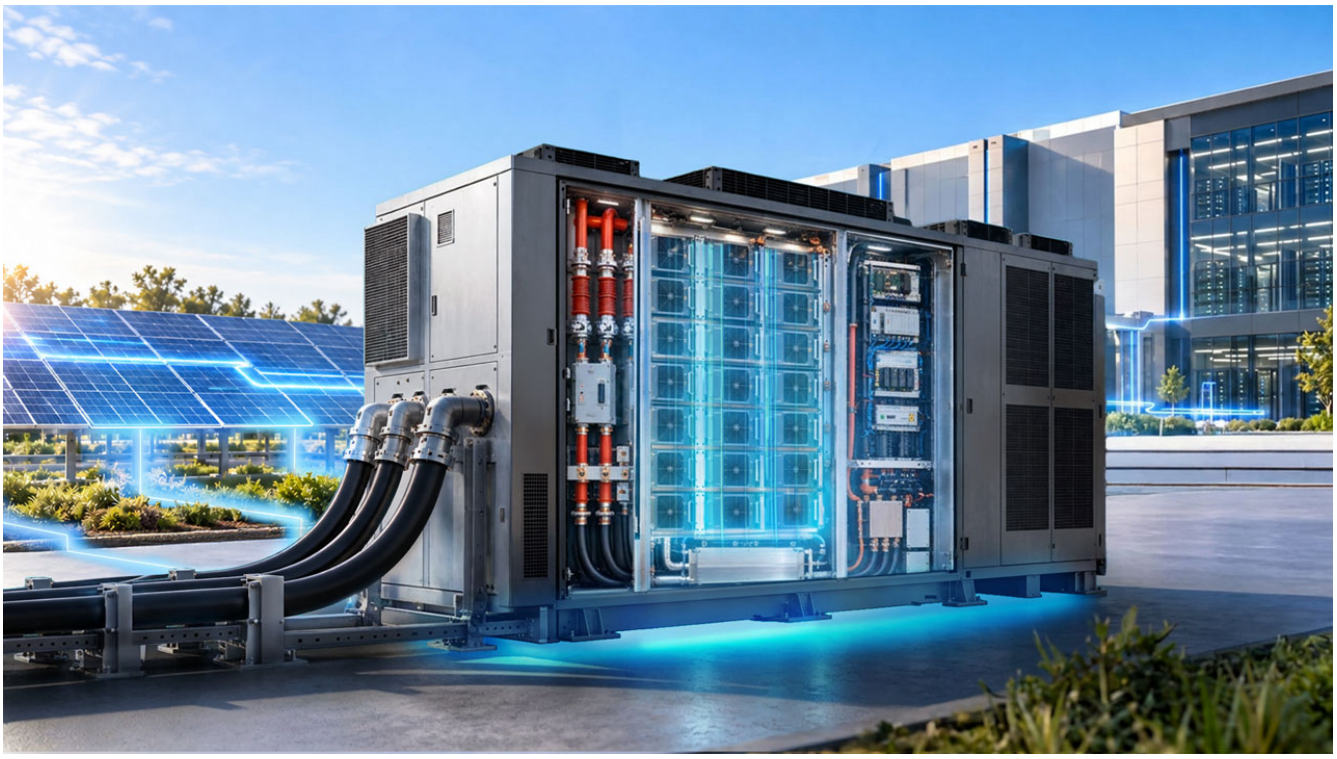
Technical Article

固態變壓器已準備好重塑電網級電力輸送

電網基礎設施與電力輸送系統經理 Harald Parzhuber

- 固態變壓器 (SST) 支援可擴展至 35kV 與 6MW 的高效且精巧的電力輸送。
- 碳化矽 (SiC) 技術的進步正加速資料中心、電動車 (EV) 充電和儲能應用對 SST 的採用。



SST 長期以來一直具備改善功率轉換效率、減小系統尺寸，以及實現靈活電源架構的潛力。直到最近，技術與經濟上的限制，才限制了這類裝置的廣泛採用，但額定電壓高達 3.3kV 的進階 SiC 電源裝置正在克服這些障礙。這些裝置可實現更高的開關頻率、更高的 DC 鏈路電壓，以及更少的轉換器單元，支援更精巧的架構。隨著 SST 開發的目標功率位準為 2MW 至 6MW 和高達 35kV 的電網電壓，工程師必須優先考量進階轉換器拓撲、高電壓隔離、即時控制與可靠通訊。

