適用於 800 VDC AI 資料中心架構的 1250 V / 1700 V GaN HEMT

作者：Kamal Varadarajan、Jimmy Liu 和 Chris Lee (Power Integrations)



© 2026 Power Integrations | power.com

簡介

採用 GaN 技術的功率半導體裝置因其優異的材料特性而非常適合高效能電源轉換器。GaN HEMT 憑藉其快速切換能力和低損耗優勢，已廣泛應用於眾多商用電源設計中，涵蓋了廣泛的應用領域。

不同製造商提供的商用裝置通常提供低於 200 V 及 600 V 至 650 V 範圍內的額定電壓。在 650 V 以上，只有少數製造商推出了額定電壓為 900 V 的 GaN HEMT。使用矽基板建構的商用 GaN HEMT 技術很難擴充到 900 V 以上的電壓，因為需要非常厚的緩衝層，這增加了巨大的工序挑戰。

因此，需要額定電壓為 1200 V 及以上的寬頻間隙功率裝置的應用只能使用 SiC 切換開關。然而，與 SiC 相比，GaN 能夠實現更高的切換頻率，並且可以提供一種途徑，滿足 AI 資料中心等應用所需的不斷增加的功率密度，同時保持高效率。Power Integrations 採用其專有 PowiGaN™ 技術建構的 GaN HEMT 具有獨特優勢，能夠在實際裝置中實現極高的額定電壓 (高達 1700 V)，使其成為 1200 V SiC 及更高電壓的現成替代方案，並且極具吸引力。

為了充分運用 GaN 在 800 VDC 匯流排應用中的優勢，650 V GaN 裝置已用於雙串聯堆疊半橋式配置，總共四個 650V GaN 裝置。雖然這種堆疊架構可以在 GaN 能夠達到的高頻率下運作，但它帶來了一些挑戰，包括控制複雜性增加、輸入電壓不平衡導致的可靠性風險、佔位面積增加以及傳導損耗增加，進而導致效率降低和成本上升。相較之下，在此應用中使用額定電壓為 1250 V 的 PowiGaN 切換開關將顯著簡化電源轉換器架構，同時充分運用 GaN 的特性，使其成為理想的高頻率電源切換開關。

利用 1250 V PowiGaN 共源共柵切換開關，電源供應器設計師可以可靠地指定 1000 V 的工作峰值 V_{DS}，同時允許業界標準的 80% 降額。對於工作峰值 V_{DS} 超過 1000 V 且高達 1360 V 的應用，使用 1700 V PowiGaN 共源共柵切換開關允許使用者設計類似的高效能電源供應器，但現在電壓甚至更高。在本文中，我們描述了業界首款額定電壓超過1200 V 的 GaN 電源切換開關的可靠性和穩健性，並說明它們是否適合滿足 NVIDIA 800 VDC AI 資料中心架構的功率密度和 >98% 的效率要求。

Power Integrations 的 1250 V / 1700 V GaN HEMT 共源共柵切換開關

1250 V / 1700 V GaN HEMT 是一種常開、耗盡模式裝置，採用 Power Integrations 專有的 PowiGaN 技術建置。它與低壓矽 MOSFET 串聯，形成共源共柵配置，可實現有效的常關操作，這對於電力電子系統的安全運作相當重要。耗盡型 GaN 裝置被認為具有高度可靠性，因為它們不需要 p 型 GaN 閘極層。因此，它們避免了閾值電壓漂移和相關的不穩定性問題，進而確保了長期穩定性。圖 1 所示為高電壓 GaN HEMT和低壓矽 MOSFET 所構成的共源共柵切換開關的電路圖。圖 2 顯示了 60 mOhm (最大值 @25°C)、1250 V GaN 共源共柵切換開關的顯微照片，其中低壓矽 MOSFET堆疊在 GaN HEMT 頂部。

