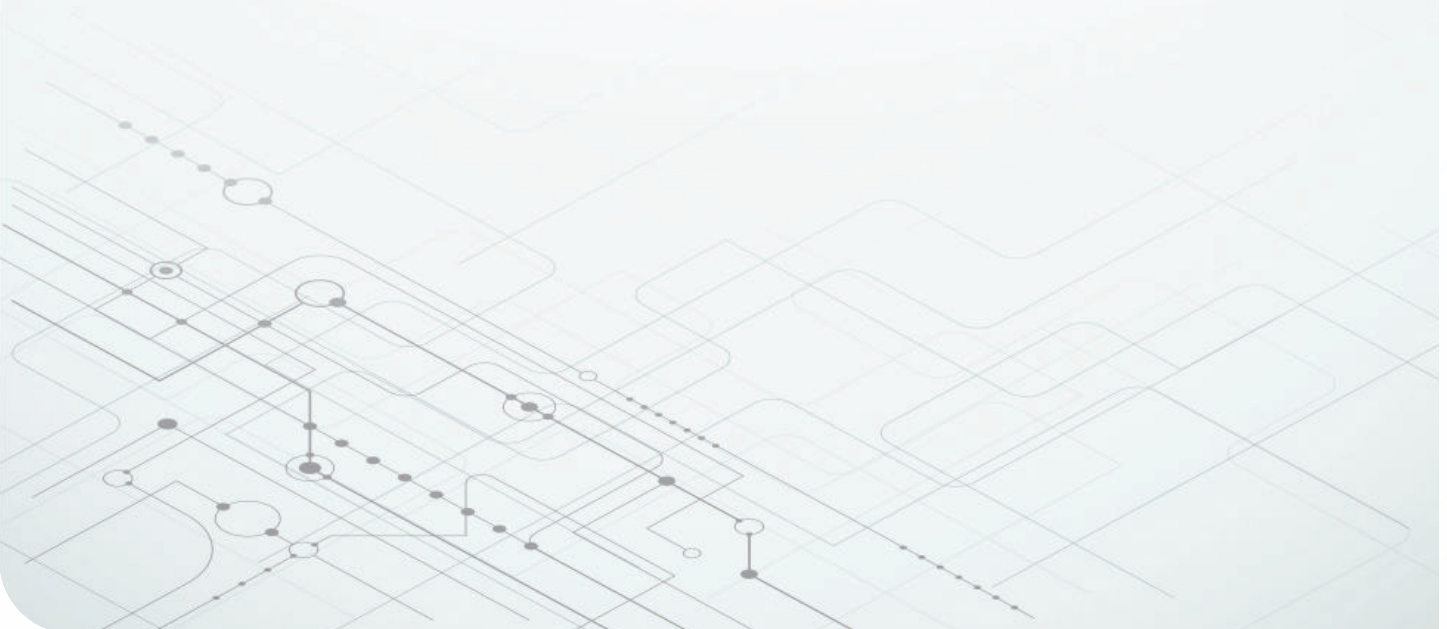


簡化高壓系統的電源轉換



Sheng-yang Yu
System Manager
Power Design Services



在高壓應用中提供有效率的電源轉換時，面臨許多挑戰。但元件、拓撲和系統級創新可大幅提升高壓電源轉換系統的效率與密度，同時可精簡設計。

摘要

本白皮書主要探討有效率的高壓電源轉換所面對的挑戰，並提供元件、拓撲與系統級創新範例，協助簡化汽車與工業應用中的電源設計。



1

透過元件創新發揮最佳寬能隙 FET 性能

寬能隙場效應電晶體 (FET) 為金屬氧化半導體場效應電晶體 (MOSFET) 提供更有效率的替代方案，但需要像隔離式閘極驅動器和數位控制器等具專業配備的裝置，才能發揮最佳性能。



2

透過拓撲創新獲得最大功率密度

選擇正確的拓撲結構，可以大幅影響高壓電源設計的功率密度和效率。



3

以系統級創新實現超高效率目標

系統架構創新與控制系統創新，可幫助設計人員實現更高效率與功率密度。

電源設計人員工作繁忙。他們不僅需要讓功率位準不斷增長，也需要找出一種創意方法來不斷提高電源供應的效率和功率密度。在高電壓環境下，這些挑戰變得更加顯著。

要在高壓系統中實現高效率的電源轉換，需要具備對高壓元件、電氣與磁性電路建模技術的深入知識，了解功能或安全隔離的絕緣要求、電磁相容性專業知識、電源轉換器控制技術等。

簡化高壓電源設計不僅是一項艱鉅的任務，但也不是不可能的任務。

為何高電壓？

隨著全球電氣化趨勢持續增強，在更高功率位準下進行有效率的能源傳輸，變成現今電力電子系統的重要考量。電阻損耗 (I^2R) 是限制電源供應器提供多少電源的核心因素。為了提升系統效率，增加用於傳輸與提供電流所需的電壓，如此可減少相同功率位準所需的電流，並有助於將熱量損失降到最低。

