

Technical Article

同步整流器改善反激式电源的交叉调整性能



Brian King

当必须从单一电源生成多路输出时，反激式拓扑是合理的系统拓扑选择。由于每个变压器绕组两端的电压与其匝数成正比，因此只须提供正确的匝数即可设置每路输出的电压。理想情况下，若调整其中一路输出的电压，其他各路将按匝数比缩放并保持稳定。

然而现实中，寄生元件会导致非稳定输出的负载调整性能下降。回想在[电源设计小贴士 72](#) 中，Robert Kollman 演示了如何计算由整流器正向压降引起的调整误差。在本电源设计小贴士中，我将进一步探讨寄生电感的影响，并说明何使用同步整流器代替二极管大幅改善反激式电源的交叉调整性能。

以 48V 输入生成两路 12V、1A 输出的反激式拓扑为例（简化仿真模型如 [图 1](#) 所示）。理想二极管模型具有零正向压降和可忽略的电阻。这里忽略了变压器绕组电阻，只对与变压器绕组串联的寄生电感进行建模。这些电感包含变压器内的漏感以及印刷电路板 (PCB) 走线和二极管内的寄生电感。当您设置这些电感时，两路输出能够完美地相互跟随，因为当二极管在开关周期的 1-D 部分导通时，变压器的完美耦合会强制两路输出相等。

