

# 適用於圖騰柱免橋接 PFC 的創新 CCM-TCM 多模控制方法

Bosheng Sun

Systems Engineer, Texas Instruments

## 簡介

數據中心的電源供應單元 (PSU) 必須具備高效率與高功率密度。去年發布的 80 Plus Ruby 認證，為資料中心 PSU 設定了迄今為止最高的效率標準。如中所示表 1，80 Plus Ruby 效率不僅在每個負載條件下都高於 80 Plus Titanium，還要求在 5% 負載下具有 90% 效率，這之前從未指定過。

80 PLUS 認證	230V 內部冗餘				
額定負載的百分比	5%	10%	20%	50%	100%
80 Plus Titanium		90%	94%	96%	91%
80 Plus Ruby	90%	91%	95%	96.5%	92%

表 1. 80 Plus 認證等級

同時，有限的伺服器機架空間與不斷增加的電源需求導致高功率密度。最新的模組化硬體系統 – 通用備援電源供應器，以 185 mm x 39 mm x 73.5 mm 的外型尺寸為 3.6kW 功率而設計，換算後功率密度達 111W/in<sup>3</sup>，而其他 PSU 產品仍停留在 80 W/in<sup>3</sup> 至 90 W/in<sup>3</sup> 的水準。

伺服器 PSU 由圖騰柱免橋接功率因數校正 (PFC) 與 DC/DC 轉換器組成。圖騰柱免橋接 PFC 中使用的傳統控制方法為連續傳導模式 (CCM) 或三角傳導模式 (TCM)；但每種方法都有限制。CCM 圖騰柱免橋接 PFC 可實現高功率密度，但其效率會受限於硬切換，尤其在輕負載時，切換損耗會成為主導因素。TCM 圖騰柱免橋接 PFC 因採用零電壓切換 (ZVS)，可在整個負載範圍內實現優異效率，但需採用兩相或更多相交錯，以降低較高的電感電流漣波，因此造成功率密度較低且成本較高。表 2 比較了這兩種方法。

	CCM 操作	TCM 操作
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>低峰對峰值電感器電流漣波</li> <li>控制容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ZVS</li> </ul>

	CCM 操作	TCM 操作
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>硬切換，高切換損耗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高峰對峰值電感器電流漣波</li> <li>需要多相交錯以減少高功率應用的電流漣波，進而產生低功率密度與高成本</li> <li>控制複雜</li> </ul>

表 2. 圖騰柱 PFC 中的 CCM 和 TCM 比較

為了實現高效率和高功率密度，圖騰柱免橋接 PFC 可以在多模中運作，如圖 1 所示。在高負載條件下，或於 AC 半週期的峰值時，所需的 PFC 輸入電流較高，因此 PFC 會以 CCM 運作。當負載降低或位於所需 PFC 輸入電流為低的 AC 零交點區域周圍，PFC 會切換至 TCM 並以 ZVS 運作。

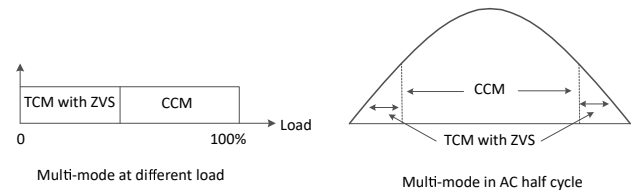


圖 1. CCM\_TCM 多模運作

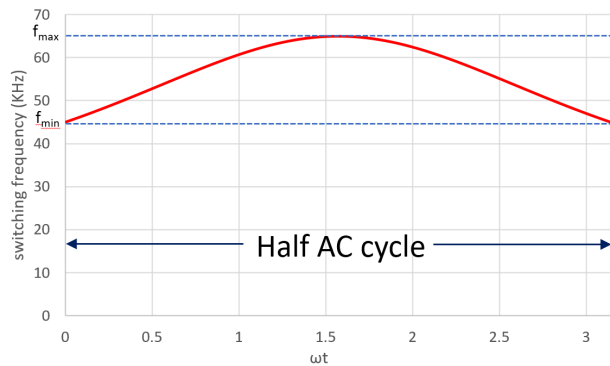
與純 CCM 相比，多模控制在輕負載下具備更高效率，這可歸因於 ZVS；與純 TCM 相比，則無需採用多相交錯運作，因為其電感電流漣波低得多，可大幅縮小尺寸並降低系統成本。結合 CCM 與 TCM 的優勢，即可滿足高效率與高功率密度需求。