現今在電力網路中廣泛應用的幾個高壓系統範例，包括家用 AC 配電系統、電信與伺服器電源系統、再生能源系統的 DC 微電網、能源儲存系統，以及電動車 (EV) 車載與車外充電器。舉例來說，電動車電池目前為 400 V，但逐漸趨向於 800 V，以實現更即時的電力傳輸至牽引變流器，進而提升加速性能。

雖然在較高電壓下運作可為電源轉換帶來系統效率優勢，但實現安全的人機介面、適當的電隔離和絕緣，至關重要。此外，封閉迴路系統通常需要跨隔離邊界進行訊號通訊。再加上這個拓撲選擇、磁性電路設計、電磁干擾考量、運作模式、溫度管理與佈線及控制最佳化，您也開始了解使用高壓系統時的部分重要設計挑戰。整體而言，從元件創新、拓撲創新和系統級創新這三個關鍵領域的創新，將在簡化設計的同時，提升高壓電源轉換系統的效率 and 密度。

透過元件創新發揮最佳寬能隙 FET 性能

碳化矽 (SiC) MOSFET 或氮化鎵 (GaN) FET 等寬能隙 FET，可提供矽 MOSFET 電晶體更高效的替代方案。寬能隙 FET 在與矽 MOSFET 電晶體相同的電壓電平下，具有極低甚至沒有反向復原電荷 (Q_{rr})，並且具有較低的導通電阻，如 [圖 1](#) 所示。

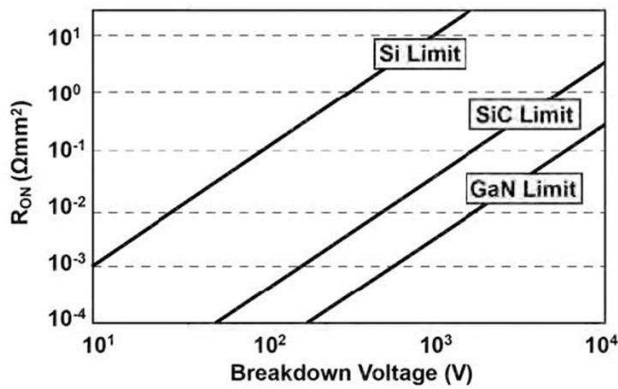


圖 1. 理論上的導通電阻與阻斷電壓。

此外，在寬能隙 FET 中，包括閘極電荷 (Q_g) 及輸出電容 (C_{oss}) 在內的幾乎其他所有寄生，都比矽 MOSFET 電晶體低得多，因此切換速度更快：與超接面矽 MOSFET 電晶體相比，電壓轉換率超過 150-V/ns 對比於電壓轉換率低於 80-V/ns。由於切換速度較快，開啟或關閉電源開關所需的時間較短，且可減少切換損耗。

尋找合適的閘極驅動器

因其啟用的電氣特性和性能之故，切換至寬能隙技術需要經過深思熟慮的方法和仔細搭配的元件選擇，所帶來的挑戰與使用矽晶設計完全不同。為了進一步減少切換損耗，寬能隙 FET 需要能夠快速充電與放電的合適閘極驅動器，因為傳統矽 MOSFET 電晶體閘極驅動器可能無法提供適當調節的電壓，或是無法在寬能隙設計中處理高共模電壓瞬態。

如 圖 2 所示，當發生切換事件時，切換節點上的電壓變化會產生電流，流經驅動器的寄生電容。如果驅動器沒有足夠的共模瞬態抗擾性 (CMTI)，則共模電流可能會導致閘極驅動器故障，如 圖 3 中所示。

