

## Technical Article

## 高频谐振转换器设计注意事项，第 1 部分



Sheng-Yang Yu

高频谐振转换器设计注意事项包括元件选择、带有寄生参数的设计、同步整流器设计以及电压增益设计。本电源设计要点聚焦于介绍影响开关元件选择的关键参数，以及高频谐振转换器中变压器绕组间电容的影响。

在过去十年间，宽带隙 (WBG) 器件的商业化使得电源转换器能够在更高的频率下运行，以实现更高的功率密度。高性能电源刚刚开始包括 WBG 器件，尤其是碳化硅和氮化镓场效应晶体管 (FET)，因为它们在同一击穿电压水平下的输出电容 ( $C_{oss}$ )、栅极电荷 ( $Q_g$ )、导通电阻 ( $R_{DS(on)}$ ) 和反向恢复电荷 ( $Q_{rr}$ ) 都低于 (或不存在) 硅或硅超结 FET。较低的  $Q_g$  可降低所需的驱动功率 ( $P_{drive} = V_{drive} Q_g F_{sw}$ )，而较低的  $R_{DS(on)}$  可降低导通损耗，其中  $V_{drive}$  是驱动电压， $F_{sw}$  是 FET 开关频率。在高频转换器中选择元件时，除了  $Q_g$  和  $R_{DS(on)}$  外，还必须考虑  $C_{oss}$  和  $Q_{rr}$ 。

如图 1 所示，在电感-电感-电容-串联谐振转换器 (LLC-SRC) 等谐振转换器中，谐振回路中的电流会对 FET 的  $C_{oss}$  (图 2 中的 State 1) 进行充电/放电，以实现零电压开关 (ZVS)。ZVS 意味着 FET 漏源电压 ( $V_{DS}$ ) 在其栅极电压变为高电平之前达到零。因此，在相同的谐振回路电流电平下，较低的  $C_{oss}$  能够实现更短的死区时间，以实现 ZVS。更短的死区时间意味着更大的占空比，同时初级侧谐振回路和 FET 上的均方根 (RMS) 电流更低，从而带来更高的效率，并使得变换器能够在更高的开关频率下运行。

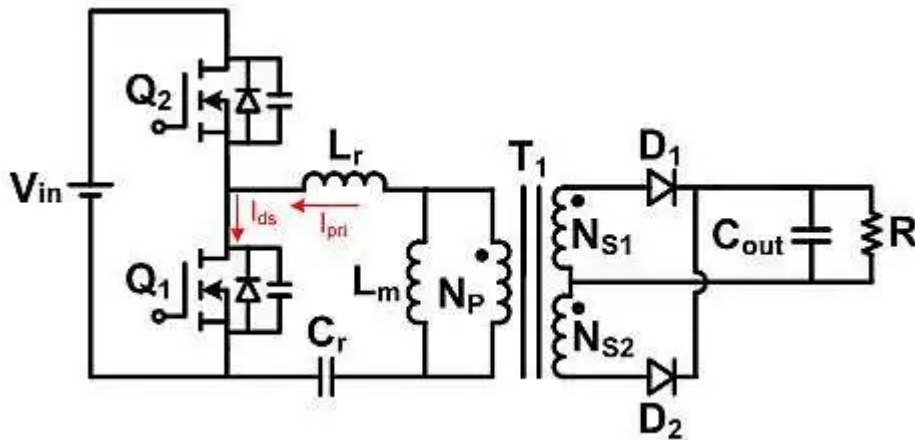


图 1. LLC-SRC

为了实现 ZVS，FET 的体二极管总会在某一时间段内导通电流，即图 2 中的 State 2。如果 FET 具有  $Q_{rr}$  并在体二极管仍传导电流时再次导通，FET 本身将产生反向电流来使  $Q_{rr}$  放电，并导致硬开关和高电压应力，从而可能损坏 FET。