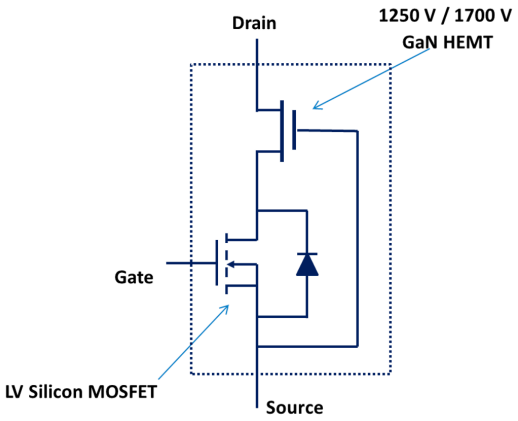


圖 1.高電壓 PowiGaN 共源共柵切換開關電路圖

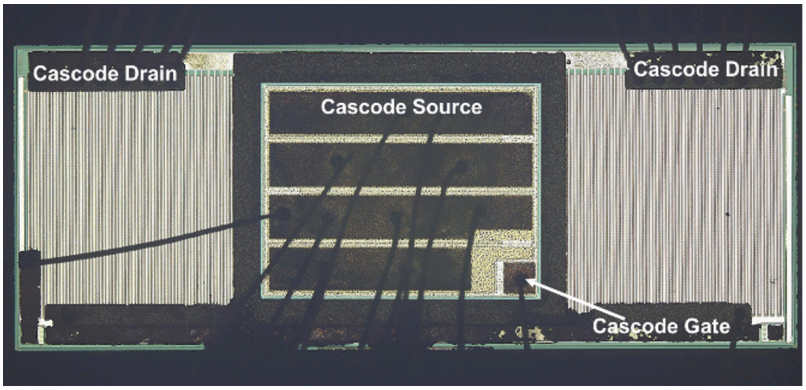


圖 2.60 mOhm、1250 V PowiGaN 共源共柵切換開關的顯微照片

典型的 1250 V 和 1700 V PowiGaN 共源共柵切換開關的關閉狀態特性如圖3 和 4 所示，表現出遠遠超出其額定電壓的穩定漏電行為，確保了出色的暫態過壓能力。與類似額定值的矽或 SiC 裝置相比，這顯示出顯著的安全餘裕。

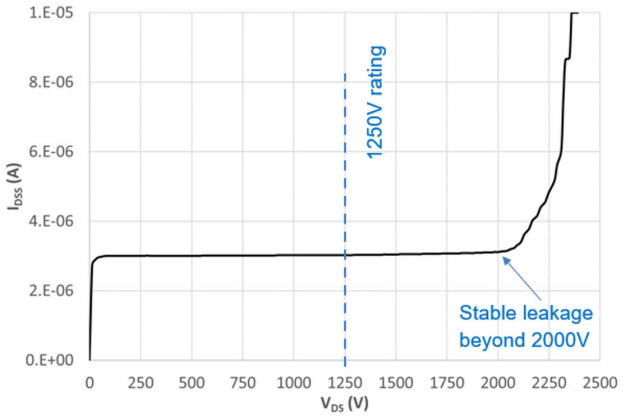


圖 3.1250 V PowiGaN 共源共柵切換開關的典型關閉狀態特性

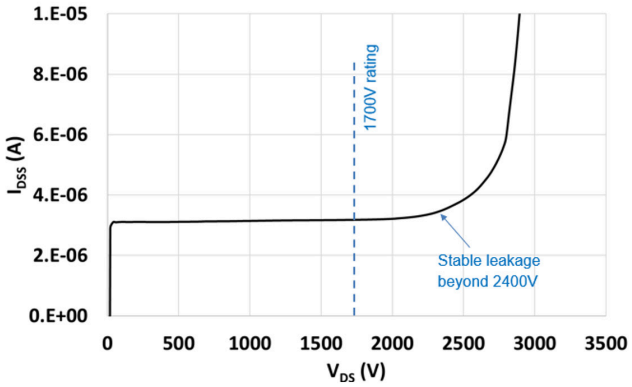


圖 4.1700 V PowiGaN 共源共柵切換開關的典型關閉狀態特性

確保現場可靠性

雖然具有良好的電氣特性很重要，但功率裝置還必須能夠滿足並超越業界標準的可靠性鑑定要求，以確保現場可靠運作。在本節中，我們將分享在 1250 V GaN HEMT 功率轉換應用鑑定過程中執行的關鍵高電壓可靠性應力評估結果，該評估涵蓋靜態和動態條件。

A. 高溫反向偏壓 (HTRB)

高溫反向偏壓 (HTRB) 是一種關閉狀態可靠性應力試驗，用於評估功率裝置在高汲源極偏壓下的長期穩定性，旨在加速長時間高電場下的熱啟動故障機制。1250 V GaN 共源共柵切換開關的 HTRB 應力試驗在 150°C 的環境中進行，並以 1000 V (1250 V 額定值的 80%) 的關閉狀態 VDS 進行 1000 小時的應力試驗，結果符合 JEDEC HTRB 準則JEP198 中規定的規範。如圖 5 所示，觀察到出色的裝置漏電穩定性，驗證了其適用於高電壓高可靠性應用。

