

Technical Article

數據中心演進滿足人工智慧的巨大電力需求



Brent McDonald, systems and applications engineer, Texas Instruments



隨著大型語言模型徹底改變我們存取數據的方式，人工智慧的進步也正顛覆各行各業與社會對數據中心運算資源的運用方式。我們正逐漸邁向無需在搜尋引擎中輸入特定關鍵字，而是能像向人提問般向 AI 提出問題，並獲得詳細反應的階段。當然，這僅僅是 AI 能力的冰山一角。它還能撰寫程式碼、產生圖片與影片，以及為會議進行轉錄和總結。所有這些 AI 功能都需要大幅提升電力供應才能實現。

要輸送如此龐大的電力，並確保 AI 能充分發揮潛力，就需要重新構想數據中心內 IT 伺服器機架的結構，以及如何最佳化地產生和分配這些電力。在這篇文章中，我將探討數據中心電力如何輸送給執行運算的伺服器功能、為何電力分配架構需要改變以滿足快速演進的 AI 運算與電力需求，以及如何實現這一目標。

圖 1 顯示了 IT 伺服器機架層級電力需求隨時間的變化。圖 1 預測，到 2028 年，單個 IT 機架將需要 1.5MW 的電力，這是目前伺服器機架用電量的十倍。

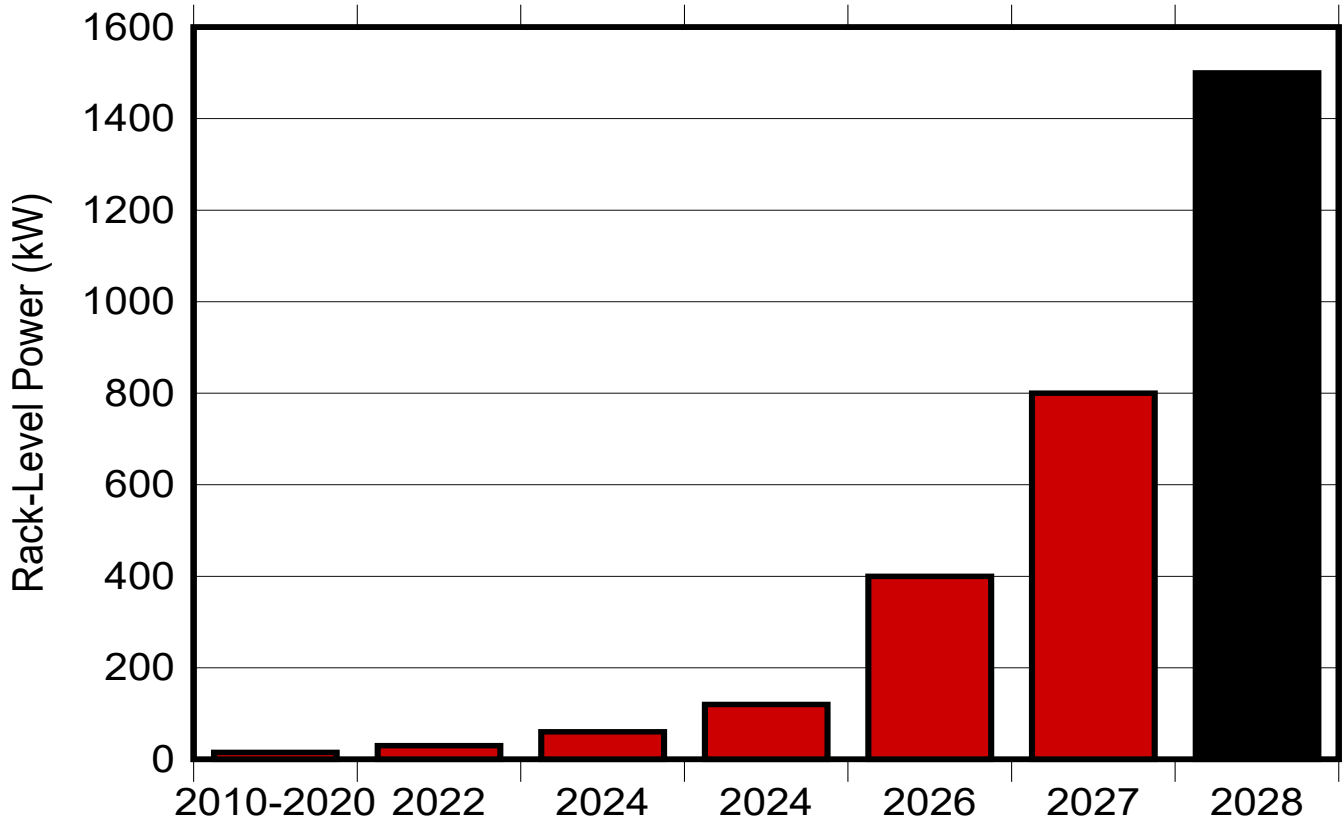


图 1. 機架級電源需求

簡史

為理解數據中心與伺服器內部電力傳輸網絡的變革規模，我們先簡要回顧當前架構。图 2 顯示了自 1990 年代至今主導伺服器與資料中心的第一代電力分配架構。图 2 左上角區域顯示來自 AC 電網的三相 AC 電源。電力會從約 13kV 的「中壓」變壓為 480V 的 AC 線路電壓。不間斷電源供應器 (UPS) 可緩衝此電壓。