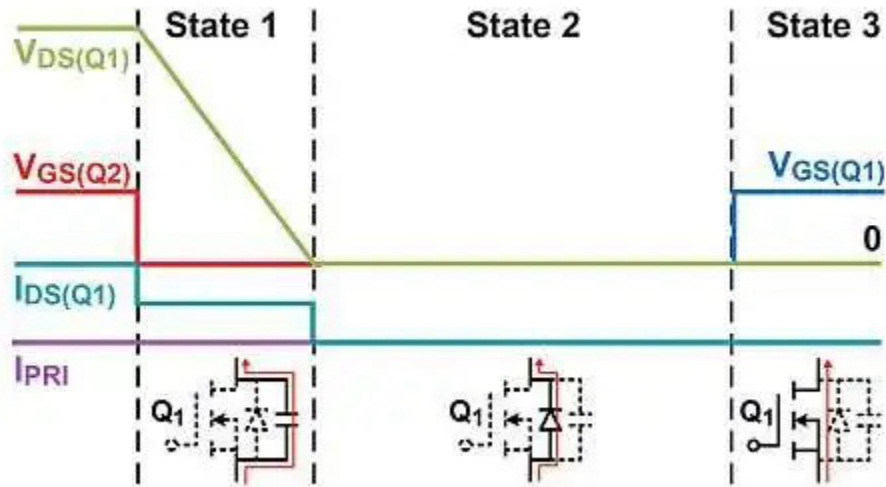


图 2. LLC-SRC 的开关转换

图 3 说明了 LLC-SRC 启动过程中的这种硬开关现象，如 图 1 所示。当 FET  $Q_2$  首次传导电流时，将累积电感电流  $I_{PRI}$ 。然后，电流  $I_{PRI}$  流经通过 FET  $Q_1$  通道和体二极管传导。在不允许电流反向流动的情况下，FET  $Q_2$  再次导通。由于  $Q_{rr}$ ，FET  $Q_1$  会自行产生反向电流，以使  $Q_{rr}$  放电，从而产生高电压应力。

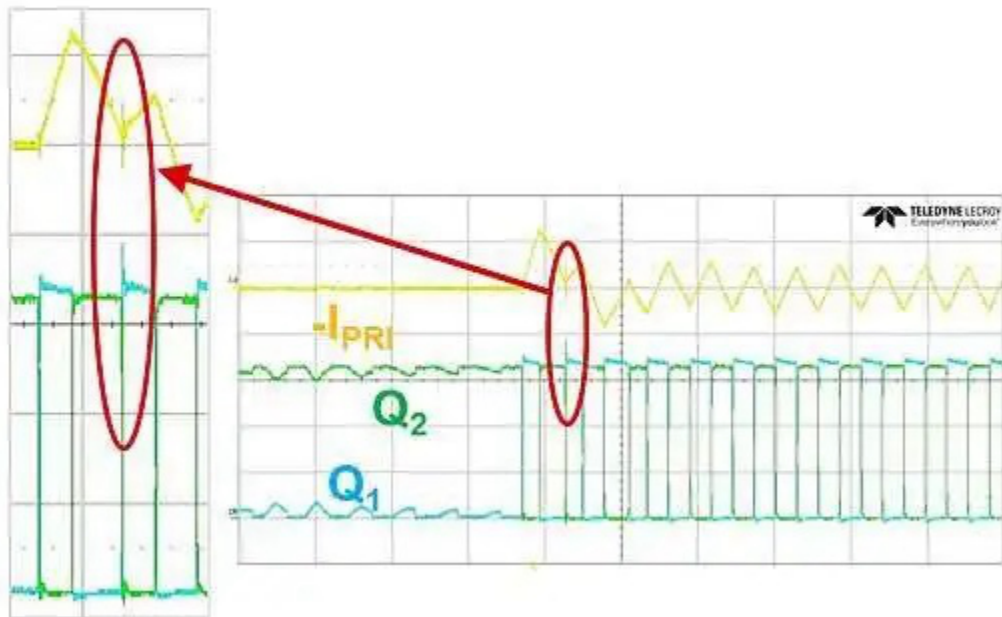


图 3. 由于  $Q_{rr}$  导致硬开关

在高频谐振转换器中，谐振回路阻抗通常远低于低频谐振转换器中的阻抗。因此，高频谐振转换器中的启动浪涌电流预计会更高。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， $Q_2$  首次导通时，限制启动电流的唯一阻抗是  $L_r$ ，即 LLC-SRC 中的串联谐振电感器。高效和高频谐振转换器设计（尤其是总线转换器）通常可最大限度地减小  $L_r$ ，从而提高效率。较小的  $L_r$  值会使启动电流在相同启动频率下更高，因此更容易受到与  $Q_{rr}$  相关的硬开关的影响。因此，在高频谐振转换器中使用低  $Q_{rr}$  FET 至关重要。

借助 WBG 器件的上述优势，可以在兆赫范围内运行隔离谐振转换器，其速度可达传统隔离式电源的 5 至 10 倍。在这一“更高频率”域中，许多在设计过程中曾被认为“可忽略”的参数（如变压器绕组间电容）已不再能够被忽视。

