

## Technical Article

## 高頻共振轉換器設計考量，第 1 部分



Sheng-Yang Yu

高頻共振轉換器的設計考量包括元件選擇、採用寄生參數設計、同步整流器設計和電壓增益設計。本篇電源技術指南將重點放在影響切換元件選擇的主要參數，以及變壓器繞組內電容在高頻共振轉換器中的影響。

寬能隙 (WBG) 裝置在過去十年進入商業化，使電源轉換器能以更高的頻率運作，達到更高的功率密度。高性能電源供應器才剛開始採用 WBG 裝置 - 尤其是碳化矽和氮化鎵場效電晶體 (FET) - 因為其輸出電容 ( $C_{oss}$ )、關極電荷 ( $Q_g$ )、導通電阻 ( $R_{DS(on)}$ ) 和反向復原電荷 ( $Q_{rr}$ ) 在相同電壓崩潰位準下都比矽或矽超接面場效電晶體 (FET) 更低 (或不存在)。較低的  $Q_g$  可減少所需的驅動功率 -  $P_{drive} = V_{drive} Q_g F_{sw}$  - 較低的  $R_{DS(on)}$  可減少傳導損耗，其中  $V_{drive}$  為驅動電壓， $F_{sw}$  為 FET 切換頻率。除了  $Q_g$  和  $R_{DS(on)}$  以外，在選擇高頻轉換器元件時也必須考量  $C_{oss}$  和  $Q_{rr}$ 。

在如 圖 1 中所示的電感器-電感器-電容器-串聯共振轉換器 (LLC-SRC) 等共振轉換器中，共振電路中的電流會對 FET 的  $C_{oss}$  充電 / 放電 (圖 2 中的狀態 1)，以實現零電壓切換 (ZVS)。ZVS 表示 FET 汲極至源極電壓 ( $V_{DS}$ ) 在關極電壓升高前達到零。因此，在相同共振電路電流位準下，較低的  $C_{oss}$  可縮短失效時間，以達到 ZVS。失效時間較短，表示一次側共振電路與 FET 上的工作週期較大，均方根 (RMS) 電流較低，也等於效率較高，轉換器能以較高的切換頻率運作。

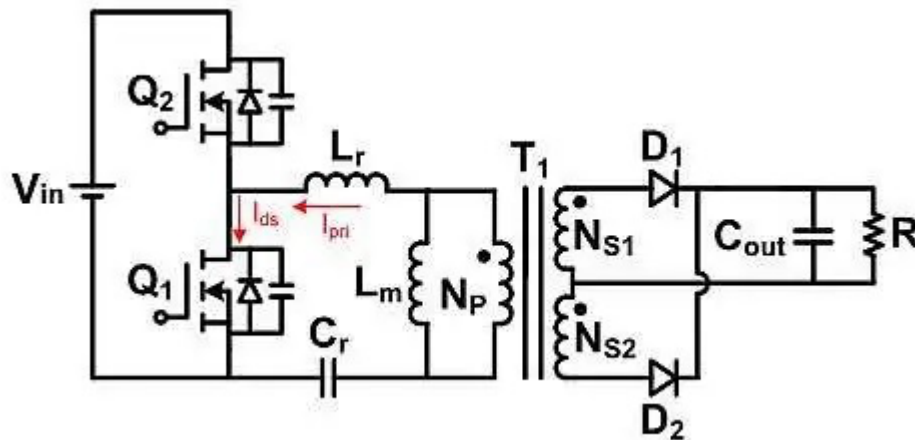


圖 1. LLC-SRC

為了達到 ZVS，FET 的本體二極體始終會在一段時間內傳導電流 (圖 2 中的狀態 2)。如果 FET 有  $Q_{rr}$ ，且在本體二極體仍傳導電流時再次開啟，FET 本身將產生反向電流以放電  $Q_{rr}$ ，並造成硬切換和高電壓應力，可能使 FET 損壞。

