#)對降低開關與傳導損耗至關重要，能有效提升系統性能。選用低 RDS(on) 的裝置未必是提升效率的全方位解決方案，因為較大的 GaN 晶粒會增加輸出電容，進而推高開關損耗與成本。

在硬開關拓撲中，低 RDS(on) 與高 Coss 組合會導致開關損耗高於傳導損耗；而在軟開關拓撲中，低 RDS(on) 則能提升效率，並呈現極低的開關與傳導損耗。

設計人員的另一個考量重點是多源供應能力。TI 的整合式 TOLL GaN 裝置與分立式 TOLL GaN 裝置在封裝上相容，為客戶提供多源供應選擇。如圖 1 所示，透過維持相同原理圖與布局，僅需對元件進行微調，即可將 TI 的 TOLL 裝置與分立式元件部署於同一電路板上。

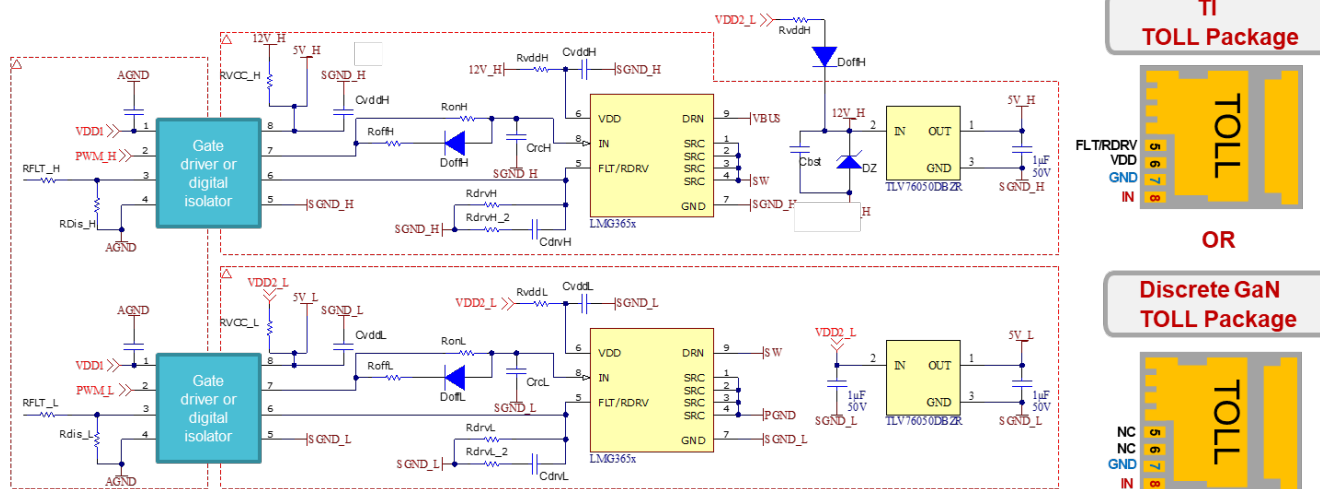


图 1. TI 與分立式 TOLL GaN 封裝的電路圖

結論

隨著功率需求不斷增長，採用 GaN 裝置可提升電源轉換系統的性能、成本與尺寸效益。採用 TOLL 封裝的 GaN 裝置非常適合需要高效率、緊湊尺寸與熱效能，且符合產業標準封裝的太陽能應用。GaN 技術的快速發展有望徹底變革電力系統，透過其固有優勢推動高效、穩健且可靠解決方案的開發。

其他資源

- LMG3650 - 650V TOLL 封裝 GaN FET，整合驅動器與保護功能，提供 3 種 RDSon 選項：25 mΩ、35 mΩ、70 mΩ
- 查看「[LMG3650R035 評估模組 EVM 使用手冊](#)」
- 進一步了解我們的 [GaN 技術](#)

註冊商標

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

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

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 © 2025, 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](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. 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025