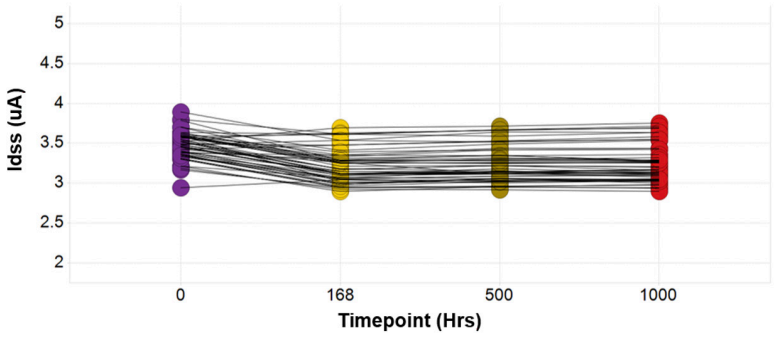


圖 5.在 1000 V / 150°C 的 1000 小時 HTRB 應力下保持穩定的關閉狀態汲極洩漏

Voltage/Temperature	80 °C	100 °C	120 °C

2100 V		✓	
2150 V	✓	✓	✓
2200 V		✓	

表 1關閉狀態加速評估條件

除了上述的 HTRB 鑑定試驗外，還透過在加速 V_{DS} 條件 (2100 V 至 2200 V) 和多個溫度 (80°C 至 120°C) 下，對大量單元進行試驗來擷取固有關閉狀態故障率，如表 1 所示。

根據本組實驗所獲得的故障時間韋伯分配，使用指數模型擷取電壓加速因子，透過 Arrhenious 模型擷取溫度加速因子。擷取的模型預測在 1000 V/100°C 的條件下運作 15,000 多年後的累積故障率為 1 ppm，這顯示 1250 V GaN 共源共柵電源切換開關具有顯著的內建可靠性餘裕 (圖 6)。

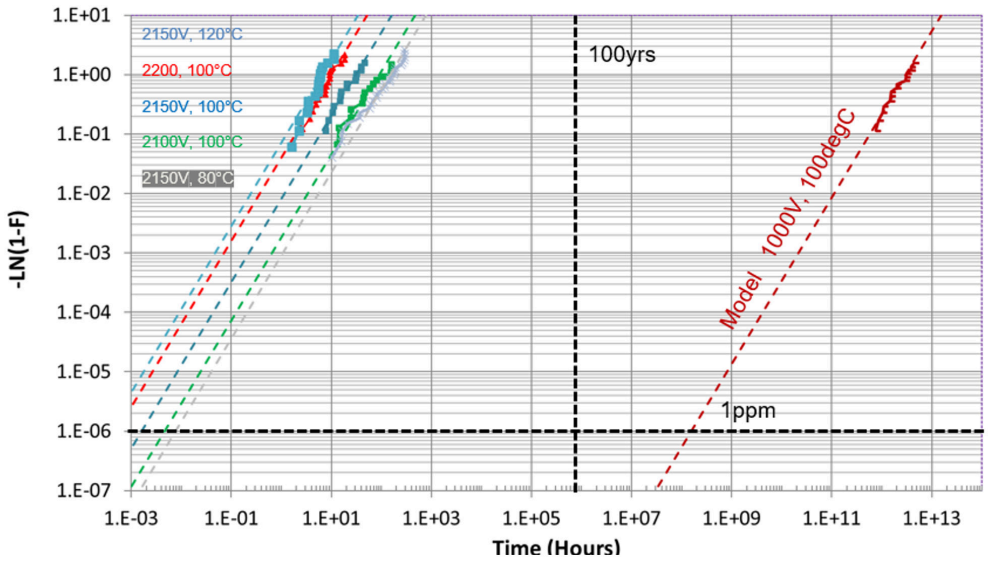


圖 6.韋伯分配表示在多個加速應力條件下的失效時間，以及 1000 V / 100°C 下的預期分配

B. 高電壓高濕高溫反向偏壓 (HV-H3TRB)

對於許多高可靠性部署而言，僅透過 HTRB 的關閉狀態可靠性鑑定應力並不足夠。產品可能經常暴露在惡劣的外部環境條件下，在極端關鍵任務應用中連續或長時間運作。對於這種應用，通過 HV-H3TRB 試驗相當重要，此試驗採用受控制的高濕度環境作為原始 HTRB 試驗的附加應力來源。此應力試驗包含因濕氣滲透而導致的其他故障模式，並且是對裝置所有層面的試驗，包括鈍化層、主動和終端設計以及底層結構。

