

Technical Article

三種關閉圖騰柱免橋式功率因數校正 (PFC) 控制迴路的方法



Bosheng Sun

簡介

在所有功率因數校正 (PFC) 拓撲中，圖騰柱免橋接 PFC 可提供最佳效率，因此廣泛用於伺服器與資料中心。然而，關閉連續傳導模式 (CCM) 圖騰柱免橋接 PFC 的電流控制迴路不如傳統 PFC 簡單。在 CCM 下運作的傳統 PFC 採用平均電流模式控制器 [1]，如圖 1 所示，其中 V_{REF} 是電壓迴路參考， V_{OUT} 是感應到的 PFC 輸出電壓，GV 是電壓迴路， V_{IN} 是感應到的 PFC 輸入電壓， I_{REF} 是電流迴路參考， I_{IN} 是感應到的 PFC 電感器電流， G_I 是電流迴路， d 是脈衝寬度調變比 (PWM)。由於橋式整流器用於傳統 PFC，因此所有這些值都是正值，電流回饋訊號 I_{IN} 是整流輸入電流訊號。

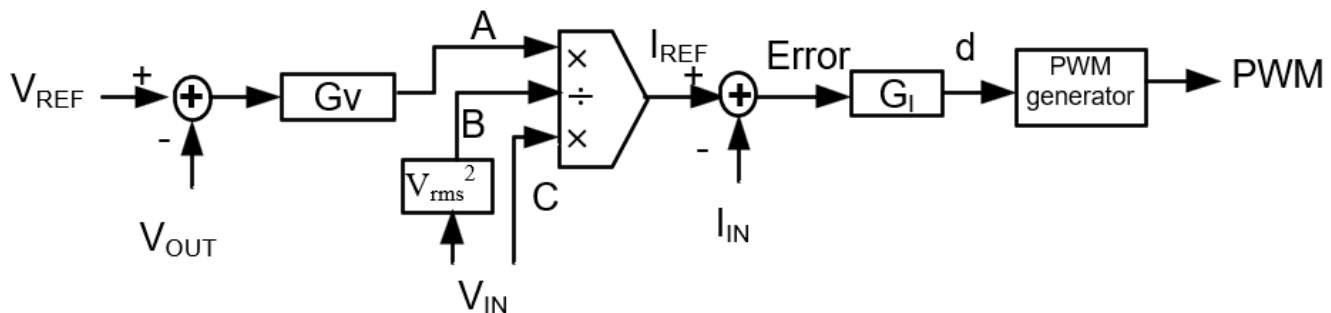


圖 1. PFC 的平均電流模式控制器，其中列出的所有參數都具有正值，而 I_{IN} 是整流輸入電流訊號。來源：德州儀器

新回饋訊號

由於圖騰柱免橋接 PFC 中的電感器電流為雙向，因此傳統 PFC 中使用的電流感測方法將無法發揮作用。相反的，您需要霍爾效應感測器等雙向電流感測器來感測雙向電感器電流，並為控制迴路提供回饋訊號。

不過，霍爾效應感測器的輸出與感測到的電流不會 100% 相符。例如，如果感應到的電流是正弦波，則霍爾效應感測器的輸出是帶 DC 偏移的正弦波，如所示圖 2。因此，您不能將其用作圖 1 中所示電流模式控制器中的回饋訊號，您必須修改控制器以適應此新的回饋訊號。在本電源小技巧中，我將說明利用此新回饋訊號關閉電流控制迴路的三種方式。

