

Technical Article

以 TI GaN FET 為基礎的 10kW 單相串列式逆變器設計考量



Riccardo Ruffo 與 Vedatroyee Ghosh

能源永續性與安全性的疑慮，正加速對儲能系統的需求，特別是在住宅太陽能裝置中。市面上有整合儲能系統的微型逆變器，功率高達 2kW。系統需要更高功率時，則可採用也連接儲能系統的串列式逆變器或混合串列式逆變器。

圖 1 為混合串列式逆變器的方塊圖。共用的穩壓 DC 匯流排將基本區塊互連。混合串列式逆變器包含以下子塊：

- 用於執行最大功率點追蹤的單向 DC/DC 轉換器。
- 用於電池充電和放電的雙向 DC/DC 轉換器。電池可在夜間或停電期間提供電力。
- DC 轉 AC 轉換器，負責將 DC 電源轉換為 AC 電源，並維持低電流總諧波失真 (THD)。
- 微控制器 (MCU)，用於測量電流和電壓、控制電源開關、執行絕緣監測、偵測串列電弧，以及啟用通訊。
- 功率優化器，用於最大化光電面板的可用功率，不受日照強度和溫度等外部變數影響。

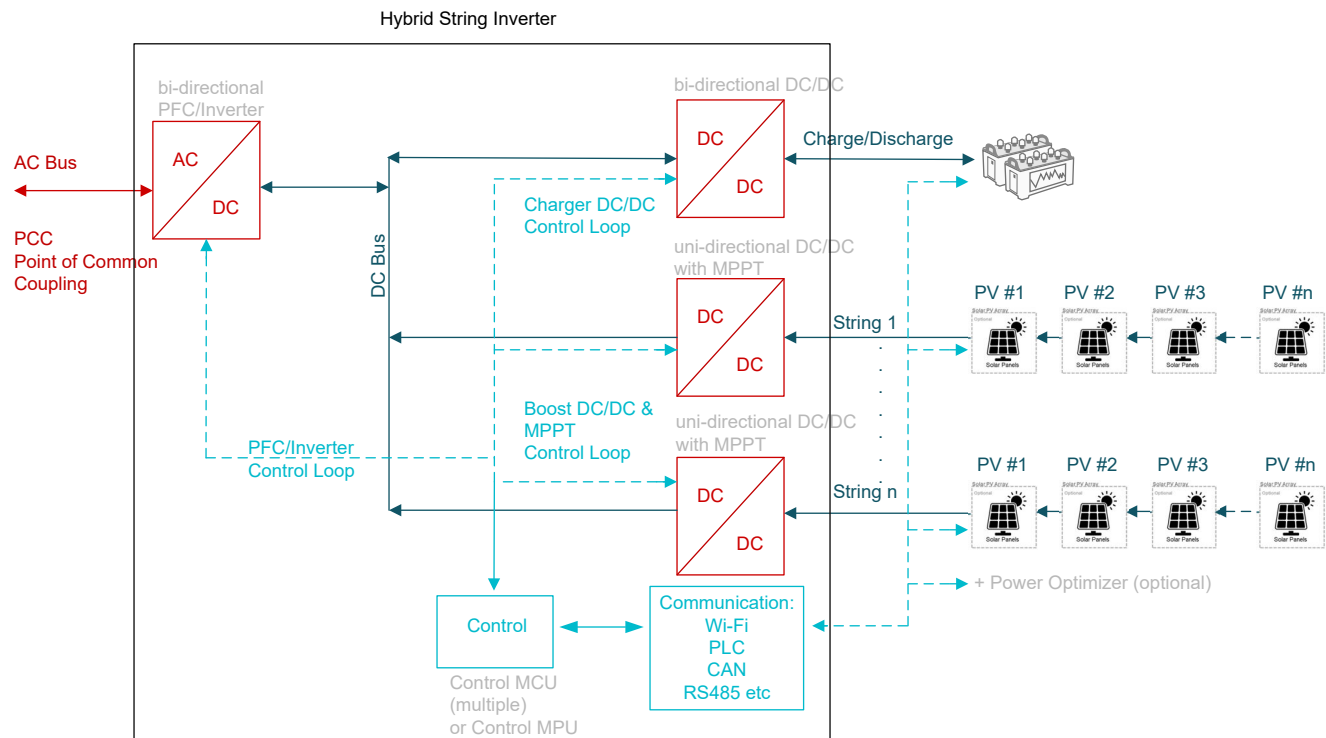


圖 1. 連接至電網的混合串列式逆變器電路圖

IGBT 與 GaN FET 的比較

串列式轉換器包含電源開關，例如絕緣閘極雙極電晶體 (IGBT)。這類供電產品存在尾電流和二極體逆向復原等問題，會導致高切換損耗。此外，這些現象會受到溫度影響，導致更高的功率損耗，特別是對於靜態冷卻解決方案而言。因此，這些供電產品需要以低頻率運作，需要體積更大的被動元件和散熱器。通常，切換頻率範圍為 5kHz 至 15kHz。

氮化鎵 (GaN) 等寬能隙電源開關沒有少數載子現象，因此能降低切換損耗。降低切換損耗可在維持相同系統損耗的情況下提高切換頻率，進而減少被動元件數量。平均而言，切換頻率將提高六倍。