這些功能正在推動資料中心、兆瓦級 EV 充電和併網儲能領域對 SST 的普及應用。在資料中心，基於 SST 的電源架構可將整體電網到圖形處理單元的電力輸送效率提高超過一個百分點。鑑於單一人工智慧 (AI) 運算機架大約消耗 1MW，這種微小的收益可以轉化為大型資料中心設施中顯著的節能效果。

图 1 說明了架構的變化，從傳統方法 (低頻變壓器和多階 AC/DC 和 DC/DC 轉換)，到透過高頻率變壓器從中電壓電網直接轉換至 $800V_{DC}$ 或 $1.5kV_{DC}$。

English Document: SSZTDE9
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

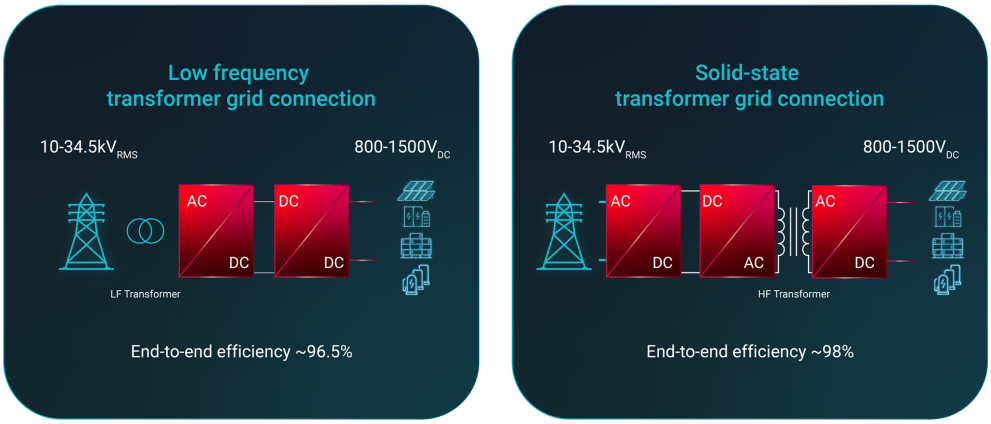


圖 1. 採用低頻變壓器併網方式相較於 SST 實作的效率提升

讓 SST 成為低頻變壓器可行替代方案的變革

現代 SiC 裝置可支援更高的開關頻率，同時減少功率損耗，進而提升整體系統效率。這些較高的運作頻率也可實現更小的被動元件，因而設計更精巧，並降低物料成本。德州儀器 (TI) 藉助絕緣式閘極驅動器、隔離技術、感測解決方案與即時控制能力支援這些系統，使大規模 SST 部署變得更加實用。

典型的 SST 實作採用中壓側的堆疊 AC/DC 轉換器 (AC_{MV})，並在低壓側採用並聯連接的 DC/DC 輸出 (圖 2)。

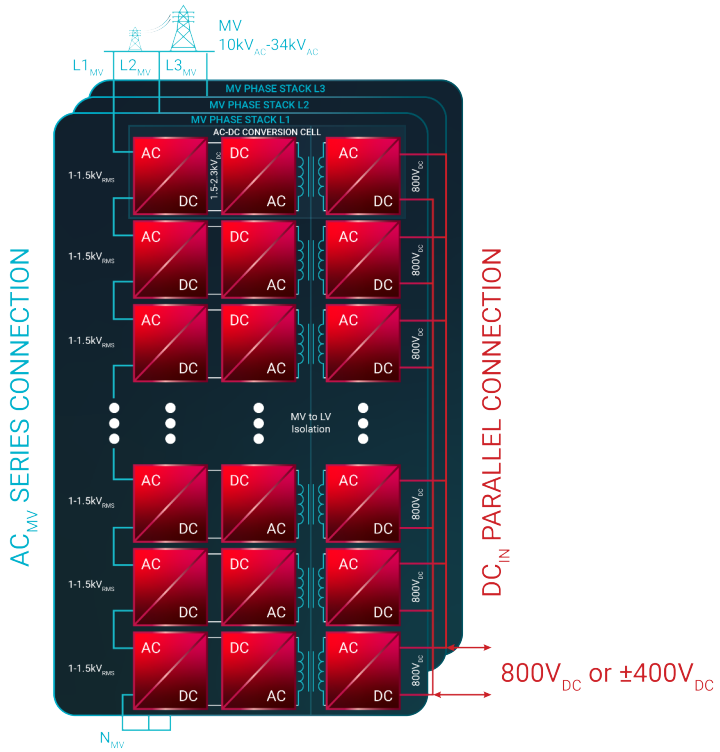


圖 2. 典型的 SST 實作，具備堆疊式空調與機械通風轉換器及並聯低電壓輸出

電力半導體的崩潰電壓會直接影響設計人員實作 SST 架構的方式。雖然早期實作主要依賴於 1.7kV 電源裝置，但提供額定 2.3kV 和 3.3kV 的 SiC 模組，已顯著重塑系統設計。具體來說，這些裝置可提供較高的 DC 鏈路電壓，因此可減少單元總數。舉例來說，使用 1.2kV 裝置的 SST 需要 100 個轉換器單元，而使用 3.3kV SiC 裝置則需要

