

Markus Zehendner

此拓撲應用簡介系列第五章將介紹反相降壓升壓轉換器和 Ćuk 轉換器。兩種拓撲都允許從正輸入電壓產生負輸出電壓。

反相降壓升壓轉換器

反相降壓升壓拓撲可在輸出電壓為負時，進行輸入電壓升壓及降壓。當開關 Q1 未導通時，能量會從輸入轉移到輸出端。圖 1 說明非同步反相降壓升壓轉換器的電路圖。

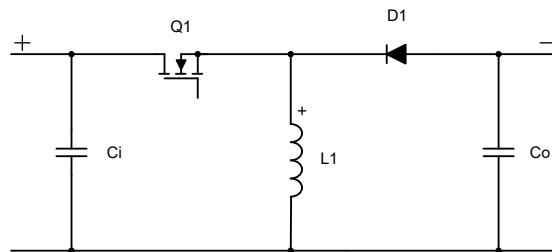


圖 1. 非同步反相降壓升壓轉換器電路圖

方程式 1 將連續傳導模式 (CCM) 下的工作週期計算為：

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

方程式 2 將最大金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 應力計為：

$$V_{Q1} = V_{IN} + V_f - V_{OUT} \quad (2)$$

方程式 3 將最大二極體應力計算為：

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} \quad (3)$$

其中

- V_{IN} 為輸入電壓
- V_{OUT} 為輸出電壓
- V_f 為二極體正向
- V_{OUT} 的值在三個數學關係式中都必須為負值。

由於沒有指向反相降壓升壓轉換器輸入或輸出的電感器電容器 (LC) 濾波器，此拓撲在轉換器兩端都會產生脈衝電流，進而導致相當高的電壓漣波。為了符合電磁干擾 (EMI) 規範，可能需要進行額外輸入濾波。如果轉換器需要提供非常敏感的負載，輸出端的第二級濾波器可能無法對輸出電壓漣波提供足夠抑制。在這種情況下，建議改為使用 Ćuk 轉換器。

由於需要 P 通道 MOSFET 或高側 MOSFET 驅動器，因此可使用降壓控制器或轉換器建立反相降壓升壓轉換器。但控制器或轉換器積體電路 (IC) 的接地端子必須連接至負輸出電壓。接著 IC 會調節接地訊號與負輸出電壓。

