

以高密度、GaN 最佳化 PFC 轉換器解決 AC 壓降復原問題

Brent McDonald

System and Application Engineer
Power Design Services

簡介

數據中心伺服器電源供應裝置斷電會導致娛樂、金融交易甚至到家庭保全系統等一切全部停擺。開放式運算項目 (OCP) [1] 的 V2 供電架規範等規定強調了使用穩健 AC 壓降控制演算法來減少伺服器停機時間的必要性。此外，由於使用傳統的連續導通模式 [2-8] 控制，因此需要使用符合數據中心成本效益的解決方案，以在輕負載下以峰值效率改善功率因數校正 (PFC)，同時縮減被動元件，也變得越來越困難。

為解決這個問題，TI 開發出氮化鎵 (GaN) 高密度設計，採用雙相整合式三角電流模式 (iTCM) PFC (圖 1) [9]。在高頻下運作的低值電感器可達到此設計的高效率 (>99%) 和功率密度 (120W/in³)。這種小型電感器在 AC 壓降復原方面存在獨特的問題，因為僅僅幾微秒的開關開啟時間就可能產生超過 70A 的開關電流。此外，任何時間上的延遲都會造成顯著逆電流，加重阻礙 PFC 復原。若要將電流位準維持在安全幅度並防止逆電流，就需要開發出 AC 壓降和復原問題的新解決方案。本文討論的解決方案具有實驗室驗證資料，這些資料是根據變頻、ZVS、5kW、GaN 式、雙相圖騰柱 PFC 參考設計 [10] 而得，且表 1 列出主要元件和系統規格。

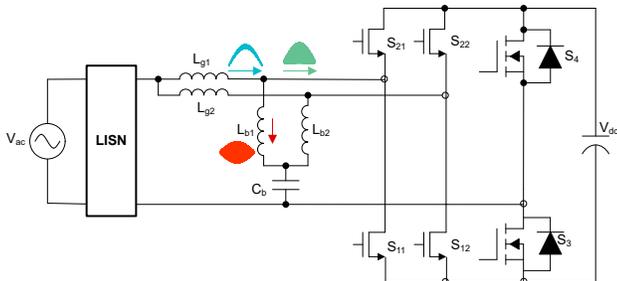


圖 1. 具有電感器和電流包絡的 iTCM 拓撲結構。

參數	值
AC 輸入	90 V-264 V
線路頻率	50-60 Hz
DC 輸出	400 V
最高功率	5 kW
全負載下的保持時間	20 ms
L _g ，低頻電感器	140 μH
L _b ，高頻電感器	14 μH
C _b ，高頻阻隔電容器	1.5 μF
總諧波失真 (THD)	OCP v3
電磁干擾 (EMI)	歐洲標準 (EN) 55022 A 類
運作頻率	變數，75 kHz-1.2 MHz
微控制器	TMS320F280049C [11]
高頻 GaN 場效應電晶體 (FET) (S ₁₁ 、S ₁₂ 、S ₂₂ 、S ₂₁)	LMG3526R030 [12]
低頻矽晶 FET (S ₃ 、S ₄)	IPT60R022S7XTMA1
尺寸	38 mm ´ 65 mm ´ 263 mm
功率密度	120 W/in ³

表 1. 具有電感器和電流包絡的 iTCM 拓撲結構。

拓撲結構概覽

此拓撲結構使用兩個相位，相位差 180°，並具有一個單一 DC 阻隔電容器 C_b，利用兩相位架構提供的漣波電流消除，並降低 C_b 中的均方根 (RMS) 電流應力。L_{b1} 和 L_{b2} 的尺寸適合處理 TCM 運作所需的高頻 AC 漣波電流，消除 TCM 所用電感器需要的 DC 偏壓負擔，如 [5] 中所定義。在存在零電壓切換 (ZVS) 所需的高通量擺幅時，使用 L_{b1} 和 L_{b2} 的鐵氧體磁芯有助於確保低損耗。L_{g1} 和 L_{g2} 的值大於 L_{b1} 和 L_{b2} (約大 10 倍)，這可防止大部分高頻率電流流入輸入來源，進而改善 EMI。此外，L_{g1} 和 L_{g2} 中的漣波電流減少，即可使用低成本的核心材料。圖 1 同時說明電感器和開關節點的漣波電流包絡。