## 如何在輕負載時讓 PFC 進入 TCM

TCM 運作要求在切換週期結束時電感器電流壓降至零。但在 CCM PFC 中，由於升壓電感高，電感器電流在整個 AC 半週期中幾乎總是大於零。若要讓電感器電流降至零，其中一種方法是選擇低於 CCM PFC 使用的升壓電感，但高於 TCM PFC 使用的升壓電感。

由於低電感會導致電流漣波增加，因此設計電感器時必須確保多模運作獲得的效率比高電流漣波造成的額外電感器核心損耗。由於電感器電流漣波高於 CCM，因此電磁干擾濾波器也需要重新設計。

另一個選項是保持相同的 CCM 電感器，但使用開關頻率回折曲線，如 **圖 2** 所示。切換頻率在 AC 峰值時最高（等同於 CCM 運作下的額定切換頻率），並會隨著接近 AC 零交越點而逐漸降低。



**圖 2.** AC 半週期中的切換頻率曲線

**方程式 1** 計算 AC 半週期中的切換頻率：

$$f = \frac{1}{\frac{1}{f_{\min}} - \left( \frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_{\max}} \right) \sin(\omega t)} \quad (1)$$

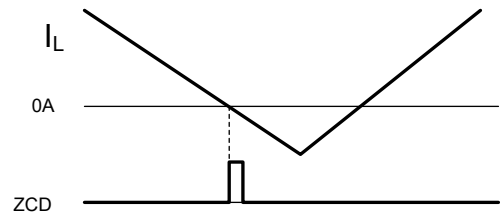
其中  $f_{\max}$  是傳統 CCM 操作中使用的切換頻率， $f_{\min}$  是最小切換頻率，而  $\omega t$  為 AC 輸入電壓的角頻率。

隨著切換頻率降低，電感器電流在切換週期結束時將降至零，從而實現 TCM 控制。接著，可控制 PFC 在 AC 峰值時在 CCM 下運作，並在 AC 零交點區域周圍以 ZVS 切換至 TCM。進一步降低最小切換頻率可擴大 TCM 區域，但代價是迴路頻寬降低，可能導致總諧波失真（THD）表現不佳，甚至造成迴路不穩定。

### 如何偵測零電流

在 TCM 控制中，可透過在 PFC 接地回路上配置電阻，或在升壓電感上增加第二組繞組來加入零電流偵測（ZCD）電路，以偵測電感電流降為零的瞬間。某些裝置，例如 TI 的 LMG3427R030 氮化鎵（GaN）場效電晶體（FET），內建 ZCD 電路，當電流降為零時會產生 ZCD 訊號，如 **圖 3** 所示。使用此裝置作為高頻開關，可大幅簡化設計程

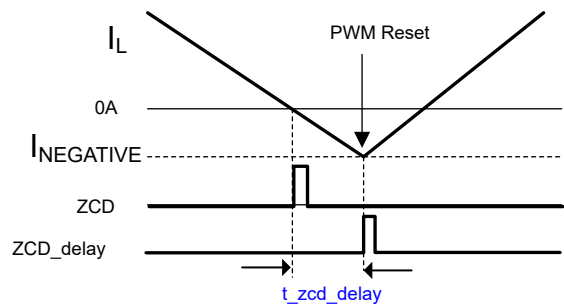
序。ZCD 訊號會傳送至微控制器（MCU）以進行進一步處理。



**圖 3.** ZCD 訊號產生

### 如何在 TCM 下實現 ZVS

若要在 TCM 實現 ZVS 運作，電感器電流必須降至負值，才能對切換節點電壓進行放電。在接收到 ZCD 訊號後，MCU 會先對該訊號加入時間延遲，接著再利用延遲後的 ZCD 訊號關閉脈衝寬度調變（PWM），並重設 PWM 計數器，如 **圖 4** 所示。重設後，下一個切換週期會開始，升壓開關也會開啟。時間延遲會讓電感器電流變成負值，因為當電感器電流降至零後，同步開關仍處於開啟狀態。適當調整延遲時間，可控制負電流的大小，使開關節點電壓放電至零，並在該時刻開啟升壓開關，從而實現 ZVS。