本文提出 GaN 場效電晶體 (FET) 型 10kW 串列式逆變器。我們也將探討 GaN 的優勢，並強調為住宅太陽能應用建置此類系統的優點。

GaN 型串列式逆變器的設計考量

图 2 介紹了具有電池儲能系統的 10kW、GaN 型單相串列式逆變器參考設計，包括所有主動和被動元件。

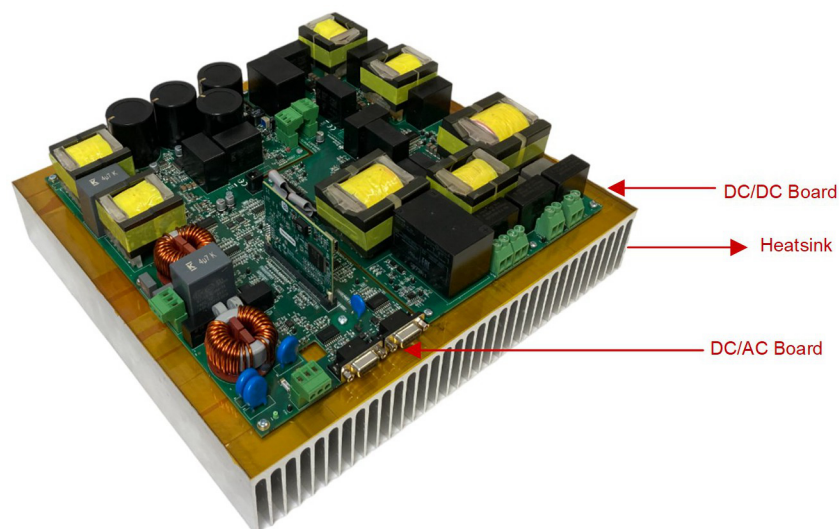


图 2. 以 GaN 裝置為基礎的 10kW 單相參考設計

圖 3 是轉換器的電路圖。

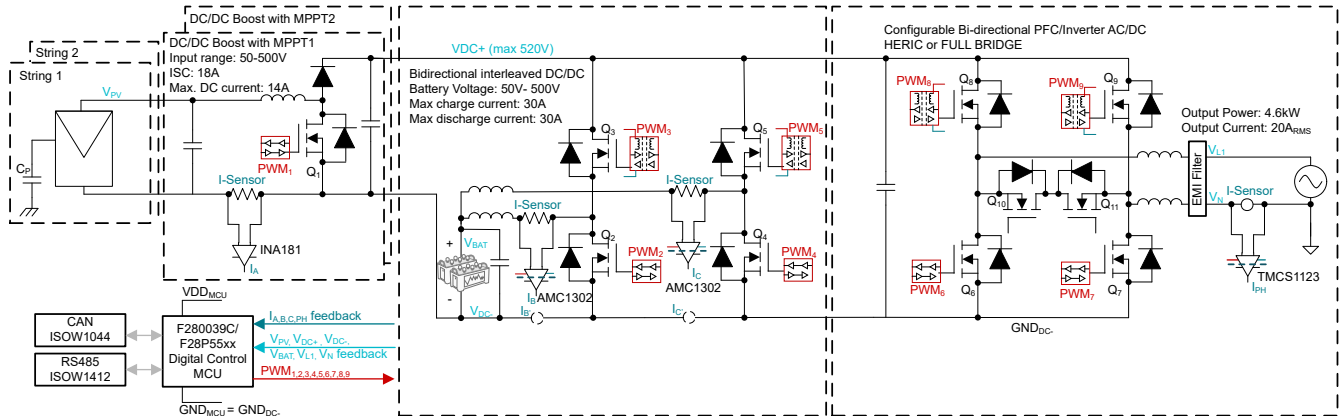


圖 3. 單相串列式逆變器參考設計方塊圖

此參考設計包含四個在不同切換頻率下運作的電源轉換系統：

- 兩個升壓轉換器，用於實現兩個獨立串列輸入，每個額定功率為 5kW (134kHz)。
- 額定功率為 10kW 的交錯式雙向 DC/DC 轉換器 (67kHz)。
- 推向電網、額定功率為 4.6kW 的雙向 DC/AC 轉換器 (89kHz)。

供電產品

由於可在頂部冷卻額定電壓為 650V 的 30mΩ LMG3522R030 GaN FET，其熱阻抗低於底部冷卻裝置。這些 FET 具有整合式閘極驅動器，可降低解決方案成本並縮小設計尺寸。

MCU