AC 壓降技術難題

我要介紹的第一個難題是，當 AC 輸入電壓消失時會產生逆電流。由於圖騰柱 PFC 拓撲結構的所有開關皆為雙向，作為同步整流器運作的 FET 在移除 AC 時，必須盡可能快速關機。關機可防止負電流產生，負電流會使輸出電壓放電，而減少可用的保持時間。圖 2 說明在正半週期中，產生此同步傳導間隔負電流的路徑。此外，關閉同步整流器時的任何重大延遲也會造成大電流突波，進而觸發過電流保護 (OCP)。例如，如果同步整流器在沒有輸入電壓的情況下保持開啟，各位可以解出 $V_{dc} = L_{b1} \cdot \frac{di_1}{dt}$ 產生 70A 電流，也就是 2.5 μ s 所需的時間量。這短短的時間會強烈影響 AC 壓降偵測識別問題並在系統來到 OCP 或造成損壞之前停止切換。

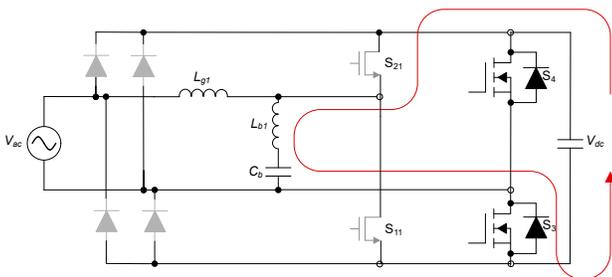


圖 2. 同步整流器 S₂₁ 延遲關閉 V_{dc} 放電路徑。

第二個難題是復原 AC 後恢復 PFC 運作。此事件的核心問題是因為 PFC 上的旁路二極體會將輸出電壓充電至輸入正弦波峰值，使輸出電壓降到此高值以下時最容易發生，尤其在高線路上。發生這些事件時，轉換器沒有停止電流的機制，因此會造成突波電流極大。事件期間控制開關不當會造成電感器飽和，引發 OCP 事件及進一步放電輸出電壓，使情況惡化。這段時間內需要精準的控制演算法，此需求再次因 iTCM 拓撲結構的高頻運作點以及用於 L_{b1} 和 L_{b2} 的小值電感器而倍增。

AC 壓降解決方案

為了精確確定 AC 輸入是否存在，解決方案使用虛擬 AC 輸入訊號監測實際 AC 輸入的完整性。此虛擬訊號透過測量輸入電壓振幅、頻率和相位而產生，以便在正常運作過程中近乎完美地追蹤實際交流輸入的 50 和 60Hz 元件。透過比較實際輸入和虛擬輸入，系統可以輕鬆辨別是否存在 AC 輸入電壓。兩個訊號之間的差異如有任何突發變化，都