1250 V GaN 共源共柵切換開關的 HV-H3TRB 應力試驗在 85°C 的環境溫度下進行，環境相對濕度 (RH) 為 85%，關閉狀態 V_{DS} 為 1000 V，持續 1000 小時，符合 JEDEC 標準 JESD22-A101。本次應力試驗獲得了乾淨的通過結果，其關閉狀態洩漏穩定性與 HTRB 期間相同，如圖 5 所示。

C. 動態高溫工作壽命 (DHTOL)

最初延遲 GaN HEMT 商業化推廣的主要問題之一是其在高電壓應用中切換時的可靠性，與 DC 條件相比，裝置的導通電阻在開啟後立即增加。這種現象稱為動態 $R_{DS(ON)}$，歸因於高電場強度下裝置內的電荷捕捉效應。這個問題已經採用各種技術來解決，包括外延結構工程和精心最佳化的工序技術。

PI 的 1250 V GaN 共源共柵切換開關的切換可靠性在符合 JEDEC DHTOL 準則 JEP180 的客製化試驗台上進行了評估，該試驗台能夠在 125°C 下對多個並聯單元進行評估。根據準則中所述的切換軌跡，選擇了最嚴格的工作條件：1000 V 下的硬切換開啟和關閉。對於 GaN 裝置，高電壓切換期間的動態 $R_{DS(ON)}$ 尤其令人感興趣。設計不當的GaN HEMT 裝置可能會因額外的電子捕捉而在高電壓切換轉換期間表現出 $R_{DS(ON)}$ 的顯著增加，這可能會對轉換器效率產生不利影響，甚至導致嚴重故障。

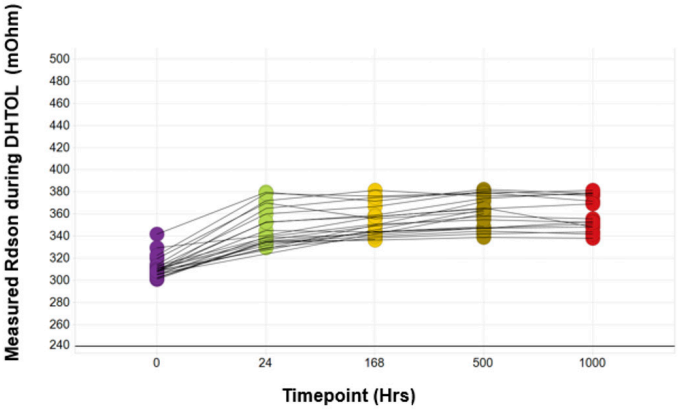


圖 7.在 1000 小時 DHTOL 期間觀察到穩定的 $R_{DS(ON)}$，且偏移最小 (<20%)

在 1000 V/125°C 的 1000 小時 DHTOL 應力過程中監測的 1250 V GaN 共源共柵的 $R_{DS(ON)}$ 從最早的時間點開始顯示出穩定的效能 (圖 7)，最小偏移量小於 20%，並且與在類似硬切換條件下試驗的最先進 HEMT 650 HEMT。這項結果表明，GaN HEMT 可以擴充到 >1200 V，而不會對效能 (包括關鍵的硬切換能力) 產生任何影響，並且證明了其穩健性，可以滿足所有潛在的高可靠性應用。

NVIDIA 800 VDC AI 資料中心架構的使用案例

A. HVDC AI 資料中心架構背景

越來越明朗的是，高電壓直流 (HVDC) 配電將取代 AI 資料中心的傳統 54 V DC 匯流排架構。其中一項主要提案來自 Google、Meta 和 Microsoft 發起的開放運算計畫 (OCP)，該計畫定義了 800 VDC 電源系統。這種新架構改變了電力傳輸方式，從傳統的每機架 100 kW 以下擴充到每機架 1 MW，同時實現了更有效率的電力轉換和更高的功率密度。

NVIDIA 也為下一代 AI 資料中心提出了 800 VDC 架構。透過採用直接 800 VDC 輸入，運算機架可以更有效率地接收電力，而無需仰賴傳統的整合式 AC-DC PSU 級。相反地，機架採用雙導體 800 VDC 饋電，並使用機架內的高電壓隔離DC-DC 轉換器為 xPU 子系統供電。這種方法可消除機架級 AC-DC 轉換區塊，釋放出空間以容納額外的運算資源並改善了熱管理。與傳統的 AC-DC 架構相比，直接 800 VDC 輸入簡化了機架設計，同時大幅提高了效能。