如圖 3 所示，單一 MCU 控制參考設計。TMS320F28P550SJ 可即時控制四個功率轉換級、保護，以及多重控制迴路的實作。可以讓 MCU 參考電源接地 (GND DC -)。由於有整合式閘極驅動器，也可以直接控制 GaN FET。底側 (Q1A、Q1B、Q2、Q4、Q6、Q7) 不需要隔離式閘極驅動器。

電流感測

系統需要在不同轉換器級的不同點進行電流測量。由於 MCU 參考電源接地，升壓轉換器會利用 INA181 等分流架構解決方案測量負軌上的電流。在交錯式轉換器中，您需要使用 AMC1302 等精密電流感測強化型隔離放大器，在不同時間和不同溫度下以高準確度測量電池中的電流。內部 GaN 低壓差穩壓器產生的 5V 可為電流感測放大器供電。在逆變器級中，可使用 TMCS1123 等霍爾效應電流感測器測量電網電流。其高頻寬與準確度有助於大幅降低電流 THD。

實驗結果

我們使用以下系統電壓運作參考設計：

- 串列輸入電壓：350V。
- 額定電池電壓：160V。
- 電網電壓：230V。
- DC 鏈路電壓：控制在 400V。

我們收集了轉換器在不同情境下運作時的以下效率：

- 從串列輸入汲取並輸送至電網的功率（請參閱圖 4）。
- 從電池中汲取並輸送到電網的功能（請參閱圖 5）。
- 從串列輸入汲取並輸送至電池的功率（請參閱圖 6）。