當 AC 電網斷電時，UPS 會利用本地電池和逆變器功能，維持數據中心伺服器運作，直到備用發電機透過自動切換開關 (ATS) 或靜態切換開關 (STS) 接管供電。480V 的線路 AC 電壓相當於 $277V_{AC}$ 的線至中性線電壓。

將三相 $277V_{AC}$ 電力輸送至 IT 伺服器機架後，電源供應單元 (PSU) 會執行功率因數校正 (PFC)，並產生穩壓的 12V 輸出，分配至伺服器 IT 托盤。在第一代架構中，此 12V 分配電壓為各種負載、穩壓器及其他負載點電壓穩壓器 (PoL) 供電，從而產生為伺服器托盤中各處的處理器、記憶體及通訊積體電路供電的電壓。當機架總功耗約為 10kW 至 20kW 時，此架構運作良好。然而，隨著對更高運算能力需求的增長，處理這些運算功能所需的電力也隨之增加。

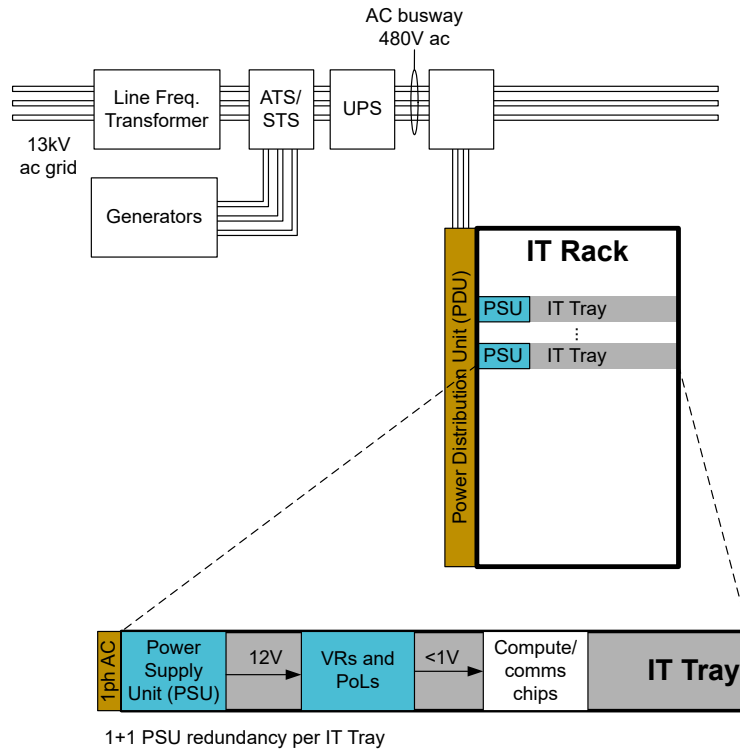


图 2. 第一代傳統機架式伺服器

图 3 展示了數據中心電力分配架構的下一階段演進。從 图 3 的左上角區域開始，此架構採用相同的中壓輸入電源。與第一代架構相同，變壓器將三相 13kV 電壓轉換為 480V_{AC} 線路電壓。此架構不使用 UPS，而是將等效的 277V_{AC} 線至中性線壓直接傳送至 IT 機架內的本地 PSU。這些 PSU 不再專用於個別伺服器托盤，而是整合在單一電源櫃中。在此情境下，電源櫃僅是裝設多台電源供應器的機架，其輸出共同分擔 IT 設備的負載需求。

