

Markus Zehendner

本應用簡介將說明低功率隔離式拓撲的重要元件：返馳轉換器。此拓撲的最大可實現輸出功率通常在 100 W 範圍內。若輸出功率高於此等級，使用正向拓撲將可提供較好效率。這些拓撲是本系列下個章節主題。

### 返馳式轉換器

返馳拓撲可將輸入電壓升壓和降壓，產生可為正或負的隔離式輸出電壓。當開關 Q1 導通時，能量會儲存在耦合電感器的氣隙中，通常稱為返馳變壓器。當開關 Q1 停止導通，能量則會傳送到輸出端。圖 1 是非同步返馳轉換器的電路圖。

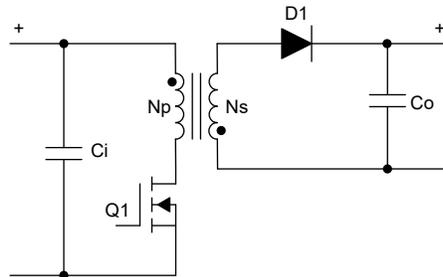


圖 1. 非同步返馳轉換器電路圖

方程式 1 計算連續傳導模式 (CCM) 下的工作週期計算。

$$D = \frac{(V_{OUT} + V_f) \times \frac{n_p}{n_s}}{V_{IN} + (V_{OUT} + V_f) \times \frac{n_p}{n_s}} \quad (1)$$

方程式 2 計算最大金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 應力。

$$V_{Q1} = V_{IN} + (V_{OUT} + V_f) \times \frac{n_p}{n_s} \quad (2)$$

其中

- $V_{IN}$  為輸入電壓
- $V_{OUT}$  為輸出電壓
- $V_f$  為二極體正向電壓
- $n_p / n_s$  是耦合電感器的匝比

耦合電感器的非完美耦合會因儲存在洩漏電感中的能量過多，造成額外電壓突波。因此請為 Q1 選擇含合理裕度的額定電壓。箝位電路通常可減少電壓突波，並需消耗過多能源。一般會讓過衝達反射電壓的 50%，以提供儲存能源的適當整流至輸出端。

方程式 3 可算出最大二極體應力。

$$V_{D1} = V_{OUT} + V_{IN} \times \frac{n_s}{n_p} \quad (3)$$

其中

- $V_{IN}$  為輸入電壓
- $V_{OUT}$  為輸出電壓
- $n_p / n_s$  是耦合電感器的匝比

由於轉換器將能量傳送至二次側的方式，因此返馳轉換器兩端都有脈衝電流。此將導致轉換器兩端出現相當高的電壓漣波。為了符合電磁相容性，可能需要進行額外輸入濾波。如果轉換器需要供應非常敏感的負載，輸出端的第二級濾波器可幫助抑制輸出電壓漣波。

運用升壓或通用脈衝寬度調變控制器即可建立返馳轉換，因為轉換器只需要低側開極驅動器。若為低輸出功率，升壓轉換器積體電路 (IC) (搭載整合式 MOSFET) 為可行選項。