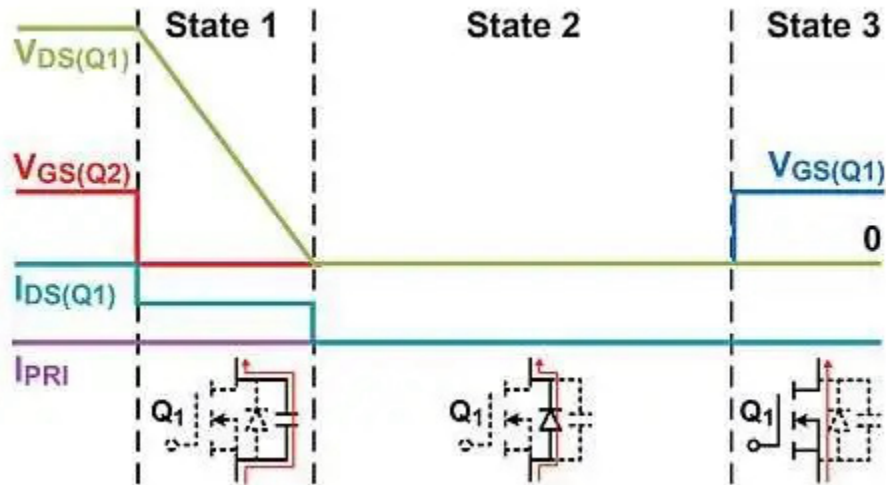


图 2. LLC-SRC 的切换转换

图 3 说明 LLC-SRC 启动过程中的这种硬切换现象，如中图 1 所示。当 FET  $Q_2$  首次传导电流时，会建立电感器电流  $I_{PRI}$ 。电流  $I_{PRI}$  接著会透过 FET  $Q_1$  通道和本体二极体进行传导。在不允许电流反向流动的情况下，FET  $Q_2$  会再次开启。由于  $Q_{rr}$  存在，FET  $Q_1$  自生成反向电流以放电  $Q_{rr}$ ，进而导致高电压应力。

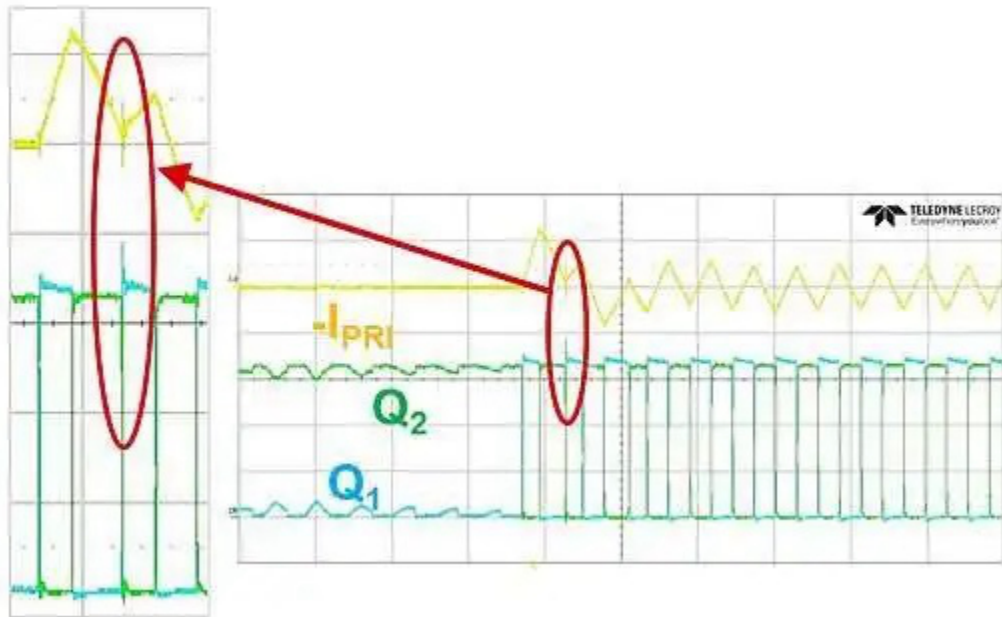


图 3.  $Q_{rr}$  引起的硬切换

在高频共振转换器中，共振电路阻抗通常远低于低频共振转换器中的阻抗。因此，高频共振转换器中的启动突波电流预期会更高。以图 1 中的 LLC-SRC 为例，当输出电压为零（启动时的初始条件）时， $Q_2$  首次传导时限制启动电流的唯一阻抗是  $L_r$  - LLC-SRC 中的串联共振电感器。为了改善效率，在设计高效率且高频的共振转换器时，特别是汇流排转换器，通常会将  $L_r$  降到最低。较小的  $L_r$  值会使相同启动频率下的启动电流变高，因此更容易受到  $Q_{rr}$  相关硬切换的影响。因此，必须在高频共振转换器中使用低  $Q_{rr}$  FET。

运用前面提到的 WBG 装置优势，便可在百万赫范围内操作隔离式共振转换器，其速度比传统隔离式电源供应器快 5 到 10 倍。在这个「较高的频域」中，许多从前在转换器设计过程中被视为「可忽略」的参数不再能忽略，例如变压器绕组内电容器。