每個電源櫃通常配置六個 PSU，採用 N+1 配置以實現備援能力。透過增加電源櫃數量，即可滿足 IT 機架的總電力需求。這些電源櫃的輸出為 50V_{DC} 匯流排，透過沿伺服器機架背面佈設的高電流母匯流排，分配至每個 IT 托盤。雖然部分第二代設備保留 UPS 功能，但其他系統會將其移除（如 图 3 所示），並以本地備用電池單元 (BBU) 取代，使 50V_{DC} 匯流排在電力恢復或備用發電機接管前維持供電。在某些情況下，電容櫃或電容備援單元 (CBU) 有助於消除因電力中斷引起的過度電壓瞬態與電流瞬態。每個 IT 托盤內的 50V 匯流排會連接至本地中間匯流排轉換器，產生 IT 托盤中系統負載所需的 12V 電壓。

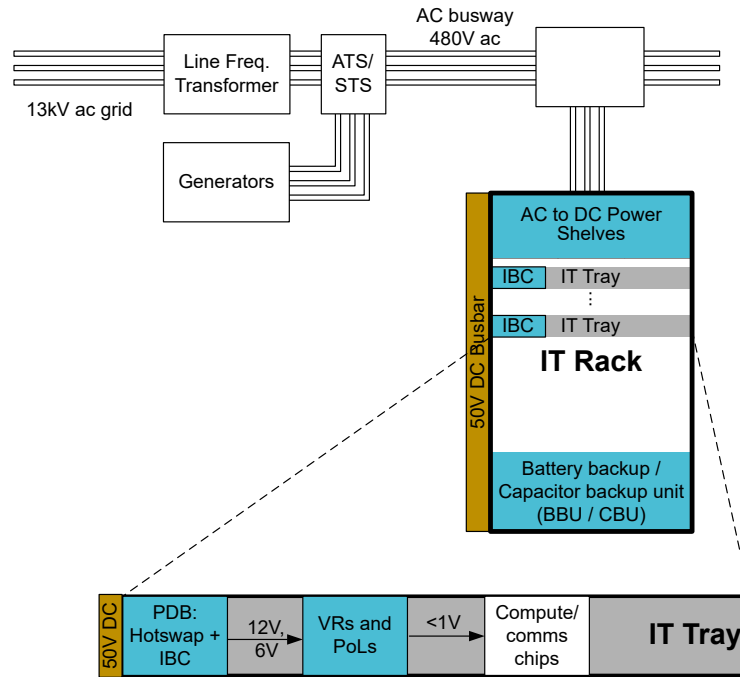


图 3. 第二代 - 雲端運算和 AI 運算

第二代架構使 IT 機架能供電的負載超越第一代架構的能力。第二代架構的實際負載可達 100kW 範圍。當所需總功率開始達到約 200kW 時，配電損耗將變得顯著，使得進一步增加功率變得不切實際。

AI 數據中心電力輸送

負責運行先進 AI 模型的資料中心機架，預計在 2028 年左右將突破 1MW 的用電量。若採用第二代架構配輸如此大的功率，並假設使用 50V 母匯流排，將導致高達 20,000A 的電流。傳輸如此大電流所需的母匯流排不僅笨重、成本高昂，且極不實用。因此，在新的 AI IT 伺服器機架中採用更高電壓的 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 匯流排進行配電，可將高電流母匯流排的需求從 20kA 降低至 1.25kA。這種電流數量級的降低，有助於維持整體電力傳輸的高效率，並能使用體積更小、密度更低的銅質母匯流排。图 4 展示了此架構。

第二代架構中的電源櫃被側裝電源模組取代，該模組以三相 480V_{AC} 電網電壓作為輸入。側裝電源模組將其轉換為 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 匯流排，並分配至一個或多個 IT 伺服器機架。側裝電源模組現在也容納了 BBU。除了提升配電效率，第三代架構也為 IT 機架騰出更多空間以容納運算功能。

從某種意義上說，提升 IT 伺服器機架的運算密度，甚至比解決配電問題更為關鍵。基於 AI 的 IT 機架使用數百個處理器，以迅速處理 AI 發揮最佳效能所需的大量運算。這些處理器需要能在高密度空間內相互通訊。將大部分電源轉換設備移出 IT 機架，使得在更小空間內容納更多處理器成為可能。現在，機架中的每個 IT 托盤皆以 800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 的匯流排電壓作為輸入。接著，托盤內的中間匯流排轉換器會將該電壓轉換，以分配至 IT 托盤上使用。配電電壓可根據所選架構採用 48V、12V 甚至 6V。