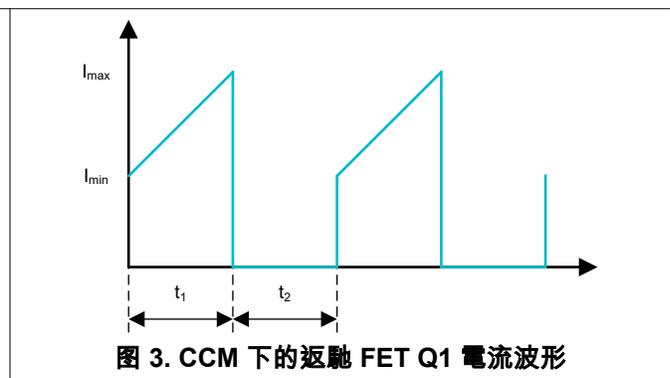
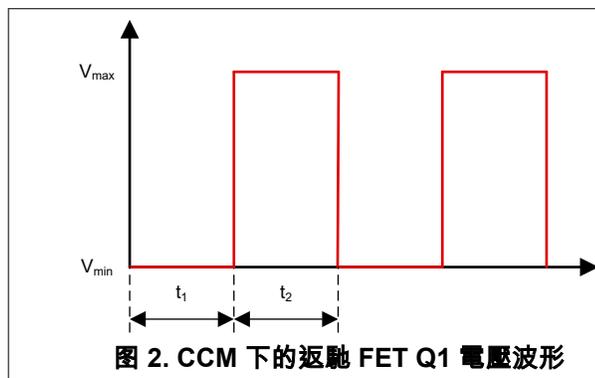
就動態行為而言，隔離式回饋路徑和右半平面零 (RHPZ) 中的光耦合器是返馳轉換器可實現調節頻寬的主要限制因素。如果回饋路徑中沒有光耦合器，或是頻寬大於 RHPZ 頻率，可達的最大頻寬將約是 RHPZ 頻率的五分之一。但大多數設計皆偏向選擇 RHPZ 頻率的十分之一，以提供足夠的相位與增益裕度。方程式 4 可計算返馳轉換器傳輸功能的單 RHPZ 頻率。

$$f_{RHPZ} = \frac{V_{OUT} \times (1-D)^2}{2 \times \pi \times D \times \frac{L_p}{\left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2} \times I_{OUT}} \quad (4)$$

其中

- $V_{OUT}$  為輸出電壓
- $D$  是工作週期
- $I_{OUT}$  為輸出電流
- $L_p$  是耦合電感器的主要電感
- $n_p / n_s$  是耦合電感器的匝比

圖 2 到 圖 7 顯示非同步返馳轉換器中 FET Q1、主要電感器  $N_p$  和二極體 D1 在 CCM 下的電壓和電流波形。



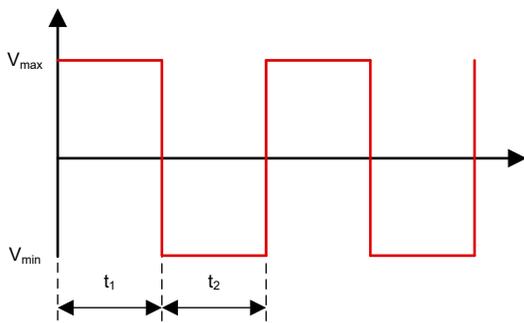


图 4. CCM 下的返馳主要電感器 Np 電壓波形

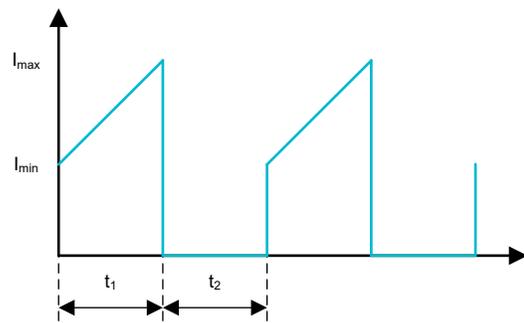


图 5. CCM 下的返馳主要電感器 Np 電流波形

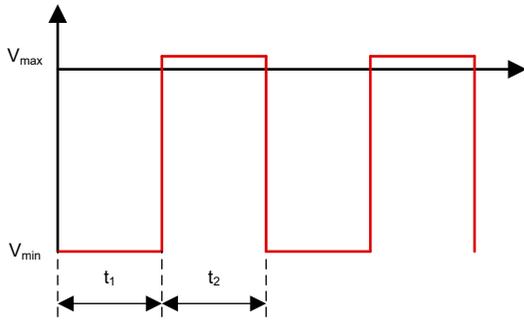


图 6. CCM 下的返馳二極體 D1 電壓波形

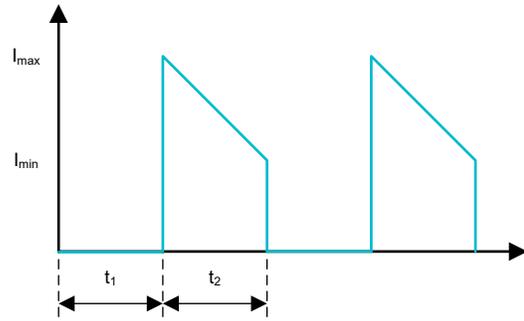


图 7. CCM 下的返馳二極體 D1 電流波形

低功耗或低輸出電流返馳轉換器通常設計成在非連續導通模式 (DCM) 下運作，以將變壓器尺寸、重量和成本降到最低。此方法的另一個優點是  $R_{HPZ}$  頻率會移至大於 100 kHz 的區域，可提供比在 CCM 下更高的調節頻寬。