右半平面零 (RHPZ) 是反相降壓升壓轉換器可實現調節頻寬的限制因素。最大頻寬約為 RHPZ 頻率的五分之一。

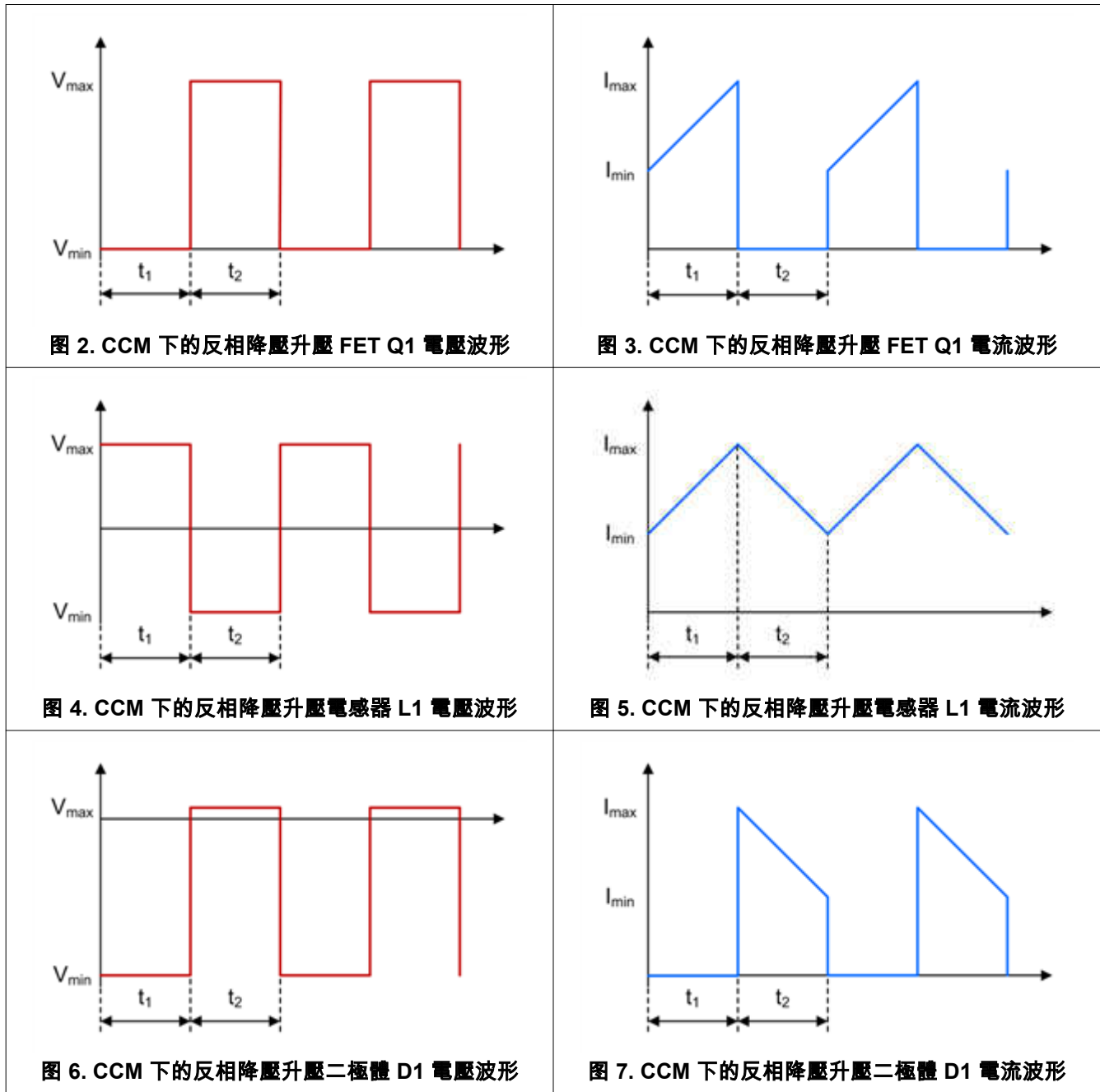
方程式 4 可計算反相降壓升壓轉換器傳輸功能的單 RHPZ 頻率：

$$f_{RHPZ} = \frac{V_{OUT} \times (1 - D)^2}{2 \times \pi \times D \times L_1 \times I_{OUT}} \quad (4)$$

其中

- V_{OUT} 為輸出電壓
- D 是工作週期
- I_{OUT} 為輸出電流
- L_1 為電感器 L_1 的電感。
- V_{OUT} 和 I_{OUT} 的值都必須為負值。

圖 2 到 圖 7 顯示同步反相降壓升壓轉換器中 FET Q1、電感器 L_1 和二極體 $D1$ 的電壓和電流波形。



Ćuk 轉換器

Ćuk 拓撲可在輸出電壓為負時，進行輸入電壓升壓及降壓。當開關 Q1 未導通時，能量會從輸入轉移到輸出端。
圖 8 說明非同步 Ćuk 轉換器的電路圖。

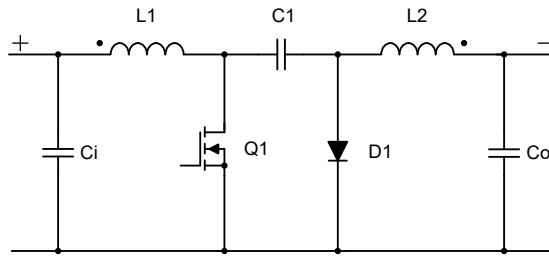


圖 8. 非同步 Ćuk 轉換器原理圖

方程式 5 將 CCM 下的工作週期計算為：

$$D = \frac{-V_{OUT} + V_f}{-V_{OUT} + V_f + V_{IN}} \quad (5)$$

方程式 6 將最大 MOSFET 應力計算為：

$$V_{Q1} = V_{IN} - V_{OUT} + V_f + \frac{V_{C1, ripple}}{2} \quad (6)$$

方程式 7 將最大二極體應力計算為：

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} + \frac{V_{C1, ripple}}{2} \quad (7)$$