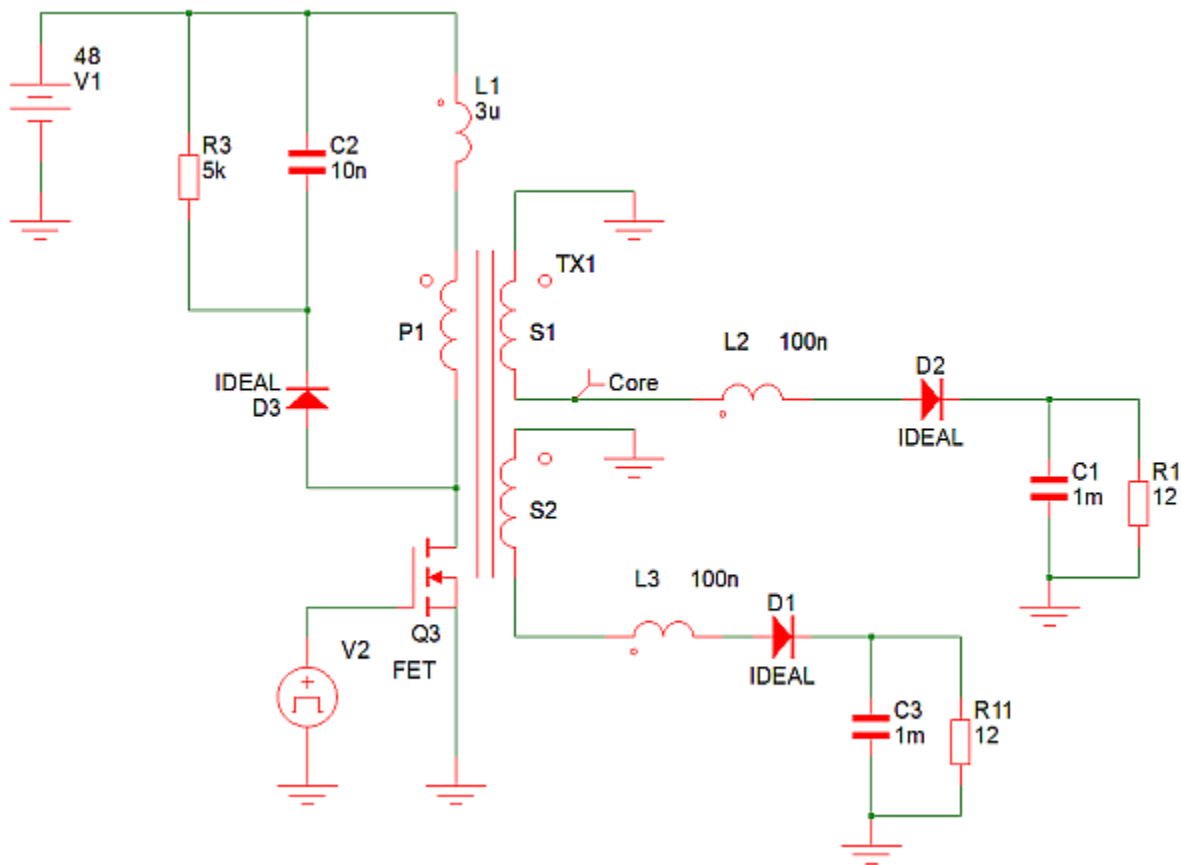


图 1. 这个简化的反激式模型仿真了漏感对输出电压调整性能的影响。

现在考虑当向变压器的两个次级绕组引入 100nH 漏感，初级绕组串联 3 μH 漏感时，会发生什么。这些电感模拟了电流路径中的寄生电感，包括变压器内部的漏感及 PCB 与其他元件中的电感。当初级场效应晶体管 (FET) 关断

时，初级漏感仍有电流流动，次级漏感以 0A 的初始条件开启 1-D 周期。变压器磁芯上出现所有绕组共有的基座电压。此基座电压可使初级泄漏电流斜降至 0A，并使次级泄漏电流斜升，从而向负载提供电流。

当两路输出重载时，电流在整个 1-D 周期内继续流动，输出电压保持良好平衡，如 图 2 所示。但是，当一路输出重载而另一路输出轻载时，轻载输出上的输出电容器往往会通过此基座电压进行峰值充电；当电流快速恢复到零时，其输出二极管将停止导通。请参阅 图 3 中的波形。这种寄生电感导致的峰值充电效应，其对交叉调整性能的影响通常远大于整流器正向压降的影响。