表示發生輸入暫態事件。此暫態事件可用於偵測 AC 輸入電壓損失及復原狀況。圖 3 說明虛擬 AC 輸入以及壓降事件期間的實際輸入。

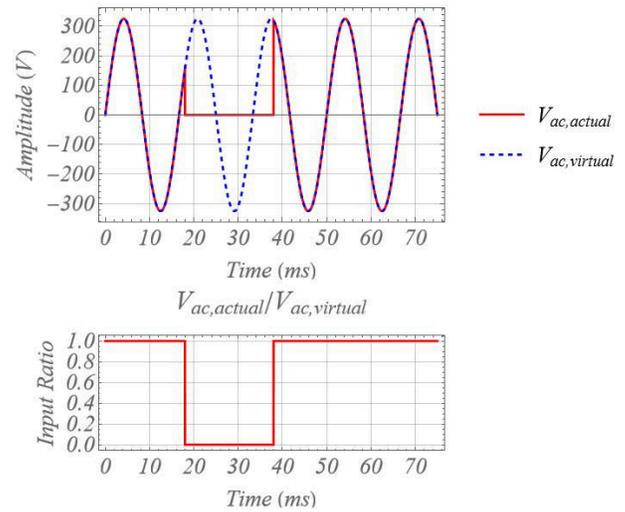


圖 3. 有虛擬 AC 訊號的 AC 輸入壓降。

圖 4 說明管理壓降和復原程序的狀態機。啟動時，系統會經過初始化週期 (同步初始化)，RMS 輸入電壓幅度於此期間確定。其會使用軟體鎖相迴路 (SPLL) 來確保 V_{ac,virtual} 的相位與 V_{ac,actual} 相符。一旦 SPLL 鎖定 (同步開啟)，處理器將監控 V_{ac,actual}/V_{ac,virtual} 之間的比率 (請參閱 圖 3)。如果此比率小於目標閾值，則系統會宣告中斷事件，切換會立即停止 (停止狀態)。此時，系統將清除發生的所有故障並進入待機狀態 (就緒)，在此狀態下，系統將監控 V_{ac,actual}/V_{ac,actual} 比率，以確定比率何時高於恢復閾值。一旦狀態機確定 AC 復原，其將立即恢復切換並重新同步 SPLL (恢復狀態)。將 V_{ac,actual}/V_{ac,actual} 比率搭配 SPLL 使用，演算法可以確定任何輸入電壓或頻率的 AC 壓降和復原時間。此外，由於演算法始終監控 V_{ac,actual}/V_{ac,actual} 比率，其能夠比傳統的位準型解決方案更快回應，後者會偵測 AC 輸入電壓何時歸零。壓降的位準型架構監控可能會產生延遲，造成大電流突波及顯著逆電流。

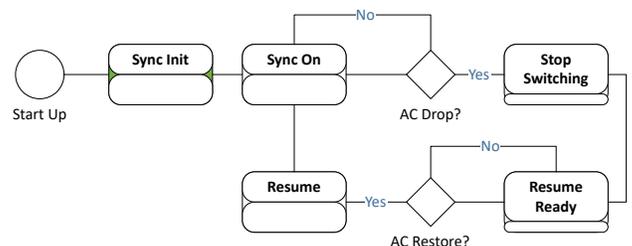


圖 4. AC 壓降和復原狀態機。

結果

圖 5 說明在 AC 壓降和復原事件期間，以前述演算法執行雙相 iTCM 圖騰柱 PFC 的性能。在 60Hz 下，AC 輸入電壓為 230V_{RMS}，輸出電壓為 400V。負載為 5kW (400V，12.5A) 的恆定電流，並有 20ms AC 壓降事件。為了呈現系統最差情況下的應力，已將 AC 移除，使其在 AC 線路週期峰值時回流。這是最差的突入電流情況，因為當 AC 線路峰值超過 V_{OUT} 時，輸入旁路二極管將導致輸出電容器中產生顯著的突入電流。

圖 5 中的波形也提供事件恢復部分的放大圖像。明顯可見 PFC 開關電流受到良好控制且低於 GaN FET OCP 限制 [12]。盡可能減少逆電流可防止不必要的 V_{OUT} 放電。此外，旁路二極體的傳導間隔並無異常行為，因為演算法能夠輕鬆判斷輸入電壓是否高於或等於輸出電壓。