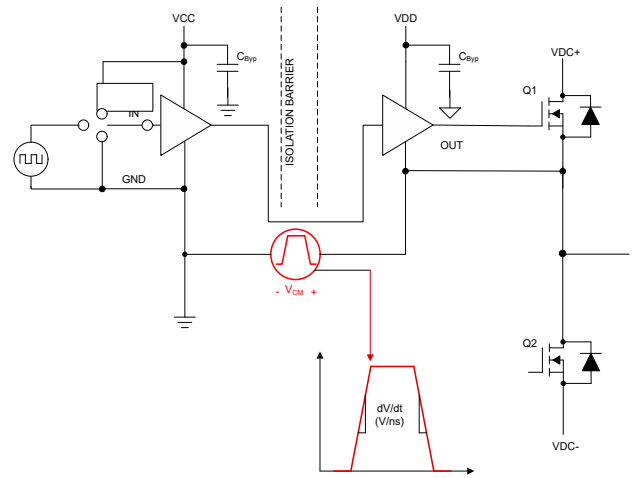


圖 2. 切換事件造成共模電流。

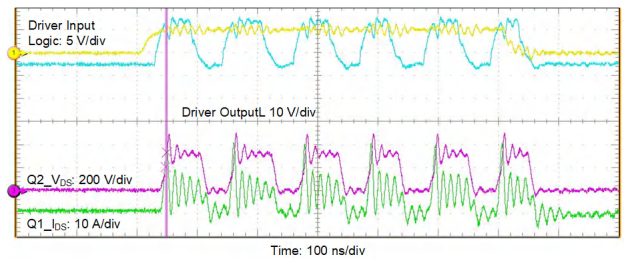


圖 3. 閘極驅動器 CMTI 故障的範例。

為了克服閘極驅動器的挑戰並解開 CMTI 疑慮，工程師可使用配備米勒箝位技術的全新閘極驅動器，高 CMTI 額定值和可調式電壓轉換率功能，避免擊穿或閘極驅動器故障。TI 的 **UCC5880-Q1** 強化型隔離式閘極驅動器具有高達 20 A 的即時可變閘極驅動強度，而且此功能可讓您提高功率密度，降低系統設計複雜度和成本，同時還能達成安全與性能目標。TI 的 300-kW DC/AC **高功率、高性能車用 SiC 牽引變流器參考設計**，展示如何在不同負載條件下調整行駛速度，以平衡效率與此及所探討的挑戰。

更快的切換代表更低的切換損耗，但也可能造成非必要的電壓振鈴及共模雜訊問題。圖 4 展示具有離散式閘極驅動器的 GaN FET。兩部裝置本身不僅具有寄生電感，同時也具有連接銅的印刷電路板 (PCB) 走線電感。驅動迴路的總電感可減緩 GaN FET V_{DS} 轉換速度，進而限制 GaN FET 能夠減少的切換損耗。這就是如 **LMG3526R030** 等 TI GaN FET (請參閱 圖 5) 會將閘極驅動器整合至相同封裝中的原因。在整合閘極驅動器後，就不會產生 PCB 電感 (L_{g_pcb} 和 L_{s_pcb})。另外，也為閘極驅動迴路 (最小化 L_{CS})

建立源極接線 (Kelvin Source) 連接；因此 TI GaN FET 可在高瞬態電壓下切換，進而將切換損失降到最低。

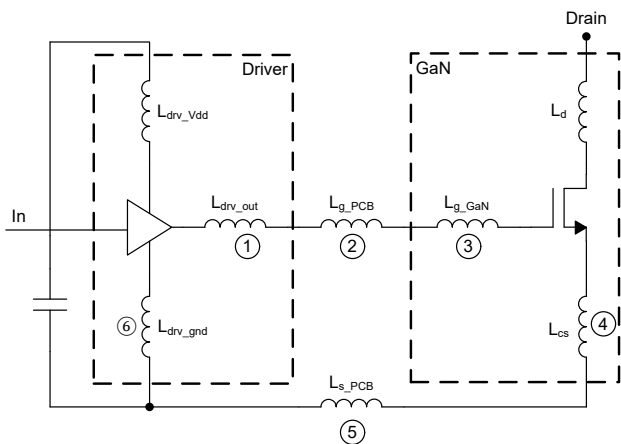


圖 4. 附帶離散式閘極驅動器的 GaN FET 與迴路上的寄生電感。

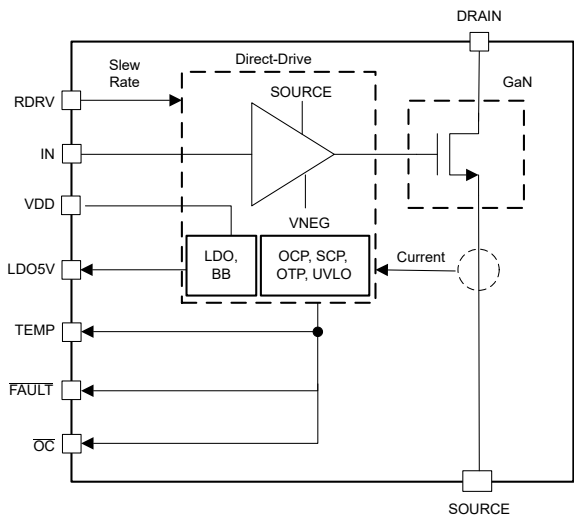


圖 5. 簡化 LMG3526R030 方塊圖。

選擇合適的控制器

在現今的高壓系統中，磁性元件佔據整個功率轉換階段的大部分。若要縮小磁性元件的尺寸，您必須提高運作頻率。以下是專屬數位控制的要求，可管理高壓系統的高性能需求。這些控制器必須即時運作，準確地測量系統參數 (例如電壓、電流和溫度)；運用控制演算法計算輸出命令；並支援提升功率密度所需的高頻率。即時控制的關鍵是將感測、處理與控制功能的時間減到最少。更優異的即時訊號鍵性能可帶來更快速的瞬態回應、更穩定且精準的功率轉換，以及更高的功率密度。