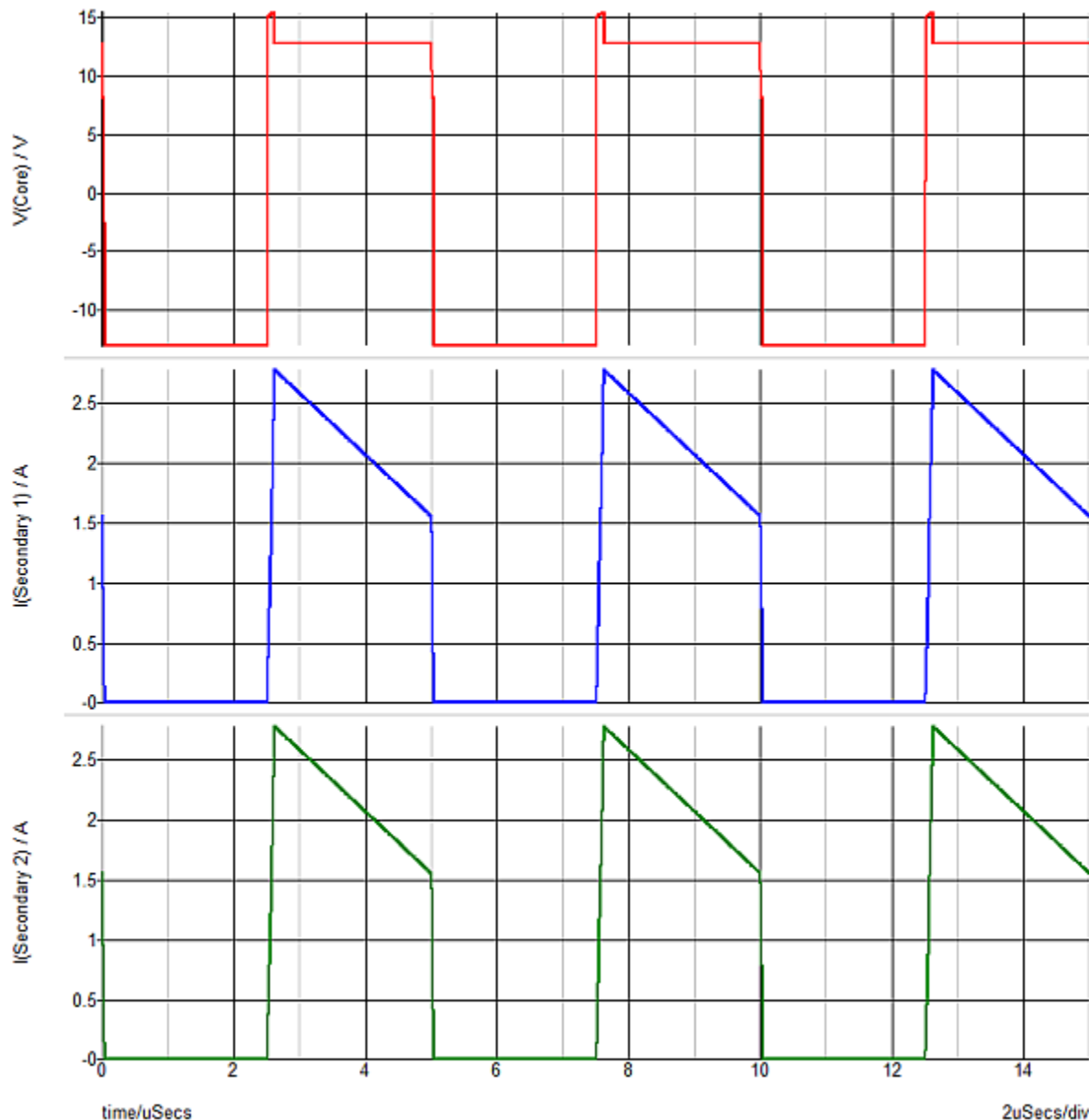


图 2. 当对两路输出都施加重载时，次级绕组电流在整个 1-D 周期内都会在两个次级绕组中流动。在上方的红色迹线上可以看到基座电压。

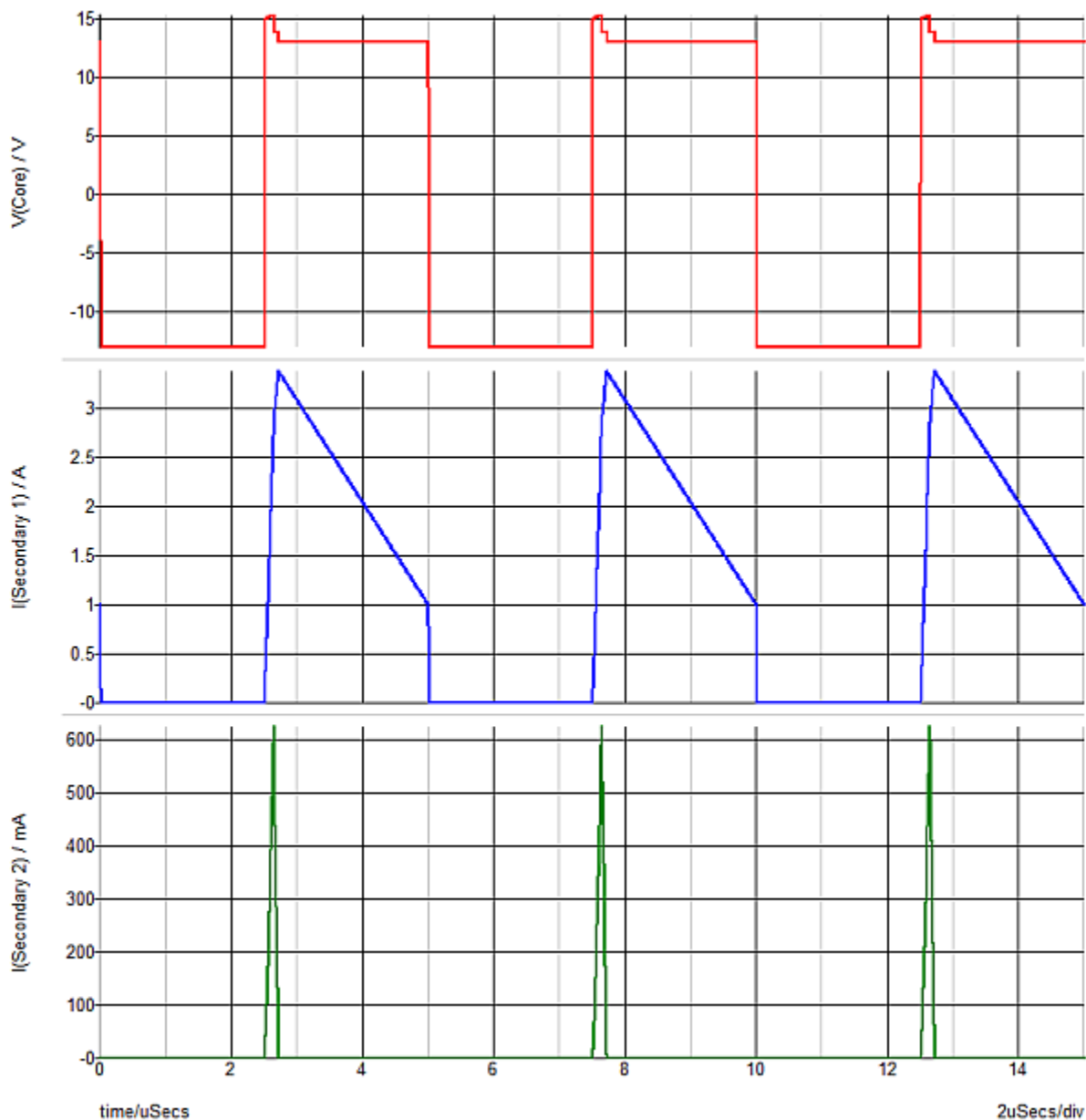


图 3. 重载的次级 1 和轻载的次级 2 绕组。基座电压对次级 2 绕组的输出电容器进行峰值充电。

同步整流器有助于缓解此问题，它们在整个 1-D 周期内强制电流在两个绕组中流动，无论负载大小。图 4 显示了与图 3 相同负载条件下的波形，但将理想二极管替换为理想同步整流器。由于同步整流器在基座电压减小后仍保持导通，因此即使负载严重不平衡，两路输出电压也能很好地相互跟随。

虽然次级 2 绕组的平均电流非常小，但均方根 (RMS) 含量仍然很高。这是因为：与图 3 中的理想二极管不同，同步整流器会在整个 1-D 周期内强制电流连续流动。有趣的是，要使平均电流值较低，此期间的大部分时间内电流必须为负值。

显然，这是以更高的环流为代价换取更优的调整性能。但这未必会导致整体损耗增加。同步整流器的正向压降通常远低于二极管，因此在重载工况下使用同步整流器的效率通常要高得多。