在傳統共振轉換器設計過程中，設計人員必須確保共振電路中儲存的能源高於 FET  $C_{oss}$  儲存的能源，如此  $C_{oss}$  才能消耗共振電路中儲存的能源，以達到 ZVS。以 圖 1 中所示的 LLC-SRC 為例，方程式 1 可確保此不平衡性的有效性：

$$L_m I_{Lm}^2 \geq 2C_{oss} V_{in}^2 \quad (1)$$

其中  $I_{Lm}$  是磁化電感器  $L_m$  的峰值電流， $V_{in}$  則是 LLC-SRC 的輸入電壓。可對  $L_m$  套用電感器的歐姆定律，將方程式 1 重寫為方程式 2：

$$L_m \leq \frac{n^2 V_{out}^2}{32C_{oss} V_{in}^2 F_{sw}^2} \quad (2)$$

其中  $n = N_p : N_{s1}$  ( 假設  $N_{s1} = N_{s2}$  ) 是變壓器匝比， $V_{out}$  是輸出電壓。

當共振轉換器的設計需要涵蓋廣泛的運作範圍和保持時間時， $L_m$  通常要遠低於方程式 2 右側的值，才能使  $L_n = L_m / L_r$  保持在低位 ( 在閉合迴路 LLC-SRC 設計中套用 4 至 10 的  $L_n$  值 )。當匯流排轉換器等共振轉換器設計需要高轉換器效率時，將  $L_m$  最大化會降低主要 RMS 電流，進而降低傳導損耗。在此情況下， $L_m$  值將關閉方程式 2 右側的值。然而，方程式 2 僅代表使用理想變壓器時的理想條件。在實際的變壓器中，仍有許多參數可能影響  $C_{oss}$  的充電及放電能力。其中最重要的參數就是繞組內電容。

圖 4 顯示 LLC-SRC 切換瞬態期間的簡化電路模型，其中  $L_m$  ( $I_{Lm}$ ) 上的電流會放電  $C_{eq}$  ( 與共振電容器  $C_r$  串聯的兩個 FET 的  $C_{oss}$  )，假設  $C_r$  為電壓來源。如果沒有變壓器繞組內電容 ( $C_{TX}$ )，所有  $I_{Lm}$  都會轉至  $C_{eq}$ ，使方程式 2 有效。但隨著  $C_{TX}$  的出現，部分  $I_{Lm}$  必須轉為  $C_{TX}$  以改變變壓器繞組極性，如此將降低  $C_{oss}$  放電能力並造成失去 ZVS 的可能性。因此，必須讓主要繞組層與各層分開，同時讓次要繞組各層保持距離，以使  $C_{TX}$  保持在低位。

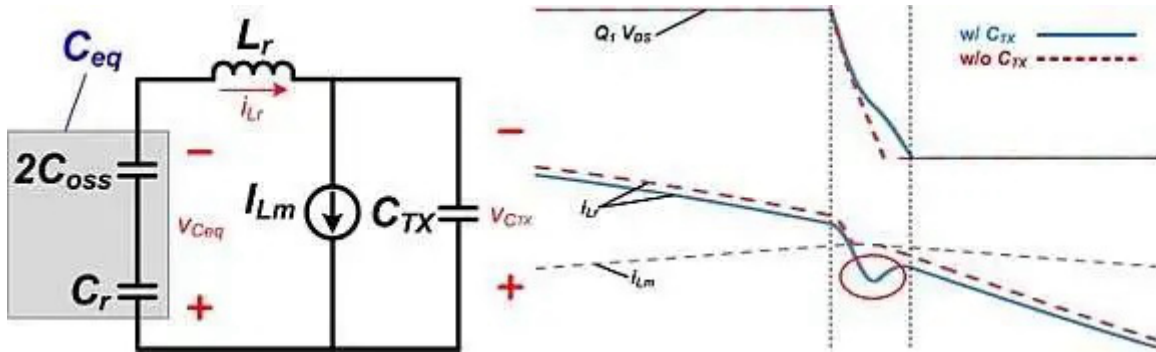


圖 4. 變壓器繞組內電容器的影響

根據經驗法則，判斷  $L_m$  值時應只使用方程式 2 計算出的最大  $L_m$  值的一半，因為在實際打造變壓器前通常很難預測  $C_{TX}$  值。在 400-V 輸入的轉換器中， $C_{TX}$  通常落在 22pF 至 100pF 的範圍內。在變壓器結構固定後，在電路模擬中建立  $C_{TX}$  模型也十分實用，如此能確保夠低的  $L_m$  並保有裕度。

在 本系列的下一期 中，我將著重在高頻共振轉換器設計中的同步整流器設計挑戰。

#### 相關文章：

- [用電訣竅 #84：跳脫 LLC 串聯共振轉換器框架](#)
- [MOSFET Qrr：在追求電源效率時忽略風險](#)
- [選擇半橋式諧振 LLC 轉換器和一次側 MOSFET 時的設計考量](#)
- [使用準諧振和諧振轉換器](#)

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