即時控制的其中一個挑戰是限制循環，也就是脈衝寬度調變 (PWM) 輸出無法在精確運算解決方案上實際收斂至控制定律。這會導致 PWM 輸出在真實解決方案周圍振盪，進而造成控制系統不穩定。TI 的 C2000™ 即時 MCU 等微控制器 (MCU) 上的高解析度 PWM (HRPWM) 模組，能夠以 150-ps 的增量調變 PWM 邊緣。這比基於系統時脈速率的傳統 PWM 建立技術強大六十倍 (請參閱 圖 6)，並且可以在 PWM 邊緣位置實現更高的準確度。波形的週期、與其互補的相位關係以及死區插入時間，都有助於實現這種高解析度技術。

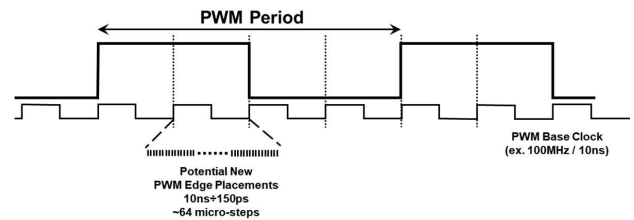


圖 6. HRPWM 功能與傳統 PWM 產生方法。

另一個即時控制挑戰，是三階變流器拓撲對獨特故障保護的需求。三階變流器不需要立即在二階變流器中立即切換所有 FET，就三階變流器而言，您必須維持正確的關閉順序以避免損壞 FET。以往，有些設計人員使用現場可編程邏輯閘陣列 (FPGA) 或複雜的可編程邏輯裝置 (CPLD) 等外部硬體電路來達到此層級的防護，但這些電路會增加系統成本與開發時間。

為解決此問題，C2000 可配置邏輯區塊提供了一種透過軟體，在晶片內建立自訂邏輯的機制，提供更簡單的選項來取代外部 FPGA 或 CPLD 所實現的功能，並有助於縮減系統成本和開發時間。

寬能隙裝置可幫助大幅提升效率與功率密度：理論上。若沒有隔離式閘極驅動器及數位控制器等其他元件創新，您的設計將無法完全實現效率的提升。

透過拓撲創新獲得最大功率密度

除了元件級創新外，拓撲創新也可協助您簡化高壓系統的電源轉換。AC/DC 整流器是有關寬能隙技術如何提升知名拓撲的絕佳範例，可提升功率密度並減輕設計重量。以往工程師是使用附帶電容器的橋接二極體整流器將 AC 電壓整流為 DC 電壓，如 圖 7 所示。

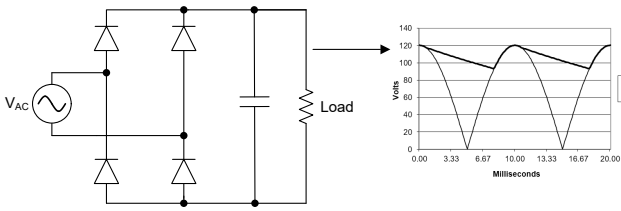


圖 7. 全橋整流器。

此類整流器的功率因數一般低於 0.5，視輸出電容器和負載的總阻抗而定。這並不具有能源效率，因為這類設計會產生太多未使用的功率 (無功功率)。

為解決低功率因數問題，工程師提出有功功率因數校正 (PFC) 電路。圖 8 顯示升壓 PFC 電路，通常採用通用 AC 電壓 (90 V_{AC} 至 264 V_{AC})，並在輸出時將電壓升壓至調節的 400-V 電壓。透過輸入電壓感測，控制器會調節電感器電流，並遵循 AC 正弦形狀，以獲得幾乎均一的功率因數 (0.99)。

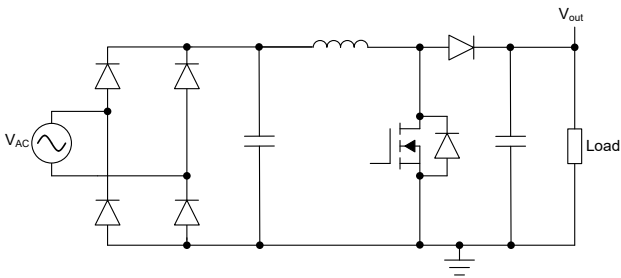


圖 8. 將 PFC 電路升壓。

這種升壓 PFC 整流器類型能夠以超接面矽晶 MOSFET 和 SiC 二極體實現真正的高效率 (>98%)。

在千瓦等級高壓系統中，PFC 整流器升壓中的全橋式二極體整流器消耗了超過 1% 的整體效率損失。舉例來說，2-kW 整流器的全橋式二極體整流器損耗預期超過 20-W。從單一裝置消散 20-W 損耗非常困難。為了減少全橋式二極體整流器的損耗，圖 9 中顯示的圖騰柱免橋接 PFC 是較佳的替代方案。由於整流器功能與升壓轉換器整合，且只有兩個額外的 MOSFET (而非四個二極體)，因此總整流器損耗 (附帶兩個低頻 FET) 遠低於原始橋接整流器範例。