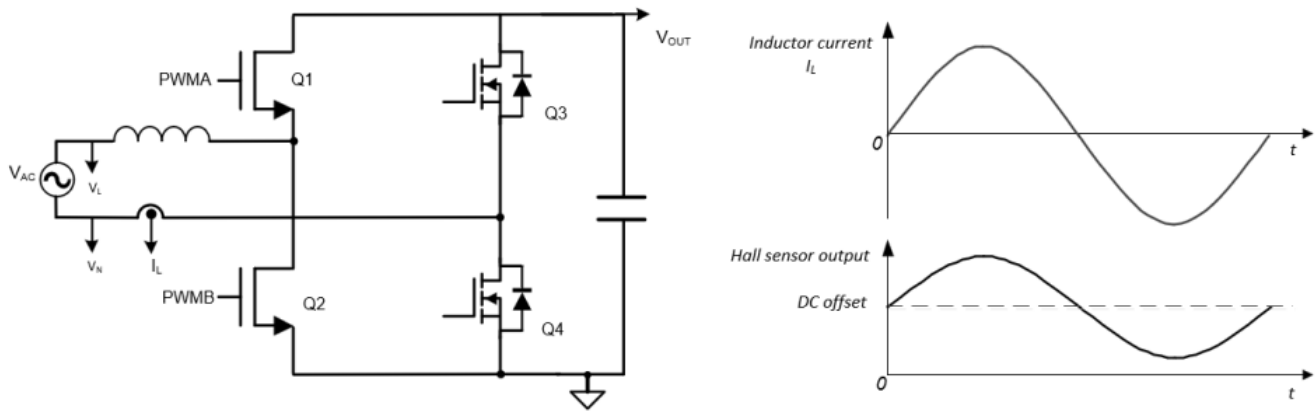


图 2. 圖騰柱免橋接 PFC 及其電流感測訊號顯示霍爾效應感測器輸出與感測的電流不會 100% 相符。來源：德州儀器

方法 1：無負迴路參考的控制器

例如德州儀器 (TI) 的 UCD3138 等數位控制器，會使用硬體狀態機來實作控制迴路；因此，所有發送至狀態機的輸入訊號都必須大於或等於零。在這種情況下，請按照以下步驟關閉電流控制迴路：

1. 分別透過兩個類比轉數位轉換器 (ADC) 感測 AC 線路和 AC 中性電壓。
2. 使用固件糾正感應到的 V_{AC} 訊號，如方程式 1 和 图 3 中所示。

$$\begin{aligned} &\text{if } (V_L > V_N) * V_{IN} = V_L - V_N \\ &\text{else } V_{IN} = V_N - V_L \end{aligned} \quad (1)$$