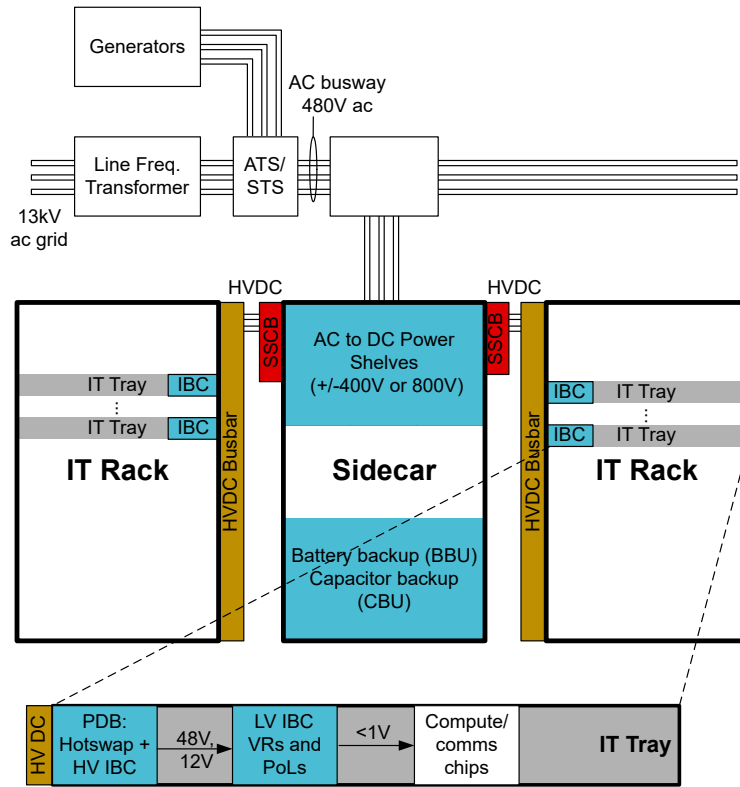


图 4. 第三代 - AI 运算 DC 配电侧装模组

下一步是什麼？

雖然第三代架構在提升配電效率與顯著增加 IT 機架內運算密度方面表現卓越，但這是透過佔用資料中心機房更多空間來實現的。因此，資料中心演進的下一步，是將側裝模組的 AC/DC 電源轉換功能從 IT 機房移入設備間。

图 5 展示了第四代架構的提案。在此架構中，側裝模組容納了 BBU 功能，而 AC/DC 轉換功能則移至固態變壓器 (SST) 中。在第一、第二和第三代架構中，輸入電壓均為電網提供的 13kV 中壓電。該電壓經轉換為三相 480V_{AC} 配電匯流排後，再轉換為 DC 配電匯流排電壓。SST 同時取代了 13kV 變壓器以及 480V_{DC} 至 800V_{DC} (或 ±400V_{DC}) 的電源轉換功能。SST 在單級電源轉換中實現了 PFC 功能、降壓及 DC 轉換。備用發電機現在需連接至中壓節點，或透過 AC/DC 轉換器連接到 SST 的輸出端。最終成果是更高效率的配電網絡，以及 IT 機房內更多可供運算使用的空間。