**圖 4.** 新增 ZCD 延遲以重設 PWM

對於從同步開關關閉到升壓開關開啟時的給定失效時間  $\Delta t$   $\mu\text{s}$ ，**方程式 2** 會計算完全放電切換節點電壓所需的最小負電流：

$$I_{\text{NEGATIVE}} = - \frac{2 \times C_{\text{OSS}} \times V_{\text{out}}}{\Delta t} \quad (2)$$

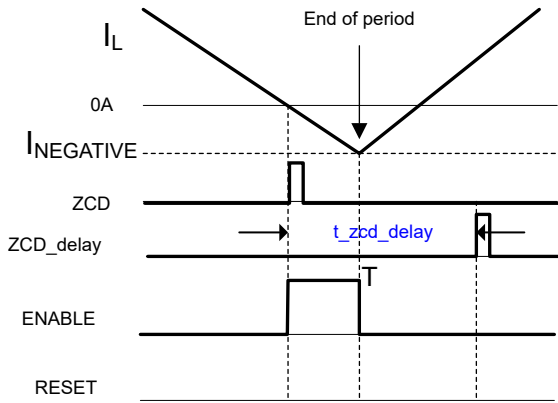
其中  $C_{\text{OSS}}$  是開關的輸出電容， $V_{\text{out}}$  則是 PFC 輸出電壓。

**方程式 3** 接著會計算所需的最小 ZCD 延遲時間：

$$t_{\text{zcd\_delay}} = \frac{L \times |I_{\text{NEGATIVE}}|}{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}} \quad (3)$$

其中  $L$  為升壓電感， $V_{\text{in}}$  為 PFC 輸入電壓。

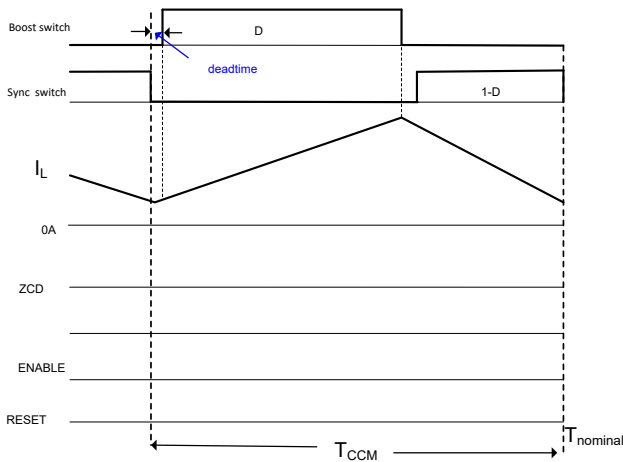
在 **方程式 3** 中，當  $V_{in}$  接近  $V$  時，計算的延遲時間可能太長，以致延遲的 ZCD 訊號進入下一個切換週期，如 **圖 5** 所示。此處重置 PWM 是錯誤的。為防止出現這種情況，需產生一個 ENABLE 視窗，該視窗自 ZCD 訊號起始時開始，並於目前切換週期結束時終止，如 **圖 5** 中所示。MCU 使用此啟用視窗來處理延遲的 ZCD 訊號以產生重設訊號，然後使用該重設訊號來重設 PWM。如此可確保 PWM 重設只能在相同切換週期內發生。



**圖 5.** 啟用視窗和重置訊號

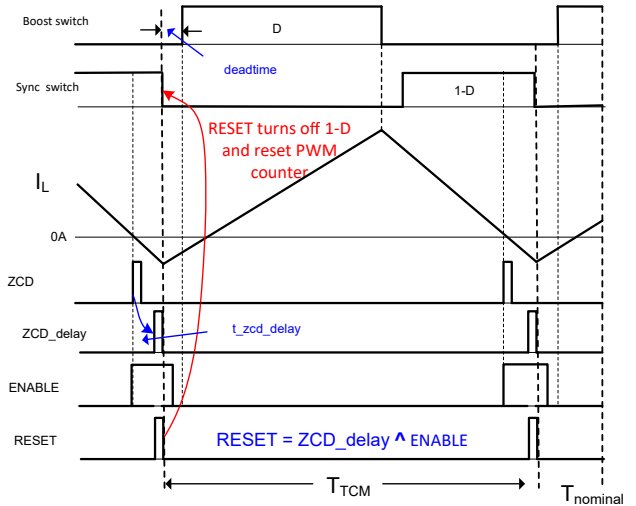
### 在 CCM 和 TCM 之間轉換

CCM 和 TCM 之間的轉換是自動的。在 AC 峰值或高負載下，電感器電流會偏高。此訊號不會降至零，由於沒有產生 ZCD 訊號，因此沒有重設訊號。PWM 計數器會在其額定切換週期結束時自然重設。由於開關頻率等於額定開關頻率，PFC 的工作方式與傳統 CCM PFC 相同，如 **圖 6** 所示。