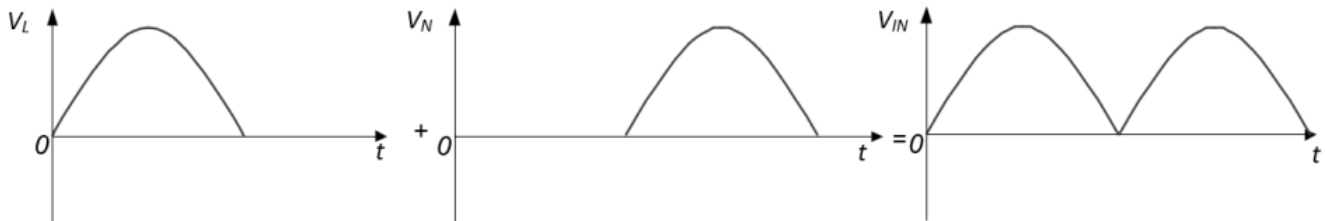


图 3. 使用方程式 1 中顯示的固件來校正感應到的輸入電壓 V_{AC} 。來源：德州儀器

3. 使用與計算傳統 PFC 中的 I_{REF} 相同的方法計算正弦參考 V_{SINE} ，如方程式 2 和 图 4 所示。

$$V_{SINE} = \frac{G_V \times V_{IN}}{V_{IN_RMS}^2} \quad (2)$$

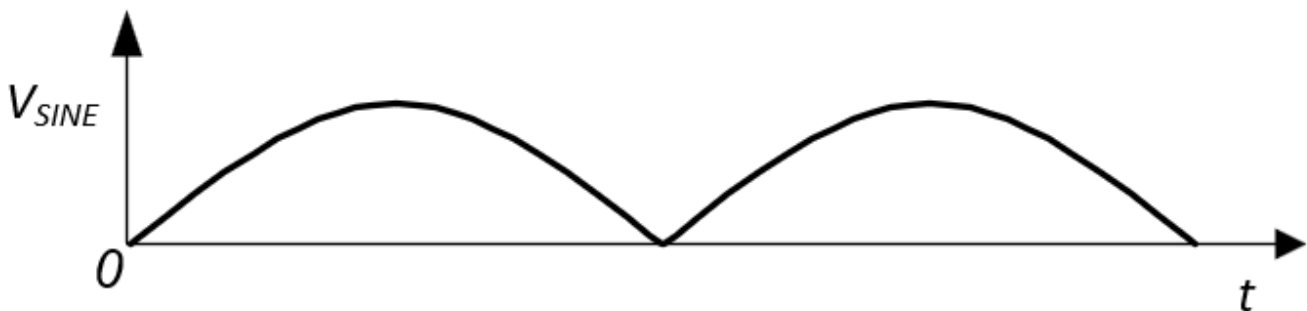


图 4. 使用與在傳統 PFC 中計算 I_{REF} 相同的方法計算正弦參考 (V_{SINE})。來源：德州儀器

4. 直接使用霍爾效應感測器輸出作為電流回饋訊號 I_{IN} (方程式 3)。

$$I_{IN} = \text{Hall-effect sensor output} \quad (3)$$

5. 在正 AC 週期中，若比較 V_{SINE} 形狀與霍爾效應感測器輸出，則會呈現相同形狀。唯一的差異是 DC 偏移。使用方程式 4 計算電流迴路參考 I_{REF} 。

$$I_{REF} = V_{SINE} + DC \text{ offset} \quad (4)$$

6. 控制迴路具有標準負回饋控制。使用方程式 5 計算進入控制迴路的誤差：

$$Error = I_{REF} - I_{IN} \quad (5)$$

7. 在負 AC 週期期間，若比較 V_{SINE} 形狀與霍爾效應感測器輸出，差異不僅在於 DC 偏移，其形狀也相反。使用方程式 6 計算電流迴路參考 I_{REF} 。

