

Markus Zehendner

本应用简报重点介绍了低功耗隔离式拓扑的主要形式：反激式转换器。此拓扑可达到的最大输出功率通常在 100W 范围内。对于高于此水平的输出功率，使用正向拓扑可提高效率。这些拓扑是本系列后续部分的主题。

### 反激式转换器

反激式拓扑可使输入电压升高或降低，从而生成可为正或负的隔离式输出电压。当开关 Q1 导通时，能量储存在耦合电感器的空气间隙中，通常称为反激式变压器。然后，当开关 Q1 停止导通时，能量转移到输出端。图 1 是非同步反激式转换器的原理图。

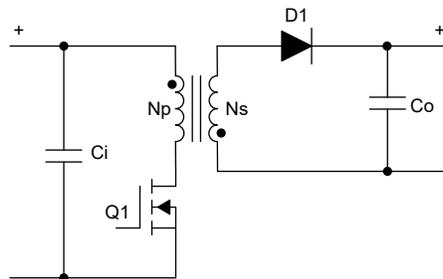


图 1. 非同步反激式转换器原理图

方程式 1 计算连续导通模式 (CCM) 下的占空比。

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

方程式 2 计算最大金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 应力。

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

其中

- $V_{IN}$  是输入电压
- $V_{OUT}$  是输出电压
- $V_f$  是二极管正向电压
- $n_p / n_s$  是耦合电感器的匝数比

如果耦合电感器的耦合不完美，则漏电感中储存的多余能量会产生额外的电压尖峰。因此，请为 Q1 选择一个包含合理裕度的额定电压。通常，钳位电路可以减少电压尖峰并需要耗散多余的能量。通常，允许过冲达到反射电压的 50%，以便使储存的能量适当地换向到输出端。

方程式 3 计算最大二极管应力。

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

其中

- $V_{IN}$  是输入电压
- $V_{OUT}$  是输出电压
- $n_p / n_s$  是耦合电感器的匝数比

由于转换器采用特殊方式将能量转移到次级侧，因此反激式转换器的两端都有脉冲电流。这种情况会导致转换器两端产生相当高的电压纹波。为了实现电磁兼容性，可能需要额外的输入滤波。如果转换器需要给一个非常敏感的负载供电，那么输出端的第二级滤波器有助于抑制输出电压纹波。

由于反激式转换器仅需要低侧栅极驱动器，因此可以使用升压或通用脉宽调制控制器来构建反激式转换器。对于低输出功率，升压转换器集成电路 (IC) ( 具有集成 MOSFET ) 是可行的选择。

就动态行为而言，隔离式反馈路径中的光耦合器和右半平面零点 (RHPZ) 是反激式转换器可达到的调节带宽的主要限制因素。如果反馈路径中没有光耦合器或带宽大于 RHPZ 频率，则可达到的最大带宽约为 RHPZ 频率的五分之一。但是，对于大多数设计而言，选择 RHPZ 频率的十分之一来提供足够的相位和增益裕度是一种好的做法。

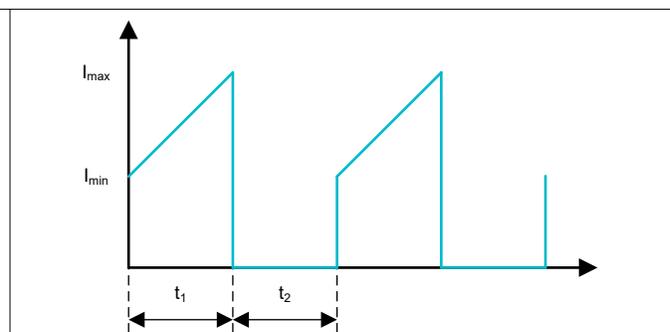
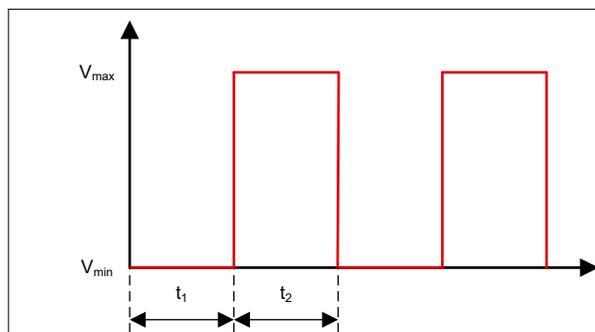
方程式 4 估算反激式转换器传递函数的单个 RHPZ 频率。

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

其中

- $V_{OUT}$  是输出电压
- $D$  为占空比
- $I_{OUT}$  是输出电流
- $L_p$  是耦合电感器的初级电感
- $n_p / n_s$  是耦合电感器的匝数比