**圖 6.** AC 峰值時的 CCM 運作

當 AC 接近零交越點時，電感電流與切換頻率都會下降，而電感電流會在切換週期結束前降為零。GaN 裝置會產生 ZCD 訊號。利用 **方程式 3** 所計算出的延遲時間，再與起用視窗進行 AND 邏輯運算，以產生重置訊號。重置訊號會重置 PWM。同步開關會在額定切換週期結束之前關閉，並開始下一個切換週期。實際切換頻率低於額定切換頻率。PFC 作為 TCM PFC 執行，如 **圖 7**。



**圖 7.** TCM 在 AC 零交點周圍運作

### 動態無感時間

在 CCM 下，應將死區時間降至最低，也就是同步開關關閉到升壓開關導通之間的時間，以減少升壓開關本體二極體的導通時間。在 TCM 中，同步開關關閉時，需要時間對切換節點電壓進行放電或充電。因此，失效時間需要更長。在 CCM 和 TCM 間使用動態無感時間以將效率最佳化。

### 控制定律和 PWM 產生

在傳統 TCM 操作中，只有電壓迴路-無電流迴路。升壓開關開啟時間由恆定  $T_{on}$  控制方式決定。在多模控制方法中，傳統的平均電流模式控制器（如 **圖 8** 所示）會為 TCM 與 CCM 運作產生 PWM 占空比。控制器包含一個外部電壓迴路 ( $G_V$ ) 和一個內部電流迴路 ( $G_I$ )。  $G_V$  的輸出由感測到的輸入電壓調變，成為電流迴路的電流命令。由於相同的補償器會為 CCM 和 TCM 產生 PWM 工作週期，因此模式轉換相當流暢，在模式轉換期間沒有電流失真。

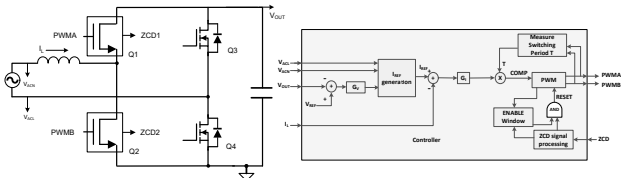


圖 8. 建議的 CCM\_TCM 控制的方塊圖

在 MCU 中，比較 COMP 值與斜坡訊號會產生 PWM 訊號，其中 COMP 是透過 **方程式 4** 將電流迴路  $G_i$  輸出乘以切換週期 T：

$$COMP = G_i \times T \tag{4}$$

在傳統 CCM 操作中，切換週期 T 為恆定。然而，在 TCM 運作中，重設訊號決定了實際切換週期；其小於 T。使用 **方程式 4** 會使 PWM 脈衝寬度超過所需，導致  $G_i$  更難以進行補償。將  $G_i$  推向更高的頻寬有助益，但可能會導致迴路不穩定。

要解決此問題，請讓控制器測量實際切換週期。透過將  $G_i$  輸出乘以上一個開關週期測量的切換週期計算 COMP 值，如 **方程式 5** 和 **圖 9** 所示。**方程式 5** 是有效的，因為 PWM 週期在兩個連續週期中幾乎相同。

$$COMP_N = G_i \times T_{N-1} \tag{5}$$

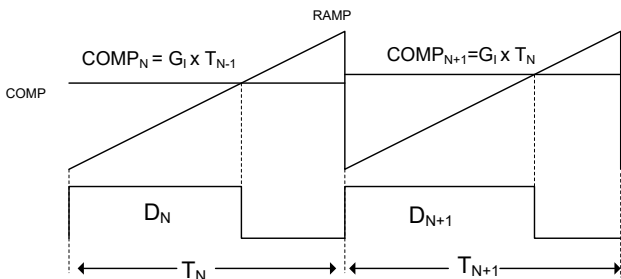


圖 9. PWM 產生

### 測試結果

此控制方法執行在 3.6KW 圖騰柱免橋接 PFC [1] 中。其最大切換頻率為 65KHz，最小切換頻率設定為 45KHz。控制器使用 TI 的 TMS320F280039C 即時 MCU。高頻開關使用 LMG3427R030 GaN FET，具備內建 ZCD 電路。65KHz 中斷服務例程序 1 (ISR1) 會執行電流迴路和 ZCD 延遲時間計算，而 10KHz 中斷服務例程序 2 (ISR2) 則會執行電壓迴路。ZCD 延遲、啟用視窗、邏輯以及實際切換週期量測皆可透過 TMS320F280039C 的可