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

約 50 個單元。這種減少可簡化系統設計，縮減實體尺寸，並降低通訊架構的複雜性，因為每個轉換器單元都必須與中央控制器通訊。圖 3 說明不同中壓等級的單元數量如何隨著 SiC 電壓額定值從 1.2kV 增加到 3.3kV 而縮減。

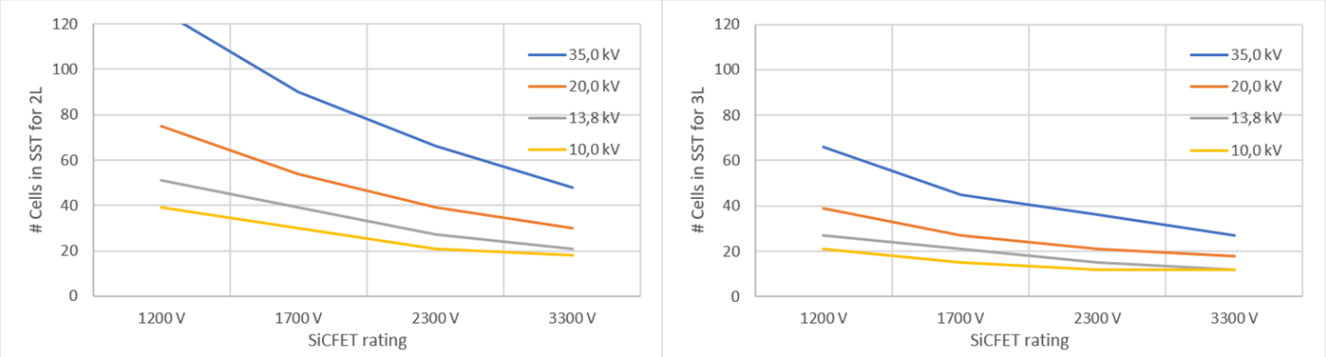


圖 3. 基於 SiC 額定值的 2L 和 3L 轉換單元的單元擴展

同時，更高的功率密度和更快的開關速度，也對支援電子產品提出了更高的要求。閘極驅動器必須提供進階保護功能，例如去飽和偵測、支援可調整電壓轉換速率控制、為電源模組提供足夠的閘極驅動電流，以及在高達 100V/ns 的極高共模暫態抗擾度條件下可靠地運作。此外，當個別轉換器單元內的工作電壓超過 2kV 時，絕緣式閘極驅動器實作也需要特定設計技術，例如級聯隔離層，以維持可靠的運作。

2.3kV 至 3.3kV 範圍內的裝置可在架構與成本間提供實用的取捨，其同時也提供了備援策略。在 N + 1 或 N + 2 相位堆疊配置中，使用更高電壓的 SiC 裝置時，每個額外的備援單元代表裝置容量更大且更昂貴的增量。相位堆棧備援概念通常使用 N + 1 或 N + 2 配置，以便在個別單元出現故障時系統可以繼續執行。因此，工程師必須在減少單元數量與每個備援單元成本增加之間取得平衡。

SST 的電壓要求和功率等級

SST 的相關功率與電壓等級也在增加。早期實作通常限制在 1MW 左右。如今，中壓電網連接太陽能和儲能系統 (ESS) 的起步功率通常為 2MW 至 4MW，部分系統則可達到 6MW。因此，新的 SST 開發必須支援 2MW 至 6MW 範圍內的功率位準，並且若干製造商已推出這些功率等級的系統。

電網電壓要求也在同步演進。稍早的 SST 設計主要以 10kV 與約 13.8kV 的中電壓電網為目標，預期未來世代將可支援高達 35kV 的電網電壓。這些更高的功率與電壓位準，對功率密度、絕緣和高電壓隔離提出了額外要求。TI 憑藉旨在支援高效率併網型高壓電源系統的閘極驅動、隔離、感測與控制技術，能夠滿足這些要求。

SST 的架構選擇

雖然早期的 SST 設計主要依賴於二階全橋轉換器 (請參閱 圖 4)，但在新一代 SST 的 AC/DC 級中，多階拓撲，特別是主動中性點箝位 (ANPC) 轉換器越來越常見。這些拓撲可滿足現代系統更高的電壓應力與效率要求。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