方程式 5 計算 DCM 下的工作週期。

$$D = f_{\text{switch}} \times \sqrt{2 \times I_{\text{OUT}} \times L_p \times \frac{V_{\text{OUT}} + V_f}{f_{\text{switch}} \times V_{\text{IN}}^2}} \quad (5)$$

其中

- $f_{\text{switch}}$  是切換頻率
- $V_{\text{IN}}$  為輸入電壓
- $V_{\text{OUT}}$  為輸出電壓
- $V_f$  為二極體正向電壓
- $I_{\text{OUT}}$  為輸出電流
- $L_p$  是耦合電感器的主要電感

图 8 到 图 13 顯示非同步返馳轉換器中 FET Q1、主要電感器  $N_p$  和二極體 D1 在 DCM 下的電壓和電流波形。

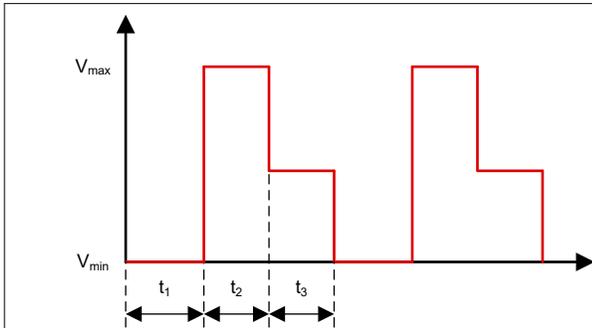


图 8. DCM 下的返馳 FET Q1 電壓波形

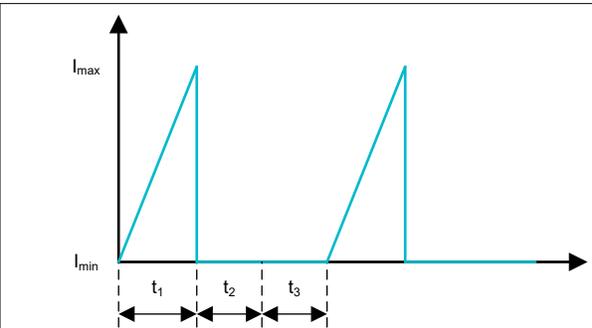


图 9. DCM 下的返馳 FET Q1 電流波形

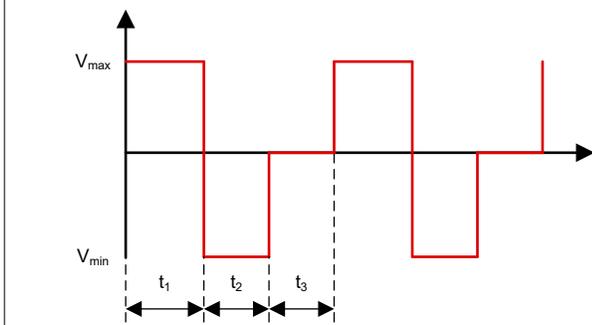


图 10. DCM 下的返馳主要電感器  $N_p$  電壓波形

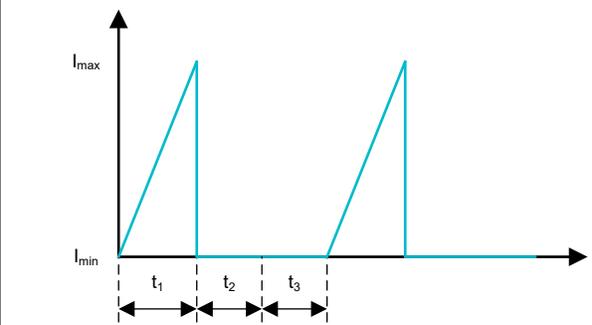


图 11. DCM 下的返馳主要電感器  $N_p$  電流波形

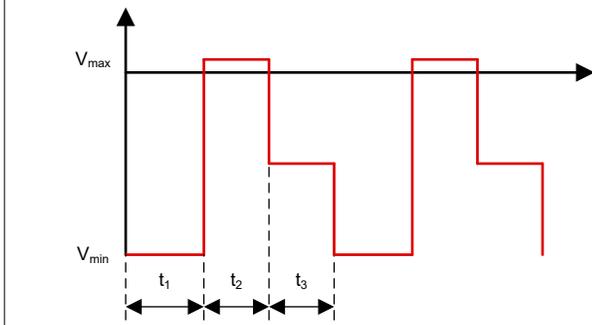


图 12. DCM 下的返馳二極體 D1 電壓波形

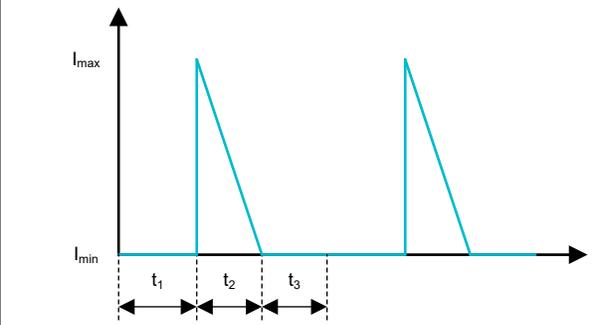


图 13. DCM 下的返馳二極體 D1 電流波形

## 輸出電壓調節概念

視應用而定，共有兩種不同選項可將隔離式輸出電壓回饋至一次側的控制器：