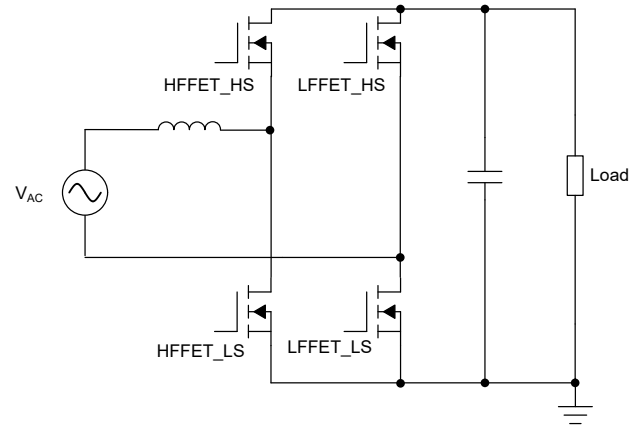


圖 9. 圖騰柱免橋接的 PFC 電路。

持續傳導模式 (CCM) 圖騰柱免橋接的 PFC 是一種廣泛應用在高壓整流器中的硬切換轉換器。因此，如果在圖騰柱免橋接的 PFC 上套用矽晶 MOSFET，矽晶 MOSFET 將遭受 Q_{rr} 所造成的高切換損失。如圖 10 中所示，在左上方 MOSFET 本體二極體電流傳導之後， Q_{rr} 將產生反向復原電流，以便在左半橋的失效時間為左下側 MOSFET C_{oss} 充電。左下方 MOSFET 開啟後， Q_{rr} 感應的能源會消散到左下方的 MOSFET。 Q_{rr} 相關損失會攝入全橋式二極體整流器上的損失降低。

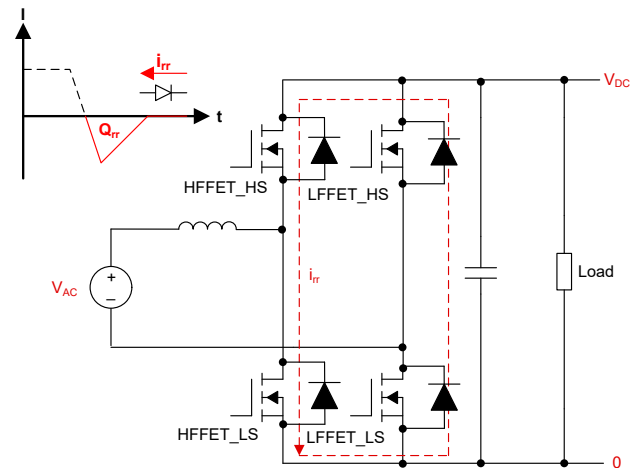


圖 10. 圖騰柱免橋接的 PFC 中反向復原電荷所造成的切換損耗。

寬能隙 FET 的存在於大多數情況下，可運用全新圖騰柱免橋接的 PFC 拓撲協助解決 Q_{rr} 相關損耗問題。SiC MOSFET 可實現比具有相同導通電阻電平的超接面 MOSFET 小 20 倍的 Q_{rr} ，而 GaN FET 則可實現零 Q_{rr} 。在整流器範例中結合元件與拓撲創新 (換句話說，套用寬能隙 FET 與圖騰柱免橋接的 PFC) 時，可達成 99% 以上的效率 (改善 >1% 的效率)，在設計中發揮更高的功率密度和更輕的重量。

以系統級創新實現超高效率目標

現今的元件和拓撲創新可使電源轉換系統的效率比以往更高出許多。相較於傳統的集中式 AC 電網系統，新興的 DC 電網系統提供比傳統集中式 AC 電網系統更簡單、更有效率且更可靠的高壓解決方案。例如，光電 (PV) 電源系統只需一個從 PV 面板到 120-V 或 240-V AC 電網的電源轉換階段。分散式 DC 電網系統可大幅簡化高壓電源轉換，並提升系統可用性與可靠性。