在裝置層面，1250 V 和 1700 V PowiGaN 技術可以在實現這項轉變中發揮關鍵作用。該技術結合了簡化的架構、快速的切換速度和強大的電壓能力，使其成為新興 800 VDC AI 資料中心架構中高效能、高密度 HVDC 轉換的理想選擇。本節將說明 1250 V / 1700 V PowiGaN 與 1) 堆疊 650 V e-mode GaN; 和 2) 1200 V SiC MOS 相比的價值主張。

B. 1250 V PowiGaN 與 650 V e-mode GaN 的比較

圖 8 展示了 650 V e-mode GaN 和 1250 V PowiGaN 之間的 800 VDC 輸入和 12.5 V 輸出固定比率 LLC 架構比較。由於採用了快速切換的 GaN 裝置，這兩種解決方案都可以在 800 VDC 輸入下以 500 kHz 以上的高頻率運作。對於 650V e-mode GaN，需要堆疊 LLC 轉換器來承受 800 VDC 輸入。在一次側，此架構採用兩個串聯堆疊半橋 (總共四個 650V e-mode GaN 切換開關)。 在二次側，輸出並聯連接，以便每個半橋支援總輸出功率的一半。然而，這種堆疊架構帶來了幾個挑戰：

- **輸入電壓不平衡：**必須小心管理正常運作期間的輸入電壓不平衡。如果半橋之間出現不平衡，GaN 裝置兩端的應力電壓可能會超過預期的 ~400 V。在這種較高的電壓應力下，由於 HEMT 的 2DEG 通道內的電流捕捉效應，動態 $R_{DS(ON)}$ 退化變得更加明顯。這些限制凸顯了在 800 VDC 輸入系統的堆疊配置中使用 650 V e-mode GaN 的可靠性和效率風險。

- **複雜的驅動設計：**堆疊架構也會增加設計複雜性，尤其是在閘極驅動器電路中。每個半橋都需要專用的高電壓側驅動器和隔離式偏壓電源，這進一步增加了系統成本、空間和設計開銷。

- **效率較低且成本較高：**使用相同的 $R_{DS(ON)}$ GaN 裝置，與 1250 V PowiGaN 單半橋架構相比，堆疊架構會產生更高的傳導損耗。這表示 1250 V PowiGaN 設計可使用 $R_{DS(ON)}$ 高 2 倍的裝置，同時仍然可以實現相同的整體效率和損耗特性。

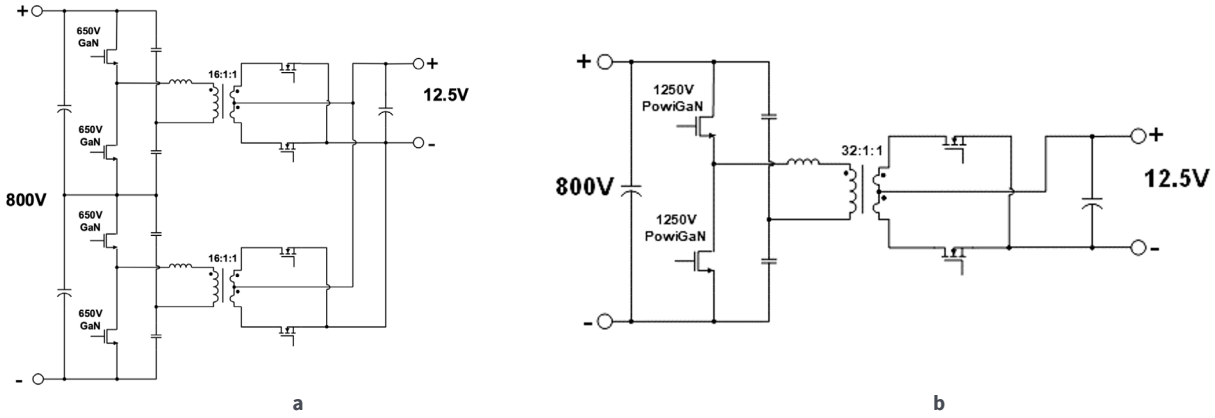


圖 8.(a) 採用 650 V e-mode GaN 技術的堆疊半橋 LLC；(b) 採用 1250 V PowiGaN 技術的單半橋 LLC

表 2 總結了半橋 LLC 應用中 650 V e-mode GaN 和 1250 V PowiGaN 之間的差異，並說明採用 1250 V PowiGaN 的單半橋方法對於高密度 800 VDC 電源架構的明顯優勢。

	採用 650 V e-mode GaN 的堆疊半橋 LLC	採用 1250 V PowiGaN 的單半橋 LLC
輸入電容不平衡	是	否
閘極驅動器	4 個驅動器，其中 3 個為隔離驅動器	2 個驅動器，其中 1 個為隔離驅動器
驅動器的隔離式偏壓電源	3 個	1 個
具有相同 GaN $R_{DS(ON)}$ 的傳導損耗	損耗增加 2 倍	—
所需 GaN $R_{DS(ON)}$ 具有相同的效率和	—	$R_{DS(ON)}$ 提高 2 倍