- 二次側調節 (SSR)，通常會使用光耦合器將回饋資訊從二次側傳輸至一次側。光耦合器的頻寬有限，當 RHPZ 頻率相當高時，可能會影響最大可實現調節頻寬。光耦合器中玻璃鈍化的老化影響在某些應用中可能會造成損害。這些應用則需採用一次側調節或隔離式放大器電路。
- 一次側調節 (PSR) 需仰賴一次側的可用資訊，例如輔助返馳變壓器繞組的整流電壓。調節準確度則取決於二級繞組與輔助繞組間的耦合。建議使用 > 99% 的耦合係數，以獲得良好輸出調節。輔助繞組可允許最少 5 mA 至 10 mA 的負載電流，以獲得良好的雜訊抗擾性及調節。其他有些概念只分析及使用主要繞組的反射電壓進行調節，因此若輸入能以有效率的方式供應控制器，即可淘汰輔助繞組。使用一次側穩壓時，二次整流器的壓降會隨負載電流變化。除非 IC 具備專用的整合功能，否則控制 IC 將無法補償此效應。當二次電流下降到 0 A 時，TI 的控制器會在消磁時間結束時採集電壓取樣。此將消除二極體壓降的影響，因為二極體不會導通任何電流。一個優異的非同步一次側調節設計若沒有這種功能，負載和輸入電壓範圍中的輸出電壓會有  $\pm 5\%$  偏差。

在耦合電感器中增加額外二次繞組，則可利用返馳產生多重隔離輸出。但如果這些多重輸出也彼此隔離，則只有其中一個輸出能夠被適當調節。多數設計皆偏向選擇具最高電流等級的繞組，以達到令人滿意的調節結果。

我們建議在負載電流超過 2 A 時使用同步整流，特別是當需要很高效率或需避免外部散熱器時。同步整流器可由一次側控制，也可採用自我驅動概念，後者通常是較符合成本效益的選擇。

## 其他資源

- 觀看 TI 訓練影片: [拓撲教學課程：什麼是返馳？](#)
- 使用 [Power Stage Designer](#) 設計您的功率級。
- 下載 [電源拓撲手冊](#) 和 [電源拓撲快速參考指南](#)。

## 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