除了系統架構創新之外，控制系統創新也是簡化及改善高壓電源轉換系統的另一種方式。我們會繼續使用 PFC 做為範例。在牽涉 AC 的高功率應用中，CCM PFC 應當是首要選擇，因為其可降低電感器漣波電流，所以您需要較小的差動電磁干擾 (EMI) 濾波器。相較於 CCM PFC，臨界導通模式 (CRM) 使 PFC 電感器電流一律從零甚至是負開始，因此電感較小，可降低切換損耗並提高效率，因為開啟時的電源開關電流幾乎為零。不過，在提供相同功率時，電感器電流漣波會比 CCM PFC 高出許多，因而造成 EMI 濾波器設計上的困難。

第三個選項在效率和差動 EMI 雜訊位準之間提供適當平衡，是一種多模運作，即為在每個 AC 循環中結合 CCM 和 CRM 的運作。在多模運作中，PFC 電感器電感應小於 CCM 運作中使用的 PFC 電感器，但大於 CRM 運作中使用的 PFC 電感器，如此 PFC 在 AC 循環中才能同時讓 CCM 和 CRM 運作。**圖 11** 說明這三種模式下的波紋電流封包。

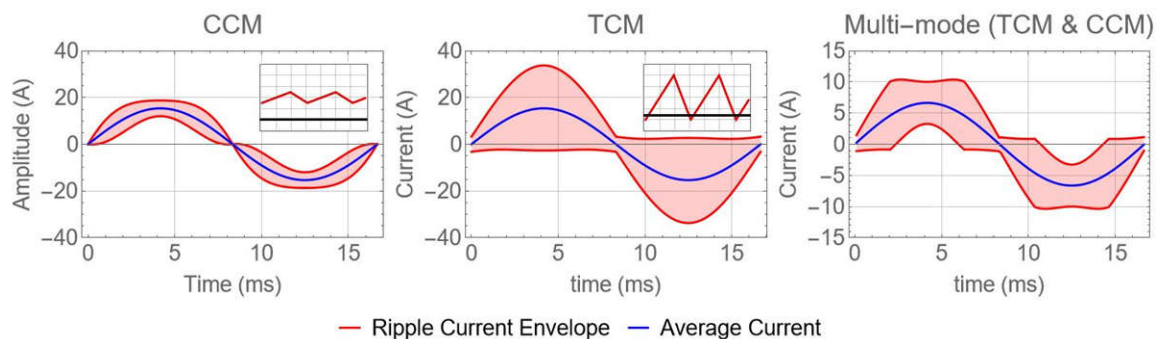


圖 11. CCM、CRM 和多模運作下的 PFC 電感器電流 (從左至右)。

圖 12 顯示具有相同規格的多模 PFC 和 CRM PFC (假設保證零電壓切換) 之間的損耗比較。多模 PFC 設計具備運作頻率範圍為 60 kHz 至 250 kHz 的 150- μ H PFC 電感器，而 CRM PFC 設計具備運作頻率範圍為 75 kHz 至 750 kHz 的 25- μ H PFC 電感器。因此，CRM PFC 可在半負載下降低 40% 以上的 FET 損失，並可採用更高的運作頻率和更小的電感器。這表示高效率高壓電源轉換系統應移向採用軟切換拓撲的方向。