表 650 V e-mode GaN 與 1250 V PowiGaN 的半橋 LLC 比較

C. 1250 V PowiGaN 與 1200 V SiC MOSFET 在 1 MHz LLC 操作的比較

為了實現高功率密度，以高頻率操作 LLC 轉換器相當重要，並且最大工作頻率由幾個關鍵參數決定。圖 9 顯示了停滯時間轉換期間的 LLC 等效電路和波形。為了實現開啟的 ZVS，應在每個停滯時間內使用此峰值磁化電流 I_{lm_pk} 對電晶體的寄生輸出電容進行完全放電/充電。然而，磁化電流將在停滯時間內對一次側線圈產生額外的循環損失。因此，最小化磁化電流 I_{lm_pk} 是提高 LLC 轉換器頻率和效率的目標。

為了實現更高的頻率，功率切換開關應具有較小的 $C_{o(tr)}$ 值 (與時間相關的有效輸出電容)，或稱為 Q_{oss} (輸出電荷)，其為 $C_{o(tr)} \cdot V_{dc}$ 的乘積。半橋 LLC 的 ZVS 實現條件的最小停滯時間 $t_{deadmin}$ 可由公式 (1) 取得。

$$(1) \quad t_{deadmin} = 8 \cdot C_{o(tr)} \cdot L_m \cdot f_s$$

其中，L_m 為主變壓器的磁化電感，f_s 為切換頻率。

從公式 (1) 可知，裝置參數 $C_{o(tr)}$ 描述了被動轉換汲源極間電壓所需的輸出電容，它是高效率、高密度 LLC 轉換器的關鍵參數。對於給定的 L_m 和 $t_{deadmin}$，有效 $C_{o(tr)}$ 值越低，則可在 ZVS 條件下使用更高的切換頻率 f_s，進而達到更高的密度。

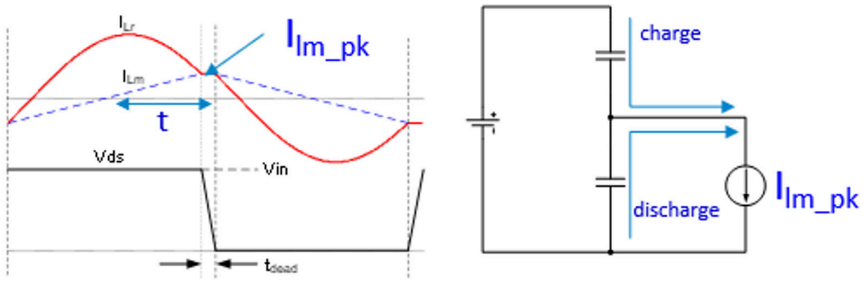


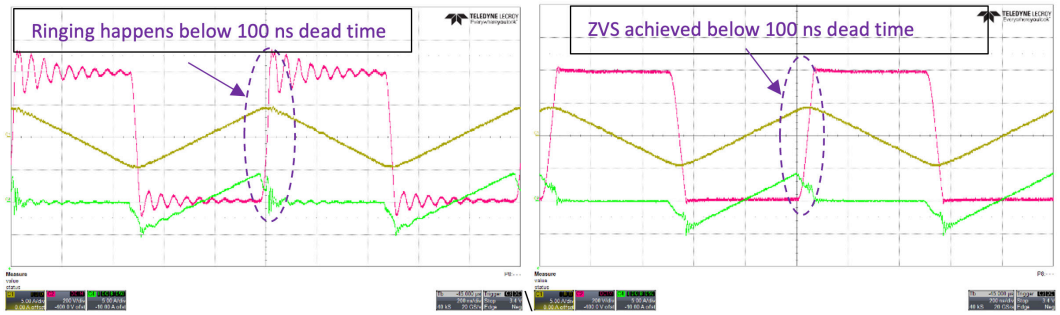
圖 9.停滯時間轉換期間半橋 LLC 等效電路的一次側電流和電壓波形

其他影響切換頻率的關鍵裝置參數是總閘極電荷 Q_g 和關閉延遲時間 $T_{d(off)}$。簡言之，Q_{oss}、Q_g 和 $T_{d(off)}$ 的值越低，針對效率和功率密度設計的 LLC 轉換器的效能就越好。表 3 顯示了 1250 V PowiGaN 與 1200 V SiC MOS 的比較。結論很明確，與具有相似 $R_{DS(ON)}$ 的 1200 V SiC MOS 相比，1250 V PowiGaN 可以實現更高頻率的 LLC。