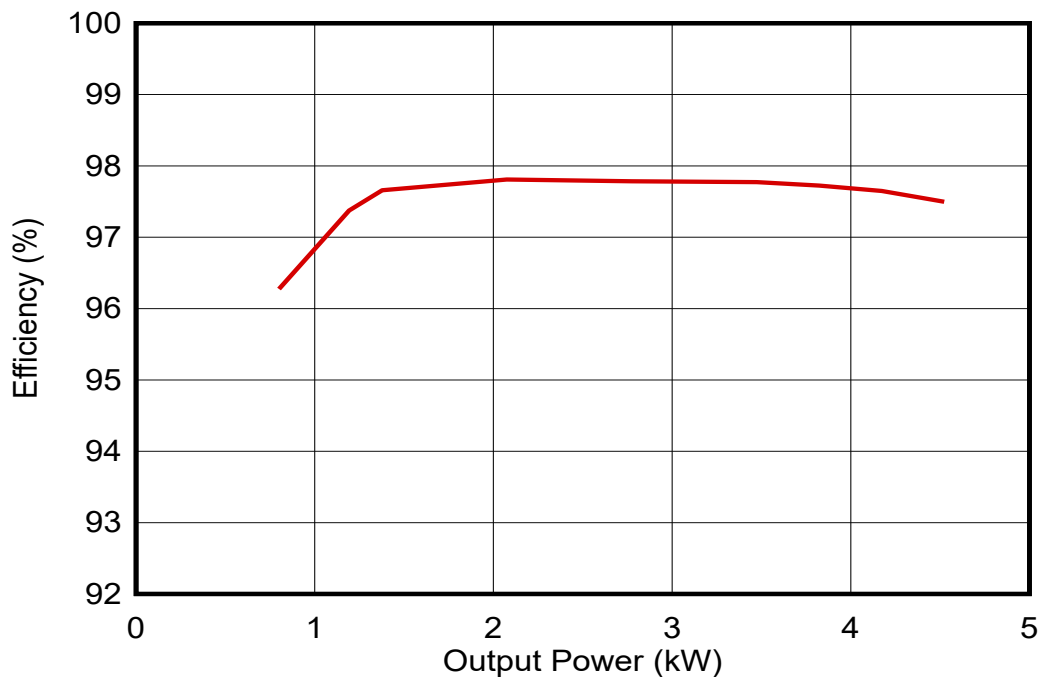


图 4. 從光電板輸出向電網轉換功率時的效率 (350V_{DC} , 230V_{AC})

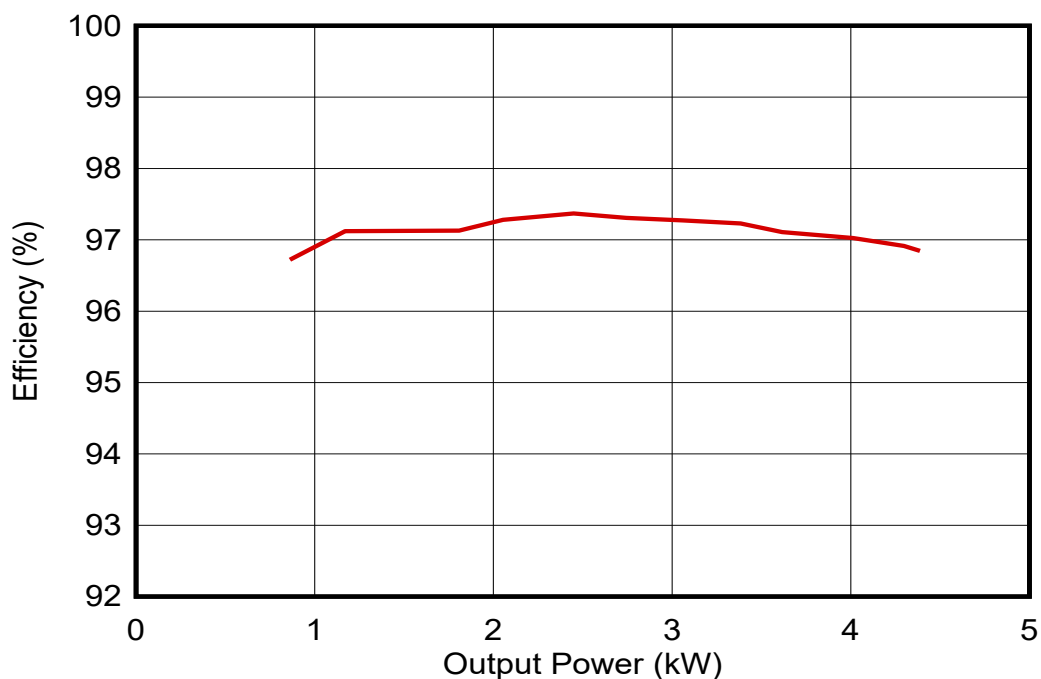


图 5. 從電池輸出向電網轉換功率時的效率 (160V_{DC} , 230V_{AC})