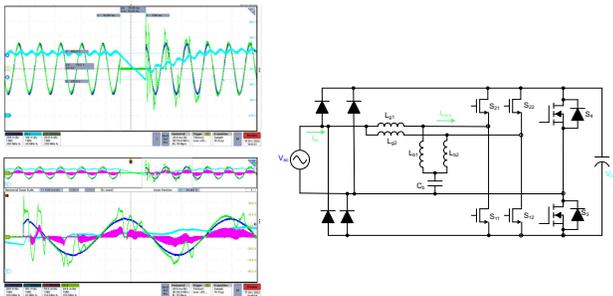


圖 5. 5kW 下的 AC 壓降和恢復性能。

除了 AC 壓降，此設計亦提供低 THD、高效率、高功率密度及快速負載暫態響應。

如想進一步了解此演算法或此設計的其他方面，參考資料 [10] 中有關於雙相圖騰柱 PFC 參考設計的完整電路圖、佈線圖、物料清單、測試結果和程式碼。

參考資料

1. **V2 供電架規範 6600W 12.6V DC (2+1) 備援**。開放式運算專案。Facebook：Menlo Park，加州 (2015 年 2 月)。
2. Fernandes、Ryan 和 Olivier Trescases。具備數位峰值電流調變的多模式 1MHz PFC 前端。出版於《IEEE Transactions on Power Electronics》第 31 冊第 8 期 (2016 年 8 月)：第 5694-5708 頁。數位物件識別碼：10.1109/TPEL.2015.2499194。
3. Lim, Shu Fan 和 Ashwin M. Khambadkone。輕負載狀態下具備更高效率與功率因數的升壓 PFC 多模式數位控制方案。發表於 2012 年第二十七屆 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)，第 291-298 頁。數位物件識別碼：10.1109/APEC.2012.6165833。
4. Huang, Long、Wenxi Yao 和 Zhengyu Lu。具有 ZVS 和低輸入電流漣波的交錯式圖騰柱免橋接 PFC 整流器。發表於 2015 年 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)，第 166-171 頁。數位物件識別碼：10.1109/ECCE.2015.7309684。
5. Liu, Zhengyang。2017 年。高頻功率轉換用寬頻隙裝置的特性與應用。維吉尼亞理工學院暨州立大學博士論文。
6. Kim, J.W.、S.M.Choi 和 K.T.Kim。關鍵傳導模式升壓功率因數校正轉換器的可變開啟時間控制改善零交點失真。發表於 2005 年 International Conference on Power Electronics and Drives Systems，第 1542-1546 頁。數位物件識別碼：10.1109/PEDS.2005.1619933。
7. Xu, Xiaojun 和 Alex Q. Huang。多相關鍵模式升壓 PFC 轉換器的新型閉合迴路交錯策略。發表於 2008 年第二十三屆 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)，第 1033-1038 頁。數位物件識別碼：10.1109/APEC.2008.4522849。
8. Neumayr, D.、D. Bortis、E. Hatipoglu、J.W.Kolar 和 G. Deboy。用於高功率密度 DC/AC 轉換器系統的新型效率最佳調頻。發表於 2017 年第三屆 IEEE International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)，第 834-839 頁。數位物件識別碼：10.1109/IFEEC.2017.7992148。
9. Rothmund、Daniel、Dominik Bortis、Jonas Huber、Davide Biadene 和 Johann W. Kolar。用於中壓固態變壓器的 10 kV SiC 雙向軟性切換單相 AC/DC 轉換器概念。發表於 2017 年第八屆 IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)，第 1-8 頁。數位物件識別碼：10.1109/PEDG.2017.7972488。

10. Texas Instruments. n.d. **可變頻率、ZVS、5kW、GaN 架構、二相圖騰柱 PFC 參考設計**。德州儀器參考設計編號 PMP40988。存取於 2022 年 12 月 27 日。
11. Texas Instruments. n.d. **具有 100MHz、FPU、TMU、256kb 快閃記憶體、CLA、InstaSPIN-FOC™、CLB、PGA、SDFM 的 C2000™ 32 位元 MCU**。存取於 2022 年 12 月 27 日。
12. Texas Instruments. n.d. **具有整合式驅動器、防護和溫度報告功能的車用 650V、30mΩ GaN FET**。存取於 2022 年 12 月 27 日。

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 © 2024, Texas Instruments Incorporated