图 2 至图 7 展示了非同步反激式转换器中 FET Q1、初级电感器  $N_p$  和二极管 D1 在 CCM 下的电压和电流波形。



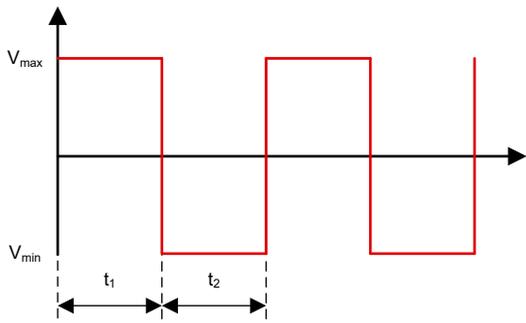


图 4. CCM 下的反激式初级电感器  $N_p$  电压波形

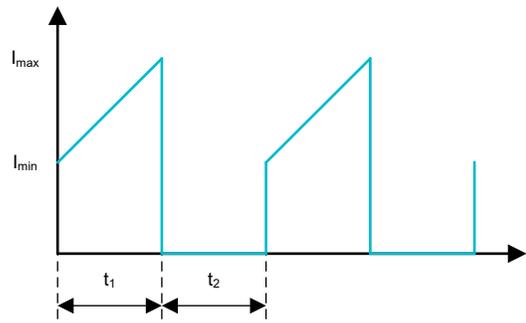


图 5. CCM 下的反激式初级电感器  $N_p$  电流波形

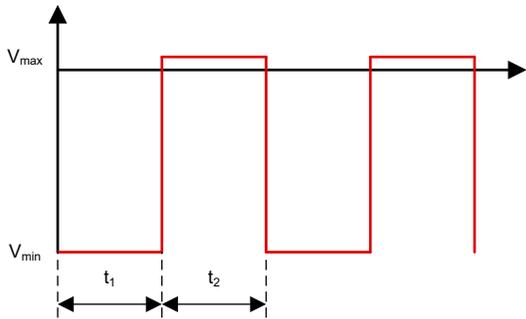


图 6. CCM 下的反激式二极管  $D_1$  电压波形

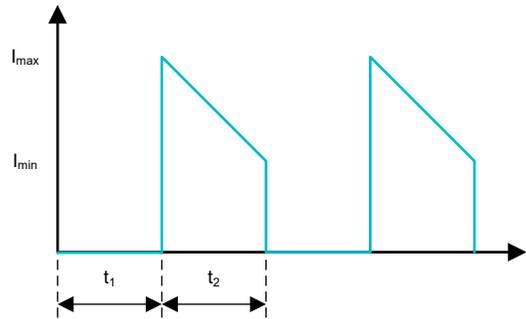


图 7. CCM 下的反激式二极管  $D_1$  电流波形

低功耗或低输出电流反激式转换器通常设计为在不连续导通模式 (DCM) 下运行，以便更大幅度地减小变压器尺寸、重量和成本。这种方法的另一个好处是， $R_{HPZ}$  频率会移至高于 100kHz 的区域，从而实现比 CCM 更高的调节带宽。

方程式 5 计算 DCM 下的占空比。

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

其中

- $f_{switch}$  是开关频率
- $V_{IN}$  是输入电压
- $V_{OUT}$  是输出电压
- $V_f$  是二极管正向电压
- $I_{OUT}$  是输出电流
- $L_p$  是耦合电感器的初级电感