其中

- V_{IN} 為輸入電壓
- V_{OUT} 為輸出電壓
- V_f 是二極體正向電壓
- $V_{C1, ripple}$ 是耦合電容器 C1 的電壓漣波

V_{OUT} 的值在三個數學關係式中都必須為負值。

Ćuk 轉換器中的 LC 濾波器 L2 / Co 會指向輸出。由於輸出電流為連續電流，因此輸出漣波相當小。檢視輸入時，會有另一個具 L1 / Ci 的 LC 濾波器。故輸入電流也為連續電流，導致輸入漣波也非常小。因此 Ćuk 轉換器非常適合需要負輸出電壓，且在輸入和輸出 (例如電信電源) 上非常敏感的應用。

您可使用升壓控制器輕鬆建立 Ćuk 轉換器，因為 MOSFET Q1 需在低側驅動。升壓轉換器或控制器 IC 通常只接受回饋接腳的正回饋電壓。使用簡易的反相運算放大器電路，可將負輸出電壓轉換為正電壓訊號。

Ćuk 轉換器也有 RHPZ。功率級控制無法立即對輸出的變化作出反應，因為開關 Q1 關閉時能量無法傳送至輸出。最大可實現交越頻率同樣是 RHPZ 頻率的五分之一。請注意，Ćuk 轉換器有一個以上的 RHPZ。方程式 8 將 Ćuk 轉換器其中一個 RHPZ 計算如下：

$$f_{RHPZ} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{1-D}{L_1 \times C_1}} \quad (8)$$