設定邏輯區塊 (CLB) 實施。設定完成後，CLB 會獨立執行，而不涉及 CPU。

此設計達到了  $>180W^3$  的功率密度，並具有優異的輕負載效率。**圖 10** 和 **圖 11** 顯示此控制方法與傳統 CCM 控制在相同電路板上的效率比較，且輕負載效率提升可達 2%。

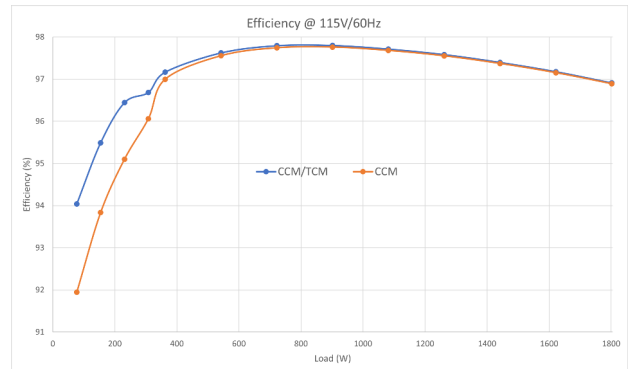


圖 10. 低線路下的效率比較

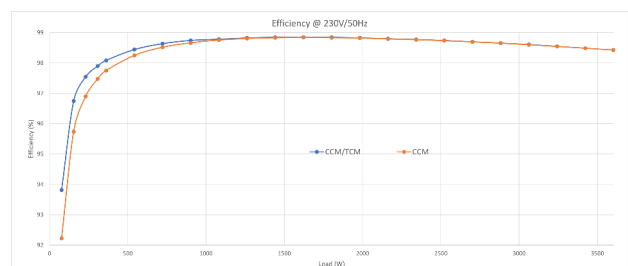


圖 11. 高線路下的效率比較

**圖 12** 顯示了 50% 負載下的輸入電流波形，模式轉換期間沒有觀察到電流失真。

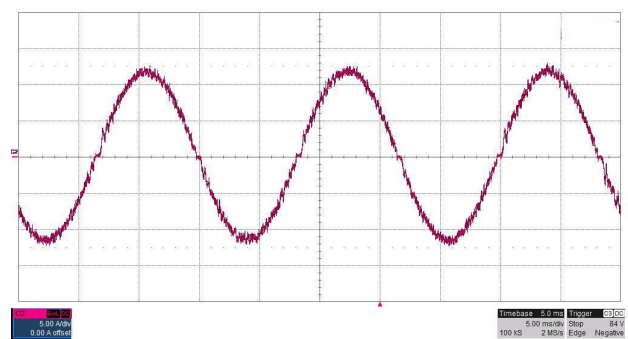


圖 12. 50% 負載時的輸入電流波形

### 結論

圖騰柱免橋接 PFC 可透過 CCM-TCM 多模運作，同時實現高效率與高功率密度；也就是在重負載或 AC 峰值時以 CCM 運作，並在輕負載或 AC 過零附近切換至具 ZVS 的

TCM。CCM-TCM 多模可大幅提升輕負載效率，且在模式轉換期間沒有輸入電流失真。這對於需要 80 Plus Ruby 效率的應用程式非常有用。

## 參考資料

1. Texas Instruments. n.d. 「[3.6kW CCM-TCM 多模控制圖騰柱免橋接 PFC 參考設計](#)。」德州儀器參考設計編號 PMP23537。於 2025 年 2 月 16 日存取。

## 作者簡介

Bosheng Sun 是德州儀器的系統工程師，專注於為伺服器 and 工業應用開發數位控制的高性能 AC/DC 解決方案。他於 2003 年取得 Cleveland State 大學電機工程碩士學位，並於 1995 年取得北京清華大學電機工程學士學位。他擁有六項美國專利。

**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 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](http://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