$$I_{REF} = DC \text{ offset} - V_{SINE} \quad (6)$$

8. 在負 AC 週期期間，電感器電流越高，霍爾效應感測器輸出的值就越低。控制迴路需要從負回饋變為正回饋。使用方程式 7 計算進入控制迴路的誤差。

$$Error = I_{IN} - I_{REF} \quad (7)$$

方法 2：純韌體式控制器

對於韌體式數位控制器，如 TI C2000 微控制器，控制迴路是以韌體執行，意即內部計算參數可以是正值或負值。在這種情況下，請按照以下步驟關閉電流控制迴路：

1. 透過兩個 ADC 感測 AC 線路和 AC 中性電壓。然後使用線路電壓減去中性電壓以獲得 V_{IN} ，如方程式 8 和 图 5 所示。

$$V_{IN} = V_L - V_N \quad (8)$$

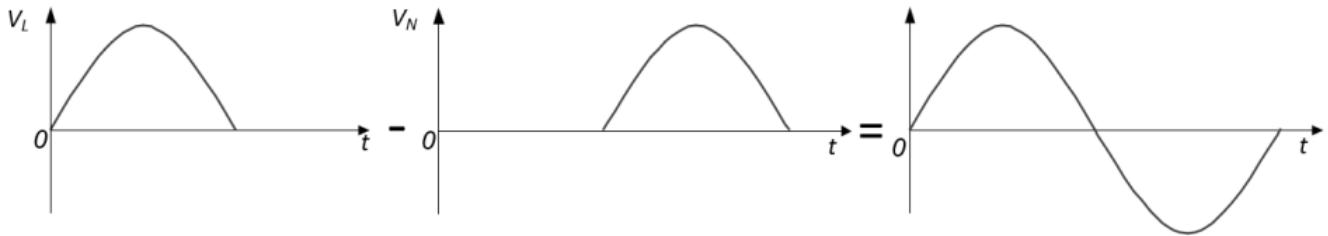


图 5. 使用線路電壓減去中性電壓後計算 V_{IN} 。來源：德州儀器

2. 使用與傳統 PFC 相同的方法計算正弦電流迴路參考 I_{REF} ，如方程式 9 和 图 6 所示。

$$I_{REF} = \frac{G_V \times V_{IN}}{V_{IN_RMS}^2} \quad (9)$$

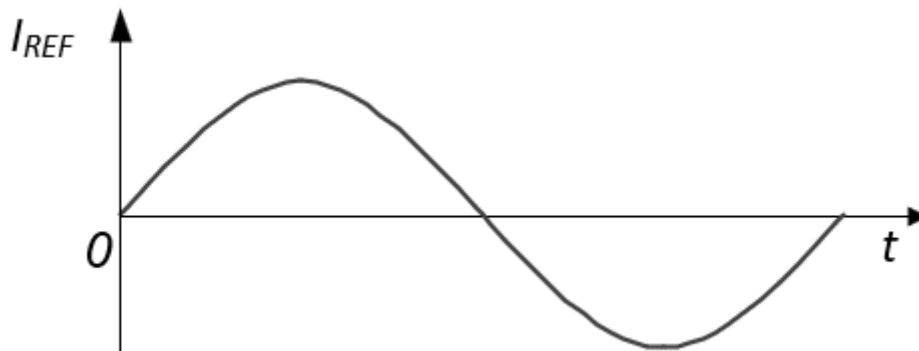


图 6. 使用與傳統 PFC 相同的方法計算 I_{REF} 。來源：德州儀器

3. 如果比較 I_{REF} 和霍爾效應感測器輸出的形狀，就會有相同的形狀；唯一的差異是 DC 偏移。使用等式 10 計算輸入電流回饋訊號， I_{IN} 。圖 7 顯示其波形。

$$I_{IN} = \text{Hall sensor output} - \text{DC offset} \quad (10)$$

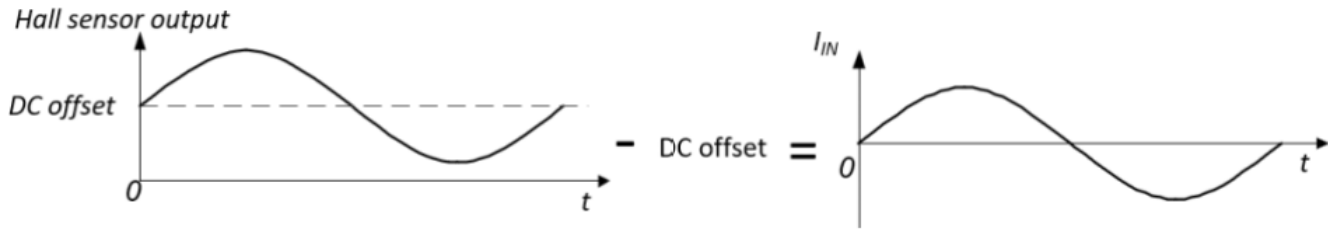


圖 7. 用於計算中 I_{IN} 的霍爾感測器輸出和 DC 偏移的波形。來源：德州儀器

4. 在正 AC 週期期間，控制迴路具有標準負回饋控制。使用方程式 11 計算進入控制迴路的誤差：

$$\text{Error} = I_{REF} - I_{IN} \quad (11)$$

5. 在負 AC 週期期間，電感器電流越高，霍爾效應感測器輸出的值就越低；因此，控制迴路需要從負回饋變更為正回饋。使用方程式 12 計算進入控制迴路的誤差。

$$\text{Error} = I_{IN} - I_{REF} \quad (12)$$

方法 3：負載比前饋控制

總諧波失真 (THD) 要求越來越嚴格，特別是在伺服器與資料中心應用中。若要減少 THD，就必須將控制迴路頻寬提高。高頻寬會減少相位裕度，進而導致迴路不穩定。有限的 PFC 切換頻率也可防止頻寬過高。要解決此問題，您可以向控制迴路添加預先計算的工作週期以生成 PWM；這稱為負載比前饋控制 (d_{FF}) 2, 3。

對於在 CCM 模式下運作的增壓拓撲，方程式 13 所計算 d_{FF} 為：

$$d_{FF} = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (13)$$

此負載比碼型可在開關中有效地產生電壓，其在切換週期內的平均值等於整流輸入電壓。常規電流迴路補償器會根據計算的負載比模式變更負載比碼型。由於升壓電感器在線路頻率下的阻抗非常低，因此負載比的微小變化會在電感器中產生足夠的電壓，以產生所需的正弦電流波形，因此電流迴路補償器不需要有高頻寬。