其中

- D 是工作週期
- L_1 為電感器 L1 的電感
- C_1 是耦合電容器 C1 的電容

圖 9 到 圖 18 說明非同步 Ćuk 轉換器中 FET Q1、電感器 L1、耦合電容器 C1、二極體 D1 和電感器 L2 在 CCM 下的電壓和電流波形。

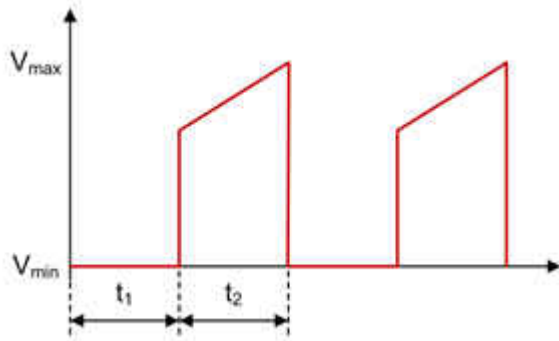


图 9. CCM 下的 Ćuk FET Q1 電壓波形

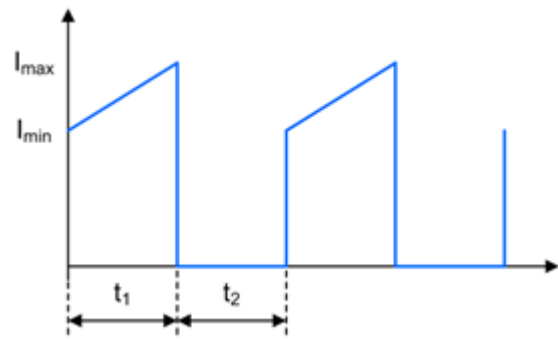


图 10. CCM 下的 Ćuk FET Q1 電流波形

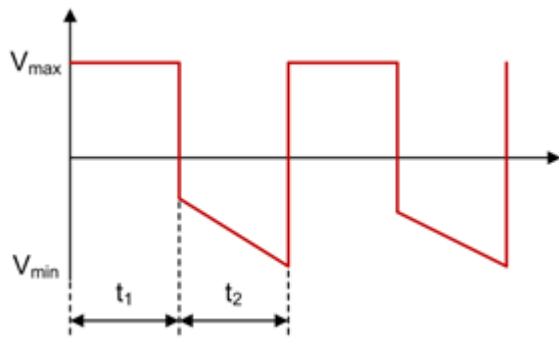


图 11. CCM 下的 Ćuk 電感器 L1 電壓波形

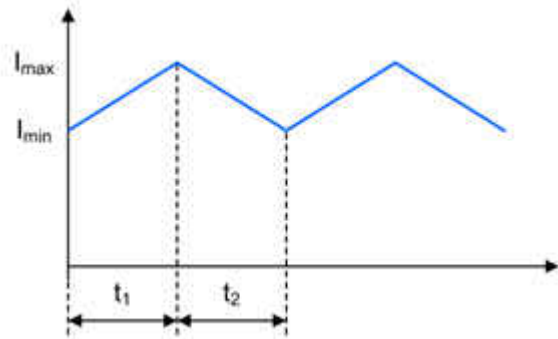


图 12. CCM 下的 Ćuk 電感器 L1 電流波形

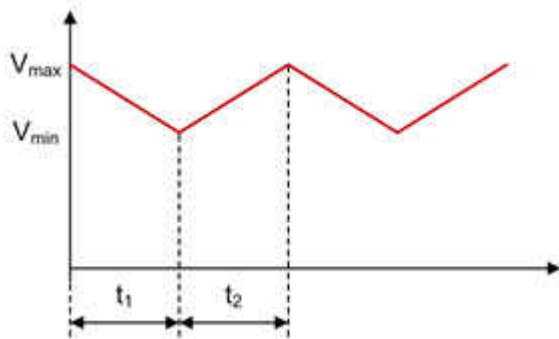


图 13. CCM 下的 Ćuk 耦合電容器 C1 電壓波形

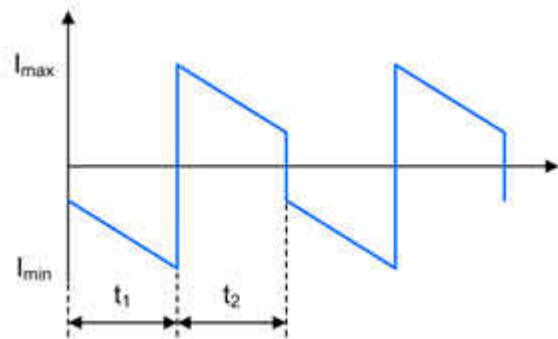


图 14. CCM 下的 Ćuk 耦合電容器 C1 電流波形

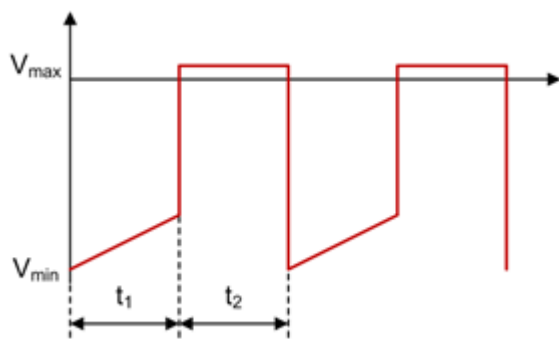


图 15. CCM 下的 Ćuk 二極體 D1 電壓波形

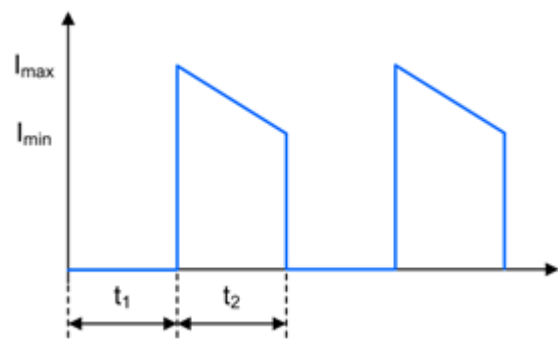


图 16. CCM 下的 Ćuk 二極體 D1 電流波形

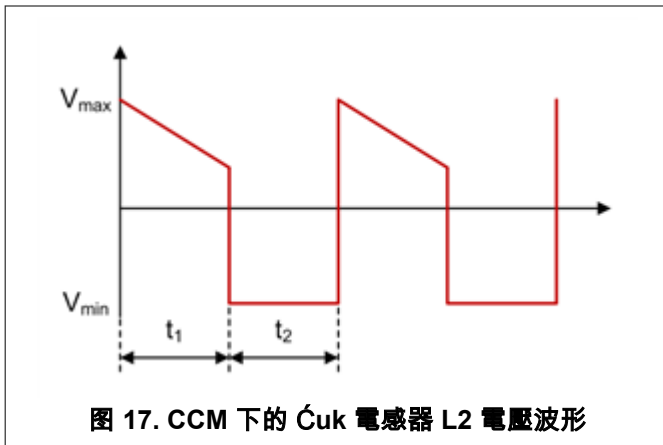


图 17. CCM 下的 Ćuk 電感器 L2 電壓波形

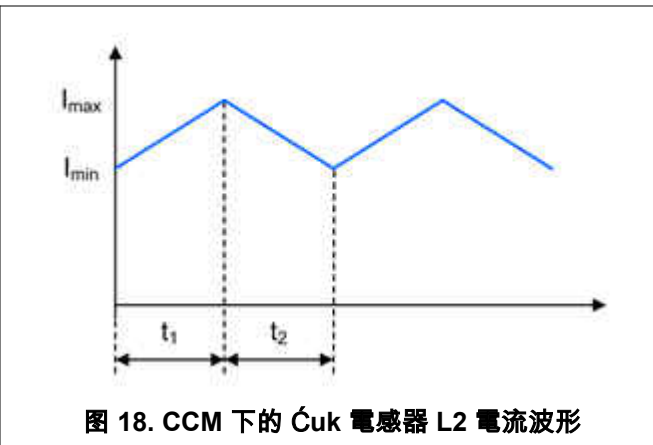


图 18. CCM 下的 Ćuk 電感器 L2 電流波形

如同單端主要電感轉換器 (SEPIC) 和 Zeta 轉換器，在 Ćuk 轉換器以耦合電感器取代兩個獨立電感器也是合理的作法。使用耦合電感器可提供兩個優點：第一個優點是因為耦合繞組會造成漣波消除，所以相較於雙電感器設計，只需要一半電感。第二個優點是轉換函數中由兩個電感器和耦合電容器所引起的共振可被移除。這種共振通常需由電阻電容器 (RC) 網路抑制，並與耦合電容器 C_1 並聯。

使用耦合電感器的其中一個缺點，是兩個電感器必須使用相同電感值。耦合電感器另一個限制通常是其額定電流。對高輸出電流應用來說，除了使用單一電感器外，可能沒有其他可用選項。

如果應用需要輸出電流大於 3 A，可將反相降壓升壓和 Ćuk 轉換器配置成具同步整流的轉換器。如果為 Ćuk 轉換器部署同步整流，則需對高側閘極驅動訊號進行 AC 耦合，因為需要許多控制器才能將其連接至切換節點。Ćuk 轉換器有兩個切換節點，所以要注意避免在切換接腳發生違反負電壓額定值的情況。

其他資源

- 觀看這些 TI 訓練影片：
 - 「[拓撲教學課程：什麼是反相降壓升壓？](#)」
 - 「[拓撲教學課程：什麼是 Ćuk 轉換器？](#)」
- 「[在反相降壓升壓拓撲中使用降壓轉換器。](#)」
- 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