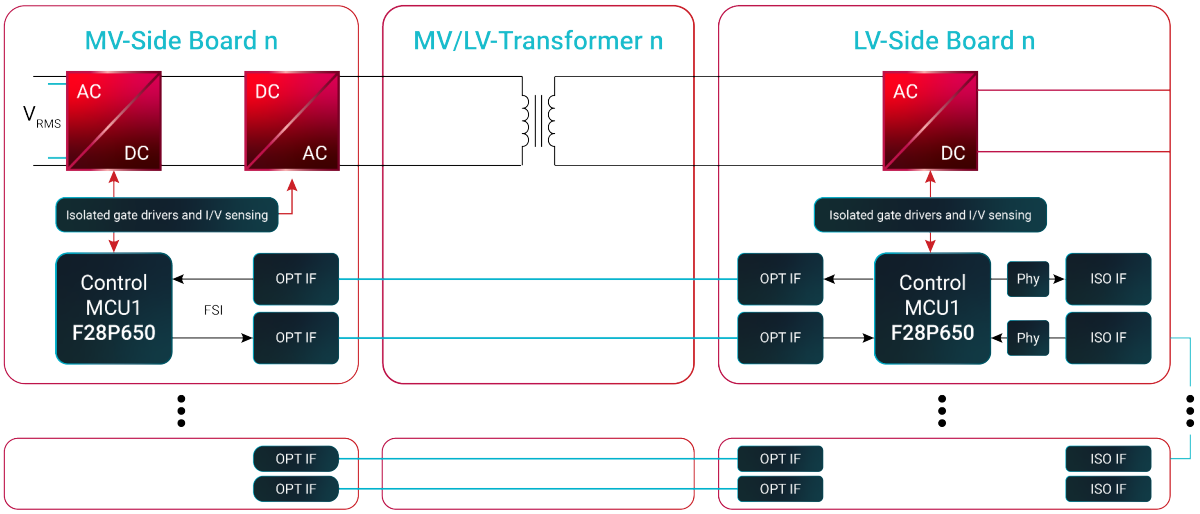


图 4. 採用 AC/DC 與隔離式 DC/DC 的轉換單元架構

就隔離式 DC/DC 級而言，設計人員通常會在相移式雙主動橋式 (DAB) 轉換器和諧振 CLLLC DAB 轉換器間選擇。由於多個 DC/DC 轉換器會在 SST 內並聯連接，因此若要簡化同步化，通常偏好採用相移式 DAB 等固定頻率拓撲。相較之下，CLLLC DAB 架構可能會導致切換頻率略有不同，進而產生難以濾除的聲音拍頻或電氣干擾。

為了因應不同的應用需求，TI 提供以下裝置技術：

- 即時微控制器 (MCU)，支援二階全橋和多階拓撲的既定調變技術，包括 ANPC、中性點箝位、T 型和飛馳電容器轉換器。
- 高電壓閘極驅動器與隔離專為滿足 2.3kV 和 3.3kV SiC 電源模組的工作電壓要求而設計。
- 隔離式感測解決方案可提供精密的電流和電壓感測，並針對高電壓、高頻率環境最佳化。

藉由將控制 MCU 的接地連接至 DC 鏈路的中點 (例如使用即時 TI C2000™ MCU)，設計人員可減少隔離層中的電壓應力，並將相關工作電壓保持在 2 kV 以下。

隨著 SST 架構持續演進，以支援更高的功率位準、更高的電網電壓、更高功率密度及整合度更高的控制能力，圍繞功率半導體的支援技術也變得日益重要。高電壓閘極驅動器、隔離、感測、即時控制與可靠的系統通訊，在實現新一代 SST 系統方面發揮著重要作用。

克服設計特定挑戰

除了架構選擇之外，設計人員也面臨 SST 設計的重大技術挑戰：將 AC/DC 級與每個轉換器單元內的隔離式 DC/DC 級同步化。這些功能在兩個不同的電壓域上運作。隔離式 DC/DC 轉換器的 AC/DC 級和一次側在中電壓側運作，隔離式 DC/DC 轉換器的二次側則在低電壓側運作。

這些電壓域間的隔離層必須能夠承受 SST 的全相至中性電壓。在額定電壓為 35kV 線對線的系統中，此電壓可能達到約 20kV。為了滿足此要求，需要大幅度的物理分離，以及適當尺寸的電氣間隙和爬電距離，如 图 5 所示，其中高頻變壓器位於中間。在中電壓印刷電路板 (PCB) (图 5A) 和低電壓 PCB (图 5B) 上，隔離電氣間隙必須符合轉換器模組的工作電壓，在新的 SST 系統中通常不會超過 2kV。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