	SiC MOS	PowiGaN	PowiGaN 價值主張
額定電壓 (V)	1200	1250	更高的 BV
$R_{DS(ON)}$ mΩ 25 °C	60	60	相同 RDS(ON)
Q_{oss} @ 800 V; nC	180	140	高頻率
LLC iQ_g; nC	106	45	低驅動損耗
$T_{d(off)}$; ns	48	15	低關閉損耗

表 31200 V SiC MOS 與 1250 V PowiGaN 的參數比較

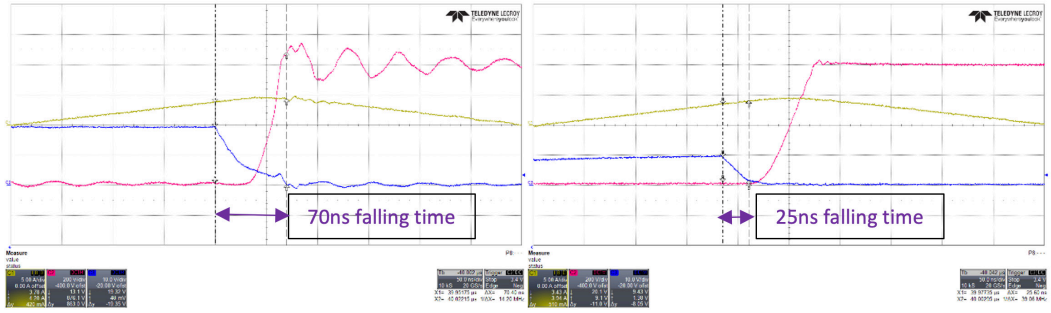
圖 10 驗證了 1250 V、60 mΩ PowiGaN 裝置的最大切換頻率，展示了 800 VDC 輸入、1 MHz 半橋 LC 諧振波形，並與同級最佳的 1200 V、60 mΩ SiC MOS 進行了比較。結果顯示，1250 V PowiGaN 技術實現了 1 MHz Z_{VS} 操作，轉換停滯時間小於 100 ns。相較之下，1200 V SiC MOS 無法透過硬切換換向實現 1 MHz 時的 ZVS，並且在溫度較高時會出現明顯的振盪。圖 11 提供了在相同 $R_{G(off)}$=2 Ω 的情況下關閉的放大 V_{GS} 和 V_{DS} 波形：SiC MOS 顯示出明顯更長的 VGS下降時間 (比 PowiGaN 長約 3 倍的下降時間)，進而有效地將其實際工作頻率限制在 500 kHz 以下。



a b

圖 10.(a) 1200 V 60 mΩ SiC MOS 1 MHz 諧振波形；(b) 1250 V 60 mΩ PowiGaN 1 MHz 諧振波形 (200ns / div)

(綠色：低側 I_D 電流 5A / div；紅色：半橋切換節點 V_{DS} 電壓 200 V / div；黃色：磁化電流 5A / div)



a b

圖 11.關閉期間的 VGS 和 VDS 波形放大圖 (a) 1200 V 60 mΩ SiC MOS 1 MHz 諧振波形；(b) 1250 V 60 mΩ PowiGaN 1 MHz 諧振波形 (50ns / div)

(藍色：閘極到源極 電壓 10 V/div；紅色：半橋切換節點 V_{DS} 電壓 200 V/div；黃色：磁化電流 5A / div)

D.適用於 HVDC AI 資料中心的 1700 V PowiGaN

Power Integrations 於 2024 年推出了業界首款採用 1700 V PowiGaN 的產品 IMX2353F (25°C 時為 520 mΩ)，可輕鬆支援 1000 VDC 標準輸入電壓，同時完美匹配 HVDC AI 資料中心應用的輔助電源需求。如圖 12 所示，IMX2353F 屬於 InnoMux™2-EP 系列，該系列將一次側和二次側控制器、保護裝置、感測元件和安全額定回授機制 (FluxLink™) 整合到具有 1700 V PowiGaN 的單一 IC 中。透過獨立調節和保護每個輸出，它消除了多個下游轉換階段。

IMX2353F 具有從一到三個調節輸出電壓的彈性，並且專門在 DCM SR-ZVS 模式下運作，在一次側切換開關中具有零電壓切換 (ZVS)。此功能對於 800 VDC 至 1000 VDC 輸入範圍內的高電壓應用相當有幫助，可減少開啟和整體熱過程中的寄生電容放電損耗。

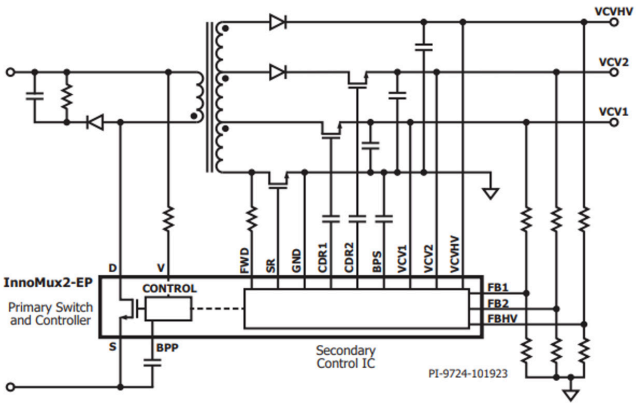


圖 12.IMX2353F 的典型應用

圖 13 顯示了使用 IMX2353F 和 1000 V 輸入的 60 W 參考設計的波形與熱特性。由於採用 1700 V PowiGaN 和獨特的SR-ZVS 控制，在 1000 V 輸入和全功率下，溫度上升僅為 22.3°C。它有助於實現 HVDC AI 資料中心的小尺寸和低溫輔助電源供應器；本裝置特別適合 800 VDC PSU 中流行的 48 V 風扇實作，同時也需要 12 V 系統輸出。

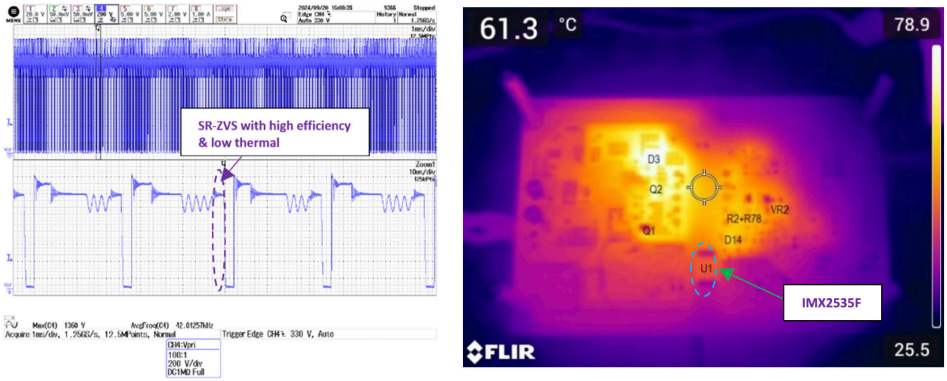


圖 13.採用 IMX2353F 和 1000 V 輸入的 60 W 參考設計

結論

憑藉 Power Integrations 專有的 PowiGaN 技術，可實現額定電壓超過 1200 V 的高可靠性 GaN HEMT。這些業界首創的 1250 V GaN 切換開關可協助設計人員為 NVIDIA 800 VDC AI 資料中心架構建構高密度、高效率的電源供應器，與採用 1200 V SiC 或 650 V GaN 堆疊架構的解決方案相比，其效能顯著提升。

展望未來，由於現代資料中心每個機架的電力需求不斷增加，HVDC 系統的趨勢是朝向 800 VDC 以上的電壓發展。這種轉變為主功率級高可靠性 1700 V PowiGaN 裝置開闢了新的機會，其較低的開啟狀態電阻可提供更高的效率和功率密度。未來正以前所未有的速度到來。

進一步閱讀清單：

K. Varadarajan et al. “ Reliability Qualification of 1250 V Lateral GaN HEMTs for High Reliability Industrial Applications,” IEEE International Reliability Physics Symposium proceeding, 3A2.1-3A2.6 (2025)

K. Varadarajan et al. “Reaching Beyond 1200 V: Lateral GaN HEMTs for High-Reliability EV and Industrial Applications” PCIM Europe proceeding, 1593-1598 (2024)

K. Murukesan et al. “State of the Art 1.7kV Lateral GaN HEMTs, an Alternative to SiC”, IEEE Applied Power Electronics Conference proceeding, 180-184 (2025)

For more information,
visit **power.com**™

power integrations

© 2026 Power Integrations | Power Integrations、Power Integrations 標誌、power.com、PowiGaN、InnoMux 和 FluxLink 均為 Power Integrations, Inc. 在美國及/或其他國家/地區的商標或註冊商標。NVIDIA、Google、Microsoft 和 Meta 均為其各自所有者的商標。

101326