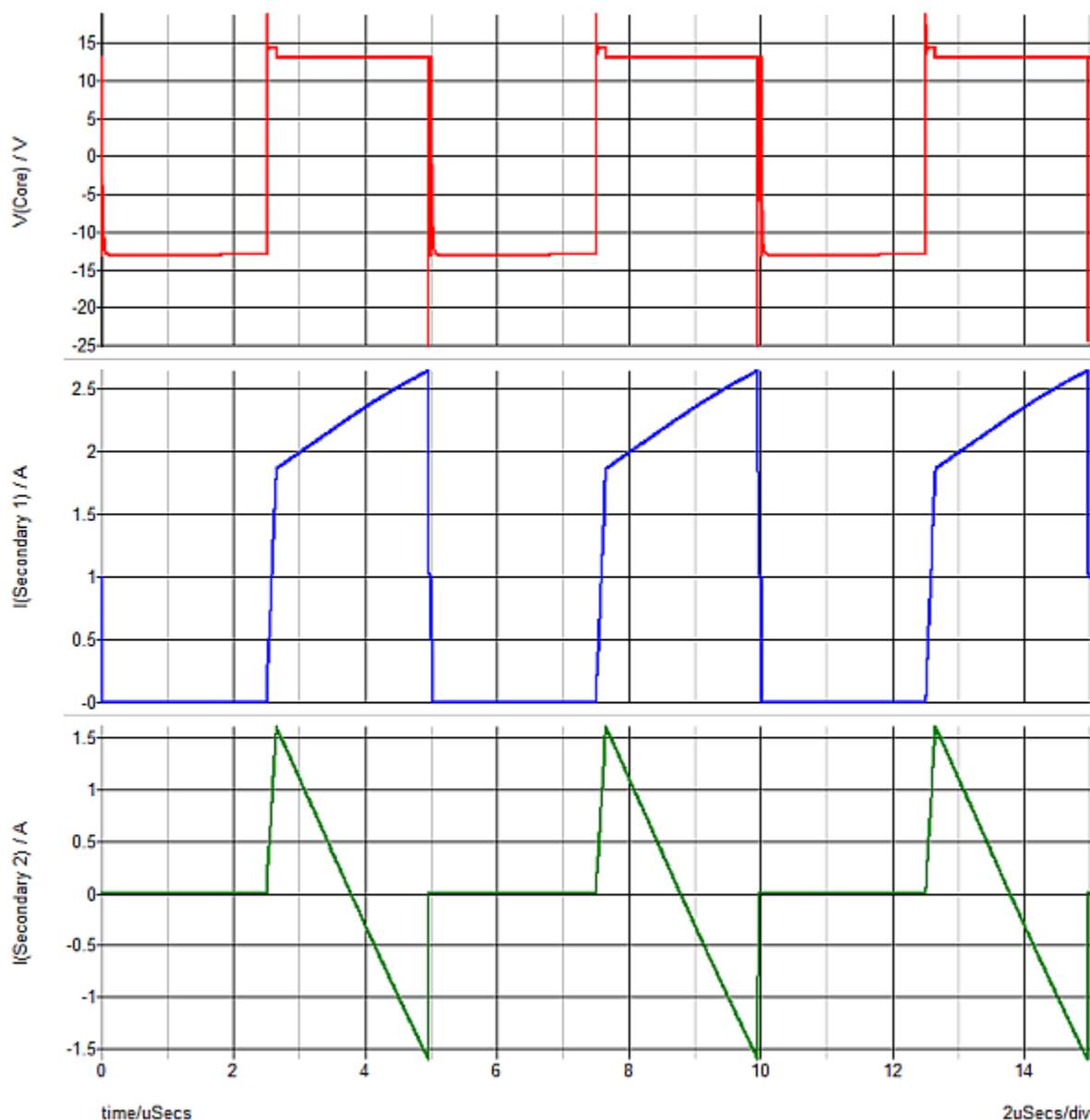


图 4. 将二极管替换为同步整流器会强制电流在两个次级绕组中流动，并消除来自基座电压的峰值充电。

可以在图 5 中看到对交叉调整性能的影响。在这里，输出 1 上的负载稳定在 1A，而输出 2 上的负载从 10mA 摆动至 1A。在负载低于 100mA 时，由于基座电压的峰值充电效应，使用二极管时交叉调整性能会严重下降。

请记住，您只需关注漏感的影响，因为这些仿真使用了理想二极管和理想同步整流器。若考虑电阻性损耗与整流器正向压降，同步整流器的优势将进一步放大，如电源设计小贴士 72 中所述。

因此，为在多路输出反激式电源中实现卓越的交叉调整性能，请考虑使用同步整流器。作为一种附加优势，您还可能提升电源效率。可参考 TI 的 [40V 至 60V 输入 40W 双输出隔离反激式转换器 \(6V@4.33A\)](#) 和 [面向 PoE 应用的 3 类双输出隔离反激式转换器参考设计](#)，这些均是采用同步整流器的反激式电源示例。