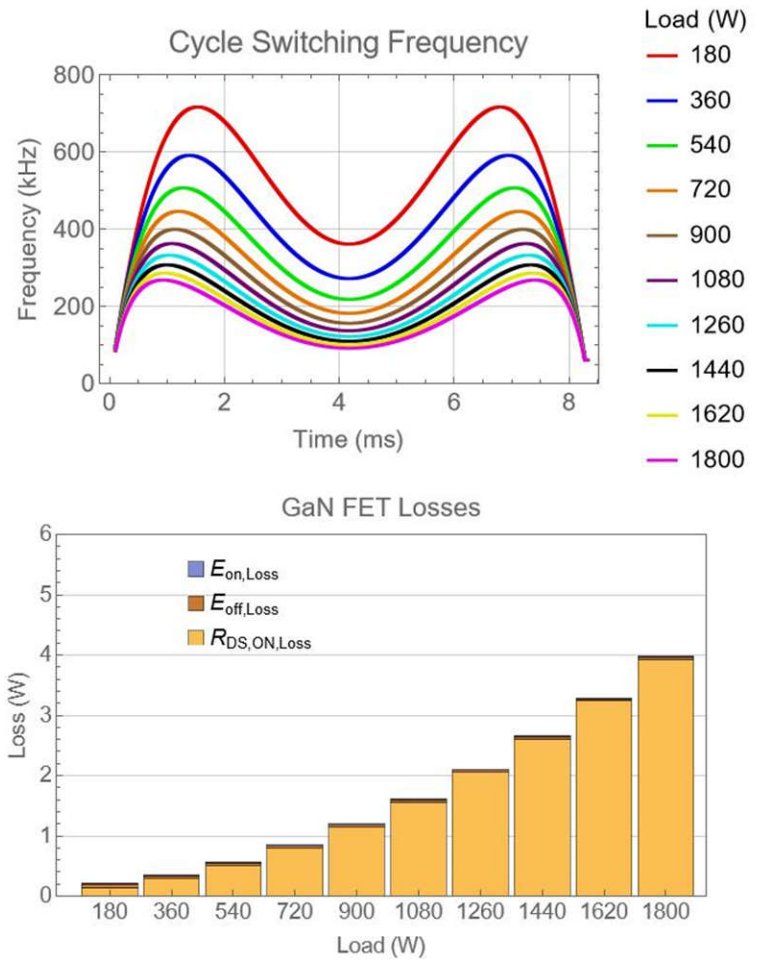
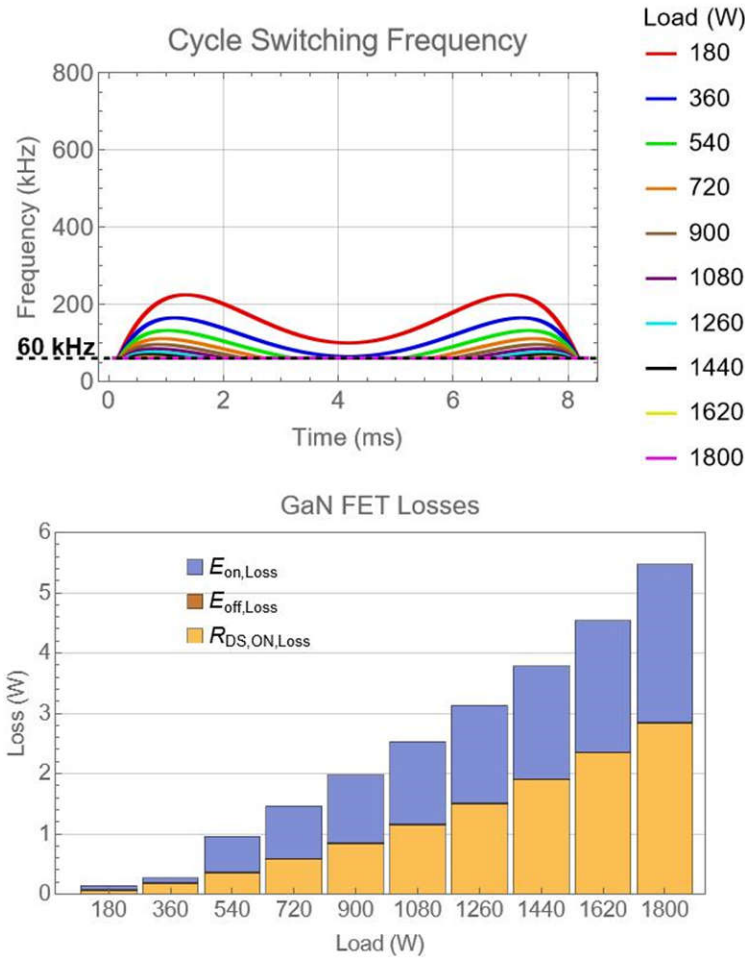


圖 12. 多模 PFC (左) 中的頻譜和 FET 損失，以及 1.8-kW 電源供應單元中的 CRM PFC。

設法克服 EMI 挑戰

工程師可設法將 PFC 電感器分為兩個元件，以克服 EMI 濾波器設計上的挑戰：一個附帶較高電感的電感器 (L_g) 連接至 AC 電源，另一個是較低電感的電感器 (L_b) 與電容器串聯，並與功率級平行，如 圖 13 所示。拆分電感器設定的想法是讓較大的 AC 波紋電流流經串聯電感器和電容器 (較低總阻抗)，並將 L_b (較高阻抗) 和 AC 電源的電流漣波降到最低。因此，隨著差動模式雜訊的降低，EMI 濾波器設計變得更容易。