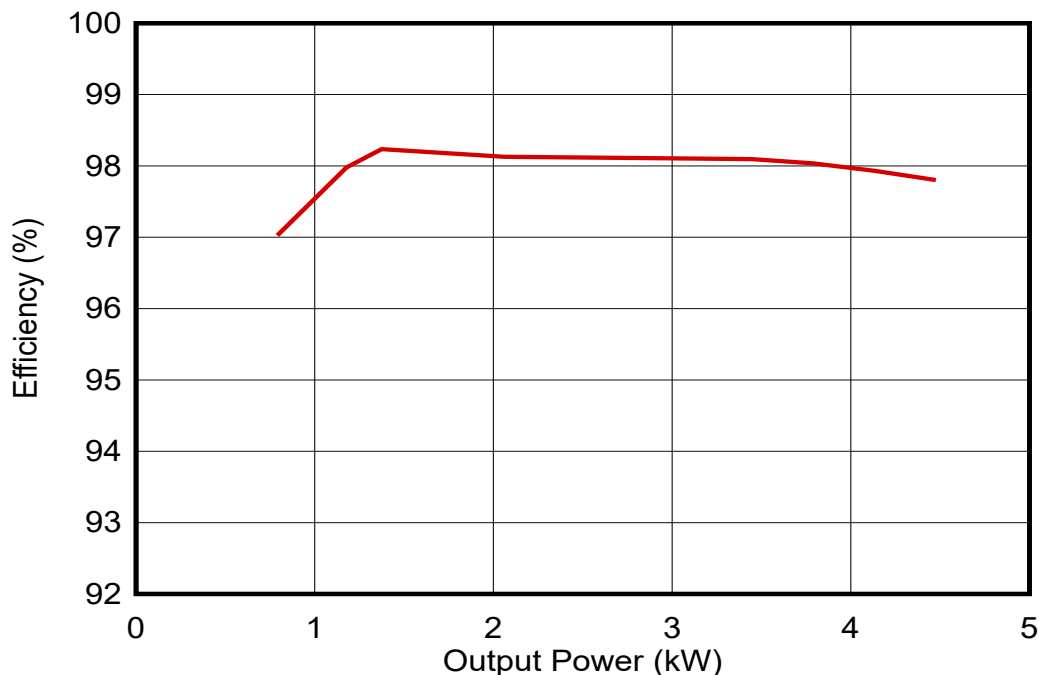


图 6. 從光電板向電池轉換功率時的效率 (350V_{DC} , 160V_{DC})

圖表顯示，即使切換速度比標準 IGBT 解決方案快六倍，整體效率仍可媲美現今的 IGBT 解決方案。包含內務處理型電源供應器時，效率仍接近 98%。所有三張圖都包含兩個功率轉換級。

結論

GaN 有助於實現更高的功率密度，進而減輕最終終端設備的重量。憑藉接近 98% 的整體系統效率和 2.3kW/L 的功率密度，此串列式逆變器參考設計展現出絕佳性能。此外，考慮到整體系統成本，實作整合式閘極驅動器解決方案的可能會降低成本。

其他資源

- 歡迎查看以下其他 TI 參考設計：
 - 以 GaN 為基礎的 1.6kW、雙向微型逆變器參考設計。
 - 適用於太陽能應用中機器學習電弧偵測的類比前端參考設計。
 - 400W GaN 型 MPPT 充電控制器和功率最佳化工具參考設計。
 - 具有電池儲能系統的 10kW、GaN 型單相串列式逆變器參考設計。
- 閱讀 How2Power 文章，「評估以 GaN FET 為基礎的 10kW 串列式逆變器的性能」。

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

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