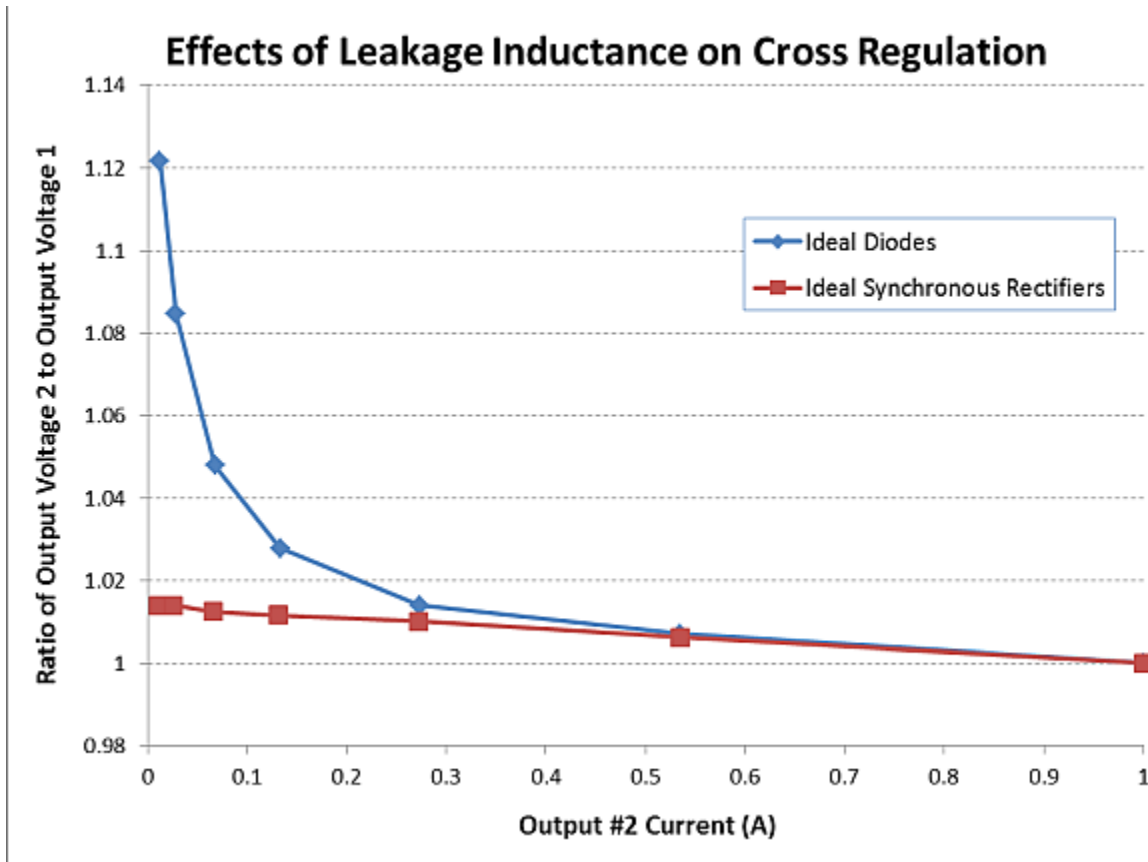


图 5. 此图显示了当输出 1 上的负载稳定为 1A，输出 2 上的负载发生变化时，两路输出之间的交叉调整情况，从而突出了同步整流器减轻漏感影响的能力。

有关更多电源设计要点，请查看 TI 在 Power House 上的[电源设计要点博客系列](#)。

其他资源：

- 观看视频“[拓扑教程：什么是反激式？](#)”
- 下载 TI 的 [Fly-Buck 和反激式选择器工具](#)，帮助根据您的规格选择合适的隔离式直流/直流拓扑。

另请参阅：

- [电源设计小贴士 72：为多路输出反激式拓扑选择合适的整流器](#)
- [为同步整流器提供自定时功能的方法](#)
- [同步整流通过降低功耗来提升效率](#)
- [LLC 同步整流简单易行、稳健且更高效](#)

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