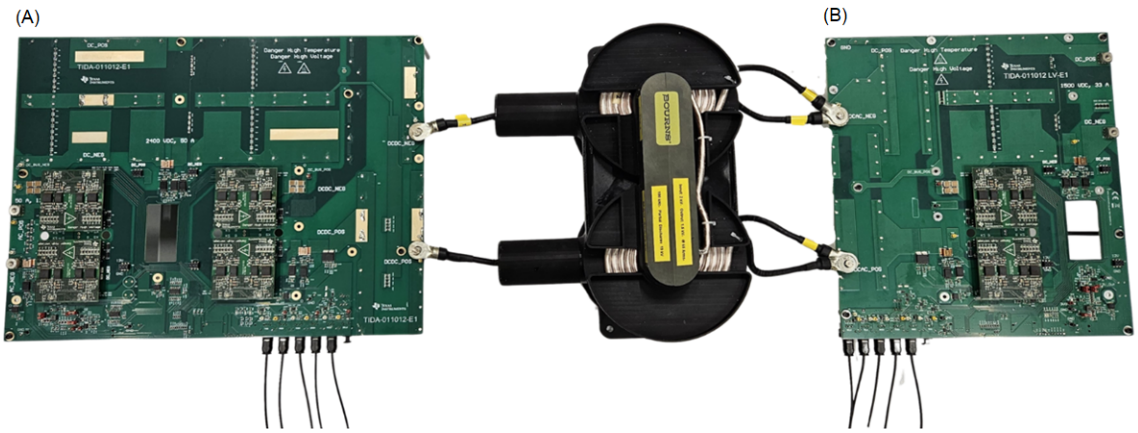


图 5. 50kW SiC 式模組化 SST，在中電壓 (A) 與低電壓 (B) PCB 間採用塑膠光纖介面

設計人員可使用光纖鏈路或射頻技術，在這種高電壓隔離層中實作通訊。光纖通訊是目前首選的方法，因為其延遲低，並且對電磁乾擾具有強大的抗擾性和高隔離能力。因此，更符合成本效益的高速光學收發器，將在降低整體 SST 系統成本方面發揮重要作用。

此外，設計人員還必須針對中央控制器與每個相位堆疊內個別轉換器單元之間的通訊進行開發。基於廣泛採用且可靠通訊協定的標準化通訊架構，可簡化互通性，同時也更容易因應不斷演進的網路安全要求，包括歐盟的網路復原能力法案等法規架構。

TI 提供資源與參考設計，以協助設計人員加速上市。例如，適用於中電壓應用的 50kW SiC 式模組化固態變壓器參考設計 (如前面 图 5 所示) 是一個很好的起點。

受益於採用 SST 的其他應用

SST 在 EV 充電領域也發展迅速，尤其是在兆瓦級充電基礎設施方面。如今，營運商將這些系統連接至以高達 690V_{AC} 運作的低電壓電網，並透過傳統的低頻變壓器將其與中壓電網連接。

SST 可更直接連接至中電壓電網，並可減少發電與 EV 電池之間的功率轉換級數量，進而提升能源效率。這種架構對於重型 EV 和擁有多個充電樁的充電站來說尤其具有吸引力。

中壓電網連接 ESS 是另一個引人注目的應用。在太陽能和儲能組合架構中，可將中央太陽能逆變器直接連接至 DC 側的 ESS 中，無需在中央逆變器中將太陽能從 DC 轉換為 AC，然後再從 AC 轉換為 DC 進行儲存，這種兩步轉換會浪費能源。透過 SST 連接至中電壓電網的 DC 耦合太陽能加儲能組合架構，可簡化整體電源轉換鏈，減少轉換損耗，並提高系統效率。

在這些應用中，SST 實現的架構在能源轉換和電力傳輸方面均更加簡化且更具效率。

作者簡介

Harald Parzhuber 負責管理德州儀器的再生能源系統團隊。他擁有超過三十年的工程經驗，涵蓋設計和測試工程、產品定義和系統工程等領域。此外，他還擁有工業自動化領域的四項專利。Parzhuber 在德國蘭茨胡特應用科學大學獲得電機工程碩士學位。

其他資源

- 請觀看 50kW SST 設計示範影片「取代 AI 資料中心內的傳統變壓器」。

註冊商標

C2000™ 是德州儀器的商標。

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

Copyright © 2026 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 © 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