圖 8 描述產生的控制方案。將計算出的 d_{FF} 相加到傳統平均電流模式控制輸出 d_i ，將產生最終負載比 d ，用於產生 PWM 波形來控制 PFC。

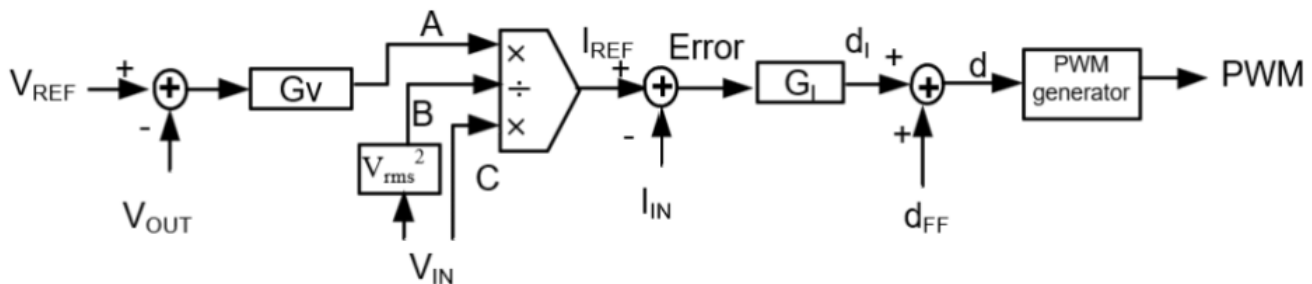


圖 8. PFC 的負載比前饋控制，其中將計算出的 d_{FF} 加到傳統平均電流模式控制輸出 d_i ，將產生最終負載比 d ，用於產生 PWM 波形以控制 PFC。來源：德州儀器

若要在圖騰柱免橋接 PFC 中發揮 d_{FF} 的優勢，請依照下列步驟關閉電流迴路：

1. 按照方法 2 中的步驟 1, 2, 3, 4 和 5 操作。
2. 計算 d_{FF} ，如方程式 14 所示。由於 V_{IN} 是正弦波，其值在負 AC 週期中為負，因此請使用其絕對值進行計算。

$$d_{FF} = \frac{V_{OUT} - |V_{IN}|}{V_{OUT}} \quad (14)$$

3. 使用方程式 15 將 d_{FF} 添加到 G_i 輸出， d_i ，並獲得最終 d 。

$$d = d_i + d_{FF} \quad (15)$$

您也可以對基於硬體狀態機的控制器使用 d_{FF} 控制；有關詳細資訊，請參閱參考 [2]。

關閉電流迴路

關閉圖騰柱免橋接 PFC 的電流迴路不如傳統 PFC 簡單，控制器也可能有所不同。此用電訣竅可幫助您消除圖騰柱免橋接 PFC 中控制迴路實作的混淆，並為您的設計選擇適當方法。

相關內容

- [用電訣竅 #108：免橋接圖騰柱 PFC 中的電流感測應注意事項](#)
- [交錯式升壓與圖騰柱 PFC 拓撲的比較](#)
- [用電訣竅 #116：如何降低 PFC 的 THD](#)
- [用電訣竅 #132：低成本且高準確的電表解決方案](#)

參考資料

1. Dixon, Lloyd. 「[離線電源供應器的高功率因數前置穩壓器](#)。」德州儀器電源供應設計研討會 SEM600，文獻編號 SLUP087，1988 年。
2. Sun, Bosheng. 「[數位控制 PFC 的負載比前饋控制](#)。」Power Systems Design，2014 年 12 月 3 日。
3. Van de Sype, David M, Koen de Gussem é, Alex M van den Bossche 和 Jan A. Melkebeek. “[Duty-Ratio Feedforward for Digitally Controlled Boost PFC Converters](#).” 《IEEE Transactions on Industrial Electronics》第 52 冊，編號 1 (2005 年 2 月)：第 108-115 頁。

先前發佈於 EDN.com。

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 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。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 或任何第三方的知識產權授權許可。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](#) 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 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated