

Technical Article

如何設計高電壓 DCM 反向電荷泵轉換器



John Betten

在先進駕駛輔助系統、聲納應用的超聲波換能器以及通訊設備中，皆需使用低電流、負極性高電壓來偏置感測器。返馳式、Cuk 和反向降壓升壓轉換器都是可行的解決方案，但這些方案會因笨重的變壓器（返馳式和 Cuk）或受控制器輸入電壓額定值限制最大負電壓（反向降壓升壓）而受到影響。在這篇電源技巧中，我將詳細介紹一種轉換器的運作方式，該轉換器將單一電感器與工作在不連續傳導模式 (DCM) 的反向電荷泵配對使用。搭配接地參考的升壓控制器，能以更低的系統成本產生大負電壓輸出。

圖 1 展示簡化的功率級電路圖。需要注意的是，此電路圖與傳統的反向降壓升壓轉換器不同，傳統設計會讓控制器「浮接」在 V_{IN} 和 $-V_{OUT}$ 之間。在該轉換器中，可實現的最大 $-V_{OUT}$ 取決於控制器的最大 V_{CC} 減去最大輸入電壓。這將使得要找到能驅動 N 通道場效應電晶體 (FET) 以實現 $-100V$ 或更高輸出電壓的控制器幾乎不可能。

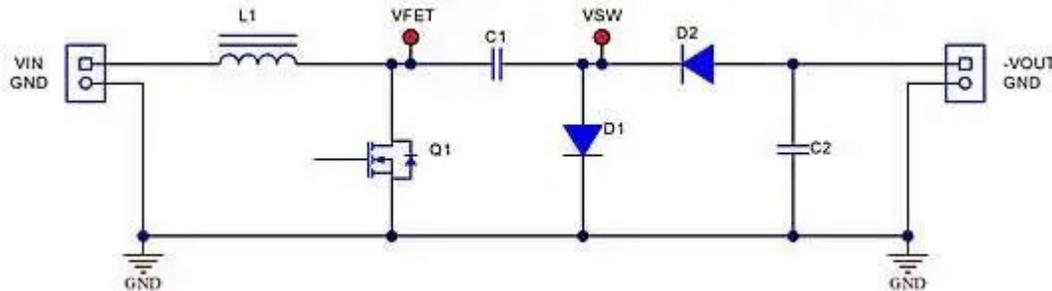


圖 1. 電感驅動型反向電荷泵的簡化功率級電路

電路的操作可以分為三個工作階段 (圖 2)。在第一工作階段，FET 在工作週期 (d) 期間保持開啟，使 V_{IN} 施加於電感兩端，電流從零開始線性上升並儲存能量。然而，在前一個工作週期中， $C1$ (其兩端電壓約等於 V_{OUT}) 已耗盡其多餘儲存能量，使 $D1$ 和 $D2$ 處於反向偏壓狀態。因此，在此工作階段中並未顯示 $D1$ 、 $D2$ 與 $C1$ 。 $C2$ 供應所有負載電流。

在下一工作階段 d' 期間，FET 關閉，電感電流開始放電，導致其電壓極性反轉。這將使 VFET 節點電壓大幅升高，從而讓 $C1$ 能夠透過 $D1$ 進行再充電。在此工作階段期間，電流呈線性下降，直至 $D1$ 關閉。然而，由於 $D1$ 的反向恢復特性，電流在最終關閉前會先進入負值區域，此時電感電流斜率發生變化，其電壓極性再次反轉。

第三工作階段 d'' 是能量從 $C1$ 轉移至 $C2$ 的過程。當 $D1$ 停止導通時，電感電壓會被箝位在 V_{IN} ，這是因為透過 FET 本體二極體的電流路徑將 VFET 節點電壓強制下拉至接地電位。電流會持續流經 $D2$ ，直到 $C1$ 與 $C2$ 兩端電壓達到平衡；而流經 FET 本體二極體的電流則會持續至電感電流降為零為止。此時，電感兩端電壓會驟降並與電路寄生參數產生共振，此現象將持續直至 FET 再次導通為止。

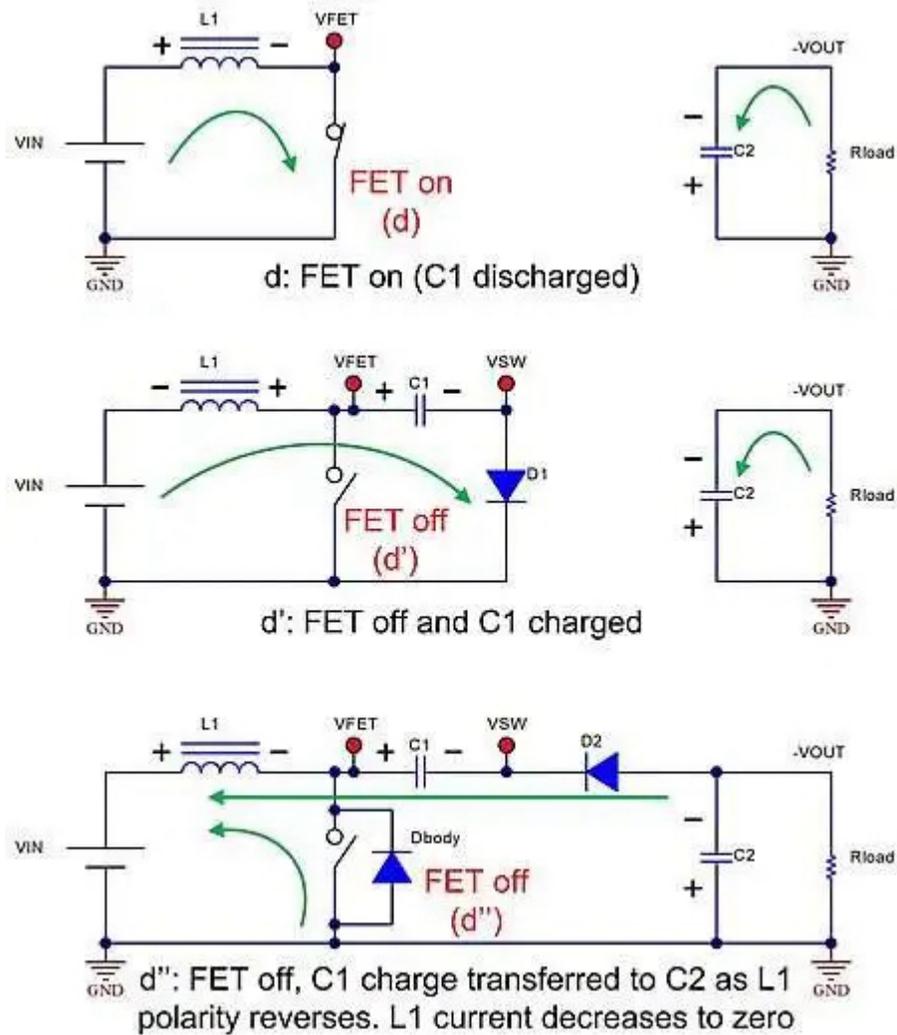


图 2. DCM 運作的三個階段

图 3 詳細說明主要電壓和電流波形。DCM 的運作雖可實現最小電感量，但會伴隨較高的峰值電流。DCM 下的電感值取決於最大工作週期、最低 V_{IN} 和全負載條件。務必對照控制器產品規格表確認最大工作週期，但通常可選擇 60%-90% 範圍，否則可能發生脈衝跳躍現象。較大的電感值會使電路進入連續導通模式 (CCM)，因為電流在下次切換週期開始前將無法歸零。這將導致使用可能大於實際需求的電感器，且需格外注意以避免次諧波振盪。

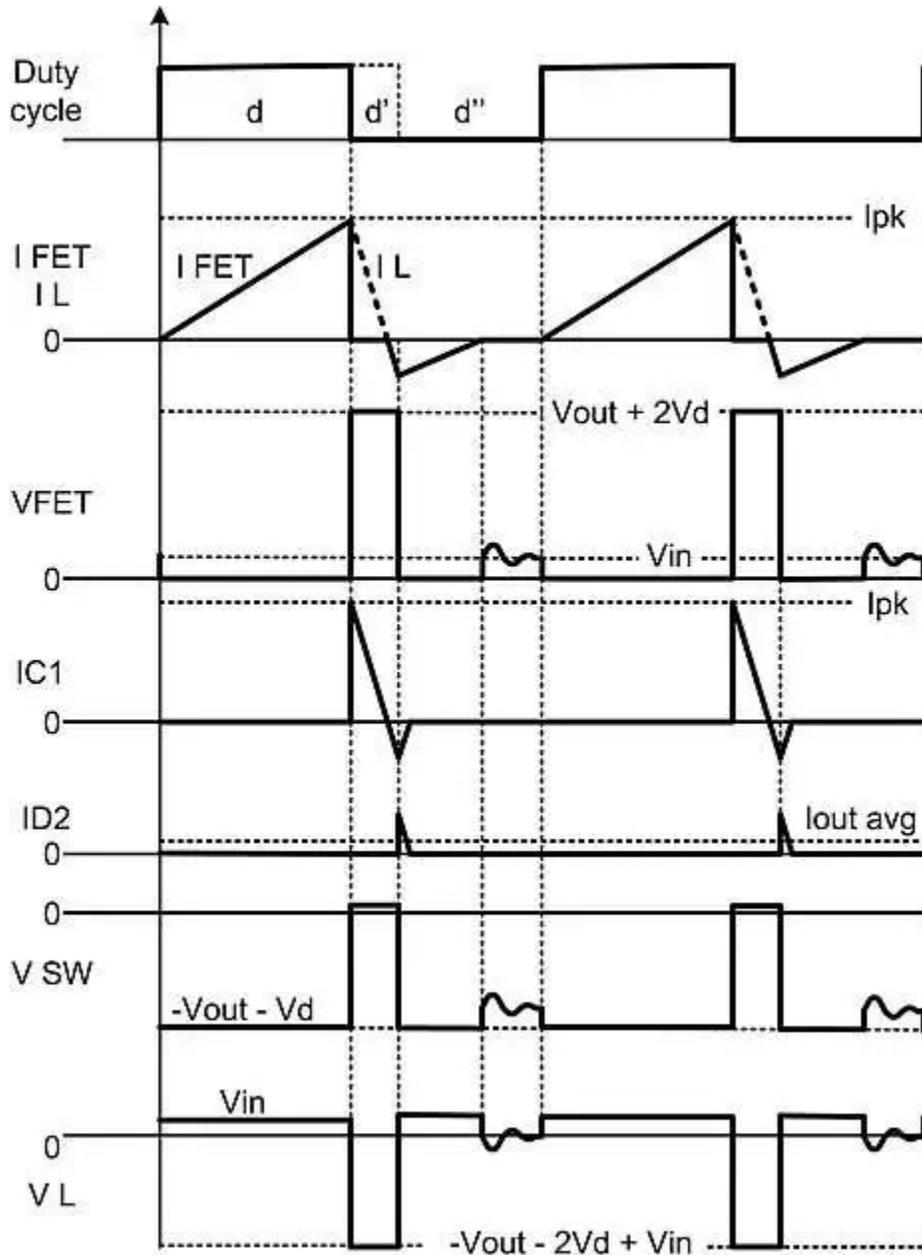


图 3. DCM 中的主要电路波形

設計方程式

在 DCM 運作下，方程式 1 完整描述了電感儲存能量的關係：

$$\frac{1}{2} * L * i_{pk}^2 * f_{sw} = \frac{V_{out}^2}{R_{load} * \eta} \quad (1)$$

其中 i_{pk} 是峰值電感器電流， η 則是轉換器的效率。峰值電感器電流等於方程式 2：

$$i_{pk} = \sqrt{\frac{2 * V_{out}^2}{R_{load} * L * f_{sw} * \eta}} \quad (2)$$

由以下兩個方程式推導，方程式 3 將工作週期 (d) 表示為以下參數的函數：

$$V_L = L \frac{di}{dt} \text{ and } d = dt * f_{sw}, \text{ then, } d = \frac{di * L * f_{sw}}{V_L} \quad (3)$$

由於 V_{IN} 代表 FET 導通時電感兩端的電壓，而 i_{pk} 是工作週期 d 結束時的電感峰值電流，將方程式 2 代入方程式 3 後，即可推導出方程式 4 與方程式 5：

$$d = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw}}{R_{load} * \eta}} \quad (4)$$

$$\text{or, } L = \frac{V_{in}^2 * d^2 * R_{load} * \eta}{2 * V_{out}^2 * f_{sw}} \quad (5)$$

平均負載電流由工作階段 d' 期間的方程式 6 與方程式 7 所描述的幾何關係決定：

$$\frac{V_{out}}{R_{load}} = \frac{i_{pk} + d r}{2} \quad (6)$$

$$\text{or, } d' = \frac{2 * V_{out}}{i_p * R_{load}} \quad (7)$$

將方程式 2 代入方程式 7 可得到方程式 8：

$$d' = \sqrt{\frac{2 + L * f_{sw} * \eta}{R_{load}}} \quad (8)$$

這段時間的剩餘部分定義為 d'' ，此時能量轉移到 C2，且剩餘電感電流放電至零（方程式 9）：

$$d'' = 1 - d - d' = 1 - \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw}}{R_{load} * \eta}} - \sqrt{\frac{2 * L * f_{sw} * \eta}{R_{load}}} \quad (9)$$

圖 4 展示了一個實現此轉換器的範例電路圖，其採用電壓倍增器結構，使每個功率級元件的電壓應力均等於輸出總電壓的一半。這提供了更廣泛的元件選擇範圍。在此應用中，電感值的計算方式假設輸出電壓為一半，但負載電流為兩倍。

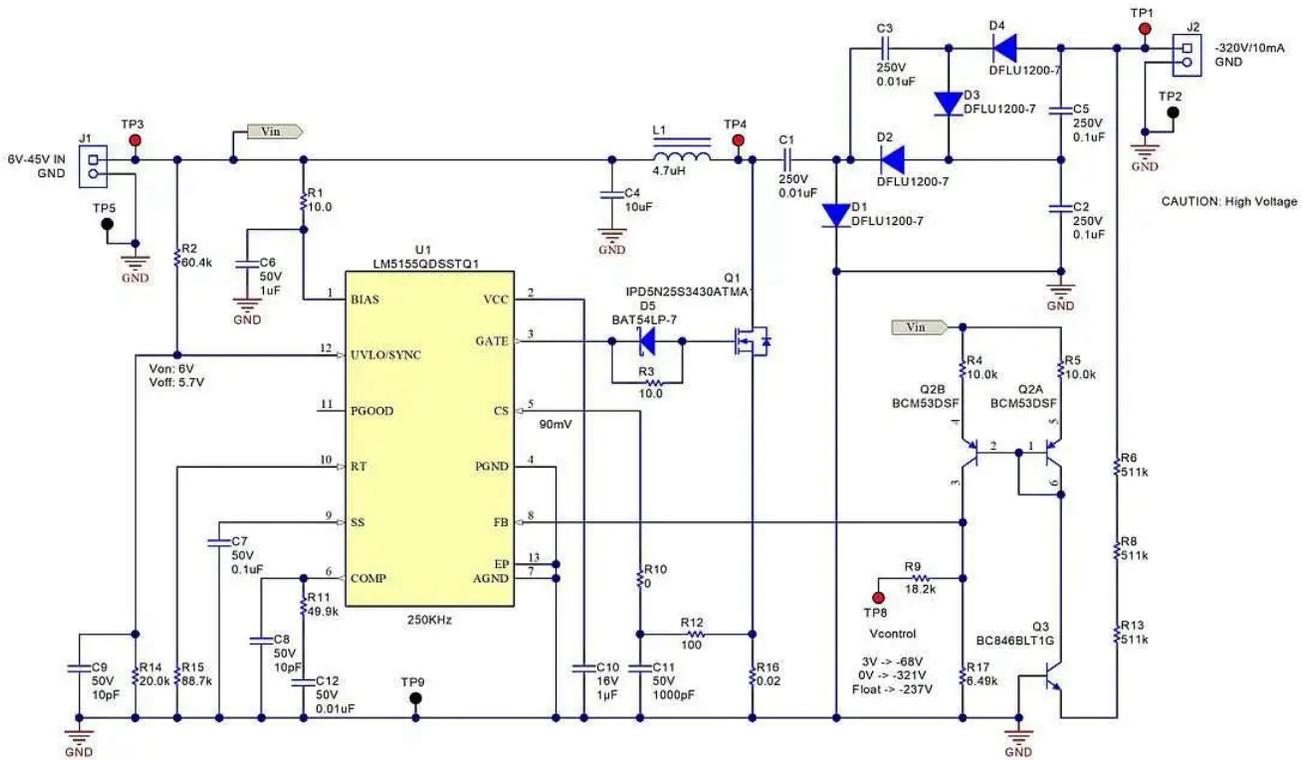


图 4. 帶電壓倍增器與位準偏移電流鏡的電感驅動式反向電荷泵電路圖

該轉換器採用單一電感結構，能以小型化設計產生大負電壓。此外，該設計可使用成本較低的接地參考升壓控制器來驅動 N 通道 FET。

如需其他用電訣竅，請參閱 Power House 上的 TI 用電訣竅部落格系列。

其他資源

- 用電訣竅：透過電壓倍增器提升輸出電壓，EETimes
- 使用 TPS5430 作為反向降壓升壓轉換器（版本 A），TI 應用報告

相關文章

- 電荷泵拓撲結構實現電壓倍增並切斷 DC 路徑
- 改良式電荷泵電路可從數位訊號提取電能
- 電荷泵轉換器 IC 細節解析
- SEPIC/Ćuk 轉換器發展出第二個輸出
- 非連續傳導會對電流模式轉換器造成問題

先前已發表於 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