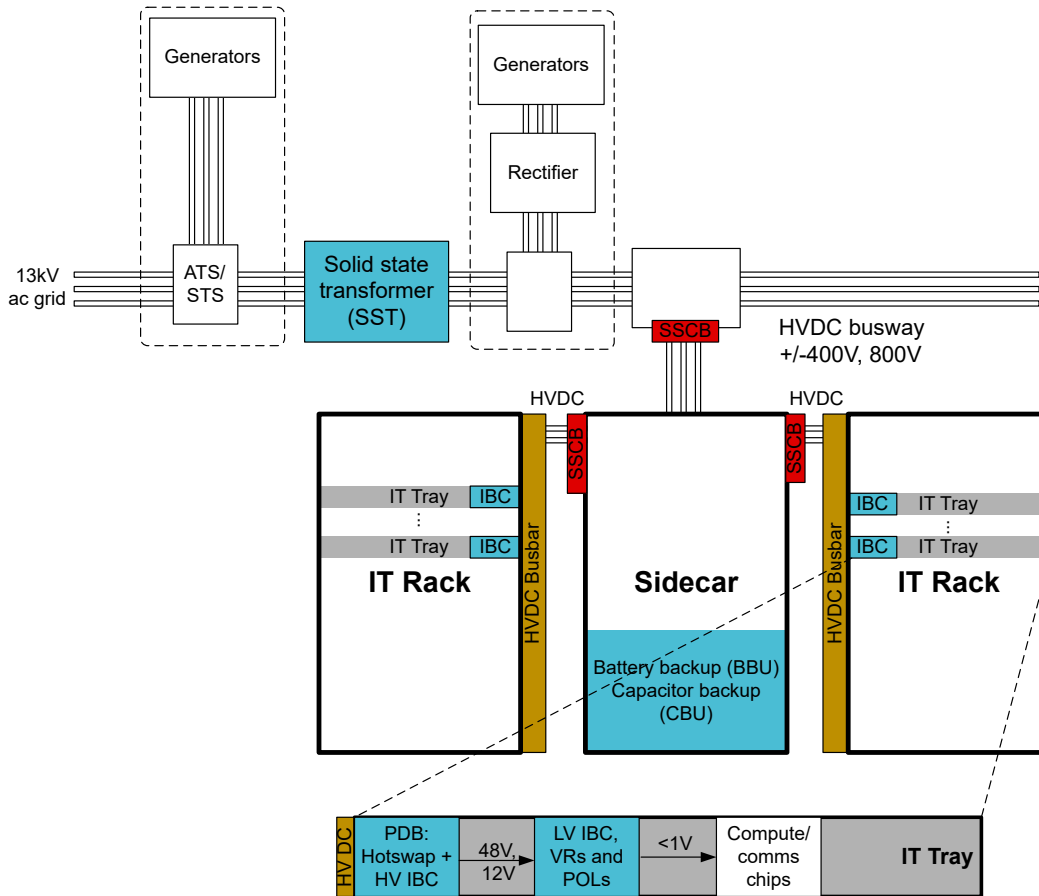


图 5. 第四代 - AI 运算 SST 和 DC 配电

實現這一目標所需的技術

每一代配電架構都需要大量精密的電源轉換功能。這些功能包括 PFC、800V_{DC} 或 ±400V_{DC} 的 DC/DC 轉換、二極體 ORing、電流分載、熱插拔、保護、控制及電力計量等。先進半導體是實現各項功能以最高性能與效率運作的關鍵。例如：

- 實現 PFC 並產生 DC 匯流排電壓需要即時微控制器 [1]。
- 實現如電感器-電感器-電容器 (LLC) 等拓撲與 PFC 功能，需要高效率的寬能隙半導體開關 [2]。
- 實現功率計量、控制與保護功能需要精確的電流與電壓感測 [3]。
- 為系統中各種隔離式開關供電，需要小尺寸、高效率的偏壓電源 [4] 與閘極驅動器 [5]。

結論

AI 正在改變我們與資訊和數據互動的方式。為滿足電力轉換需求，數據中心需要新的電力分配架構。

本系列後續文章將深入探討 PSU、分析儲能方案，並涵蓋中間匯流排轉換器與電壓穩壓器的技術趨勢，以及實現這些功能的關鍵技術與半導體元件。

參考資料

1. Texas Instruments. n.d. [C2000™ 即時微控制器](#)。存取日期：2025 年 7 月 29 日。
2. Texas Instruments. n.d. [氮化鎵 \(GaN\) 功率級](#)。存取日期：2025 年 7 月 29 日。
3. Texas Instruments. n.d. [隔離式 ADC 網頁](#)。存取日期：2025 年 7 月 29 日。
4. Texas Instruments. n.d. [隔離式電源模組 \(整合式變壓器\)](#)。存取日期：2025 年 7 月 29 日。
5. Texas Instruments. n.d. [隔離式閘極驅動器](#)。存取日期：2025 年 7 月 29 日。

其他資源

- 閱讀文章：[伺服器電源設計的五大趨勢](#)。
- 請閱讀數據中心前沿的以下文章：[從電網到閘極：理解電源管理挑戰的框架與高壓 DC 電源：數據中心電源架構的未來](#)。
- 了解數據中心知識的更多資訊：[高壓 DC：AI 數據中心的電源解決方案](#)。
- 請觀看影片[適用於 ML AI 應用的 ±400VDC 機架電源系統](#)。

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 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](#) 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