在传统谐振转换器的设计过程中，设计人员必须确保谐振回路中存储的能量高于 FET  $C_{oss}$  中存储的能量，以便  $C_{oss}$  耗尽谐振回路中存储的能量，从而实现 ZVS。以图 1 中所示的 LLC-SRC 为例，公式 1 可确保该不等式的有效性：

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

其中  $I_{Lm}$  是磁化电感  $L_m$  的峰值电流， $V_{in}$  是 LLC-SRC 的输入电压。通过将电感器的欧姆定律应用于  $L_m$ ，可以将公式 1 改写为公式 2：

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

其中  $n = N_p : N_{s1}$  (假设  $N_{s1} = N_{s2}$ ) 是变压器匝数比， $V_{out}$  是输出电压。

当谐振转换器设计需要涵盖宽工作范围和保持时间时， $L_m$  通常远小于公式 2 右侧的值，以保持  $L_n = L_m / L_r$  处于较低电平 (在闭环 LLC-SRC 设计中， $L_n$  值通常取 4 至 10)。当总线转换器等谐振转换器设计需要高转换器效率时，最大限度增加  $L_m$  会降低初级 RMS 电流，从而降低导通损耗。在这种情况下， $L_m$  的值将接近公式 2 右侧的值。但是，公式 2 仅代表理想变压器的理想条件。在实际变压器中，许多参数都会影响  $C_{oss}$  充电和放电能力。关键的参数是绕组内电容。

图 4 显示了 LLC-SRC 开关瞬态期间的简化电路模型，其中  $L_m$  ( $i_{Lm}$ ) 上的电流使  $C_{eq}$  (两个 FET 的  $C_{oss}$  与谐振电容器  $C_r$  串联) 放电，假设  $C_r$  作为电压源。如果没有变压器绕组间电容 ( $C_{TX}$ )，则所有  $i_{Lm}$  都变为  $C_{eq}$ ，公式 2 有效。但当存在  $C_{TX}$  时，一些  $i_{Lm}$  必须转到  $C_{TX}$  来改变变压器绕组的极性，这会降低  $C_{oss}$  放电能力并可能导致 ZVS 丢失。因此，必须通过使初级绕组各层与每一层保持距离，以及次级绕组的各层距离来降低  $C_{TX}$ 。

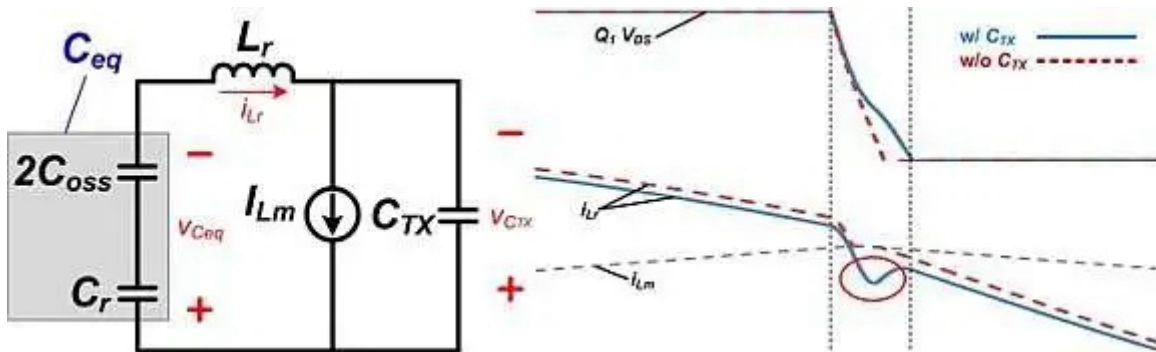


图 4. 变压器绕组间电容器的影响

确定  $L_m$  值的经验法则是，仅使用公式 2 计算得出的最大  $L_m$  值的一半，因为在实际构建变压器之前通常很难预测  $C_{TX}$  值。在具有 400V 输入的转换器中， $C_{TX}$  通常处于 22pF 至 100pF 的范围内。在变压器结构固定后，在电路仿真中对  $C_{TX}$  进行建模也非常有用，可以确保足够低且具有裕度的  $L_m$ 。

在本系列的下一部分，我将重点介绍高频谐振转换器设计中的同步整流器设计挑战。

相关文章：

- [电源技巧 84：Think outside the LLC series resonant converter box](#)
- [MOSFET Qrr：Ignore at your peril in the pursuit of power efficiency](#)
- [Design considerations when selecting half bridge resonant LLC converters and primary side MOSFETs](#)
- [Using quasi-resonant and resonant converters](#)

先前已发布于 EDN.com 上。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司