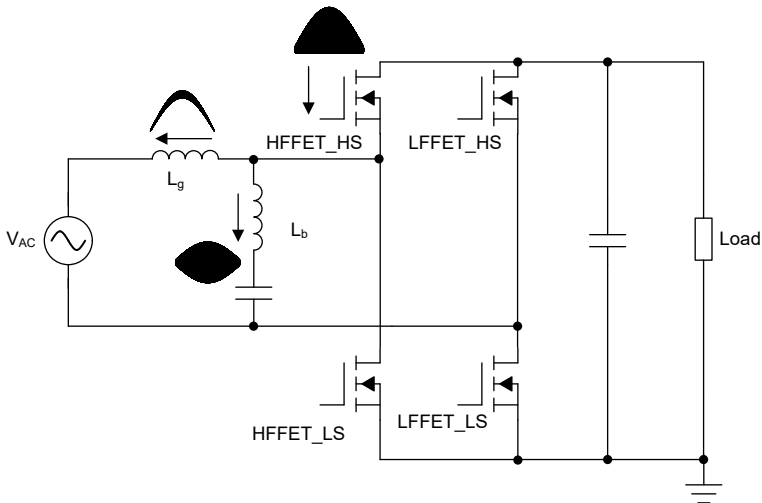


图 13. 已修改的图腾柱免橋接 PFC 電路。

雖然已修改的軟切換 CRM PFC 可讓您克服 EMI 濾波器設計挑戰，但 CRM PFC 本身需要投入額外的感測和控制來判斷 PFC 主動開關開啟時序，以確保軟切換。其中一個選項是新增電流感測裝置 (例如電流變壓器) 以偵測零電流點，可讓您根據 FET C_{OSS} 計算主動 FET 開啟時序。感測與控制系統的傳播延遲及元件公差，會導致主動 FET 開啟時序錯誤。由於此控制方案需要逐週期感測和控制，因此您應該預期更高的 MCU 資源使用量。

另一種方法是根據輸入和輸出電壓感測結果，以及 PFC 電感和 FET C_{OSS} ，計算所需的 FET 開啟和關閉時間。您可以利用 FET 汲極至源極電壓感測判斷是否已實現軟切換。如果在閘極訊號升高前，汲極至源極電壓未降至負值，則表示 FET 處於硬切換狀態。

以 图 13 中所示 FET 為範例，其中延長 HFFET_HS 開啟時間可將更多負電流放電 HFFET_LS C_{OSS} ，以實現軟切換。如果在閘極訊號升高前，汲極至源極電壓降至負值，表示 FET 已處於軟切換狀態。減少 HFFET_HS 的開啟時間，將均方根電流降至最低以提升效率。如此一來，FET 開啟時間就不再於每個週期更新，而是只在未發生軟切換時才進行調整，這樣可以節省大量 MCU 資源使用量。

整合所需的軟切換感測電路與 FET，可進一步簡化系統。如 图 5 所示，LMG3526R030 裝置將 GaN FET、驅動器、保護和 FET 汲極至源極電壓感測整合至一個封裝中。只要 GaN FET 在通道傳導前處於第三象限傳導，LMG3526R030 就會發出零電壓偵測脈衝來指示軟切換。

图 14 說明了在具有第三象限傳導與不具有第三象限傳導的 LMG3526R030 範例波形。

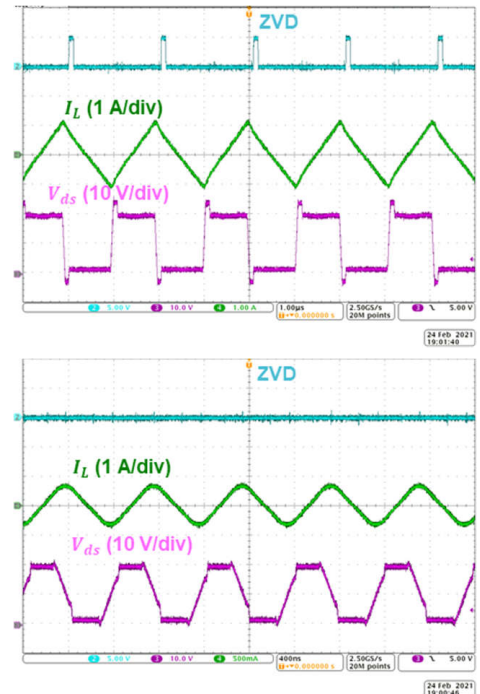


图 14. LMG3526R030 波形具有 (在上面) 和不具有第三象限傳導。

使用 LMG3526R030 中的零電壓偵測功能，變頻、ZVS、5-kW、基於 GaN、雙相图腾柱 PFC 參考設計透過結合元件、拓撲與控制系統創新，展現 99.1% 以上的峰值效率。

結論

現今，設計高壓電源轉換系統比十年前更加簡單，不過新挑戰也隨著新技術出現。單點突破不會為我們帶來革命性的高壓系統，因為每個設計項目都必須互相進化，以協助工程師將高壓系統的效率、功率密度和性能最大化。

TI 的高壓電源轉換技術橫跨 GaN IC、隔離式閘極驅動器、隔離式 DC/DC 轉換器及模組以及 C2000 即時微控制器，運用元件、拓撲和系統級創新簡化高效率、高功率密度、高壓電源轉換系統的設計。若要進一步了解有關 TI 高壓技術的資訊，請參閱 [TI.com/highvoltage](https://www.ti.com/highvoltage)。

其它資源

- [氮化鎵 \(GaN\) IC](#)
- [隔離式閘極驅動器](#)
- [隔離式 DC/DC 轉換器及模組](#)
- [C2000 即時微控制器](#)

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

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 © 2023, Texas Instruments Incorporated