图 8 至图 13 展示了非同步反激式转换器中 FET Q1、初级电感器  $N_p$  和二极管 D1 在 DCM 下的电压和电流波形。

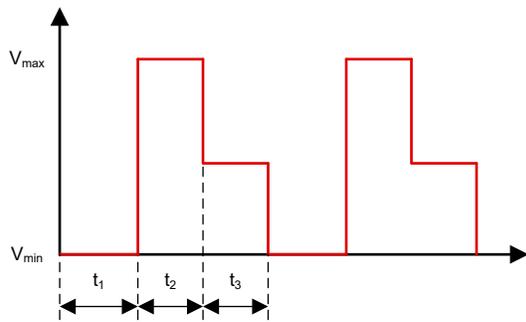


图 8. DCM 下的反激式 FET Q1 电压波形

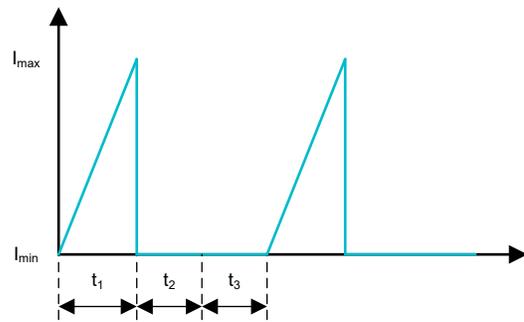


图 9. DCM 下的反激式 FET Q1 电流波形

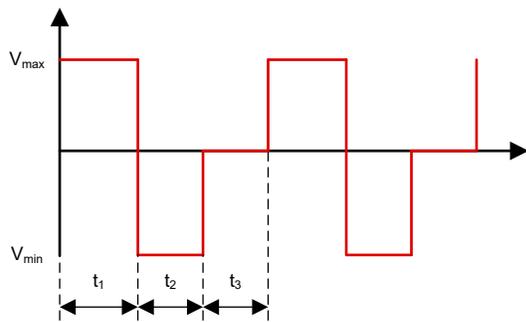


图 10. DCM 下的反激式初级电感器  $N_p$  电压波形

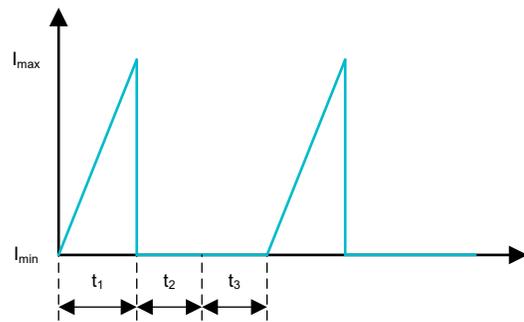


图 11. DCM 下的反激式初级电感器  $N_p$  电流波形

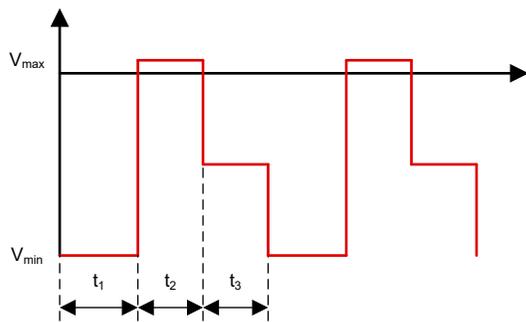


图 12. DCM 下的反激式二极管 D1 电压波形

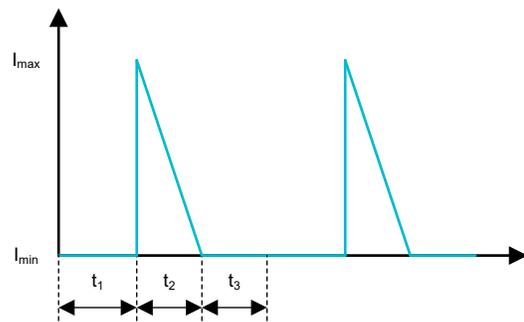


图 13. DCM 下的反激式二极管 D1 电流波形

## 输出电压调节概念

根据应用的不同，有两个不同的选项可将隔离式输出电压反馈回初级侧的控制器：

- 次级侧调节 (SSR)，通常使用光耦合器将反馈信息从次级侧传输到初级侧。光耦合器的带宽有限，当 RHPZ 频率相当高时，这会影响可达到的最大调节带宽。光耦合器中玻璃钝化的老化效应在某些应用中会产生不利影响。然后，这些应用需要采用初级侧调节或隔离式放大器电路。
- 初级侧调节 (PSR) 依赖于初级侧提供的信息，例如辅助反激式变压器绕组上的整流电压。调节精度取决于次级绕组和辅助绕组之间的耦合。为了实现良好的输出调节，建议使用大于 99% 的耦合系数。辅助绕组可实现最小 5mA 至 10mA 的负载电流，从而实现良好的抗噪性和良好的调节能力。还有其他构想可以仅仅通过分析和利用初级绕组上的反射电压进行调节，如果输入能够以高效的方式为控制器供电，那么辅助绕组就不再需要了。使用初级侧调节时，次级整流器上的压降随负载电流的变化而变化。除非 IC 有专用的集成功能，否则控制 IC 不会补偿此效应。TI 的控制器可在次级电流降至 0A 时，在退磁时间结束时采集电压样本。由于二极管不传导任何电流，这样可消除二极管压降的影响。没有此功能的良好非同步初级侧调节设计在负载和输入电压范围内的输出电压偏差为  $\pm 5\%$ 。

通过向耦合电感器添加额外的次级绕组，可以使用反激式器件生成多个隔离式输出。但是，如果这多个输出也相互隔离，则只能对其中一个输出进行适当调节。对于大多数设计而言，获得令人满意的调节结果的一种好做法是选择具有最高电流电平的绕组进行调节。

对于 2A 以上的负载电流，建议使用同步整流，尤其是在需要提高效率或需要避免使用外部散热器时。同步整流器可以从初级侧进行控制，也可以使用自驱动构建进行控制，后者通常是更具成本效益的选择。

### 附加资源

- 观看 TI 培训视频：[拓扑教程：什么是反激式？](#)
- 使用 [Power Stage Designer](#) 设计您的功率级。
- 下载 [电源拓扑手册](#) 和 [电源拓扑快速参考指南](#)。

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司