

Technical Article

以简便方式实现转变；通过 PWM 全桥实现 ZVS



John Dorosa

全桥转换器

全桥转换器为隔离式电源转换提供了一种高效的解决方案 (图 1)。在该拓扑内，控制方法的选择将影响转换器的整体性能。大多数工程师仅考虑硬开关全桥 (HSFB) 或相移全桥 (PSFB)。在本期电源设计小贴士中，我将演示对脉宽调制 (PWM) 控制的全桥的简单修改，该全桥可以通过实现零电压开关 (ZVS) 来提高效率，并消除变压器绕组上的谐振振铃。

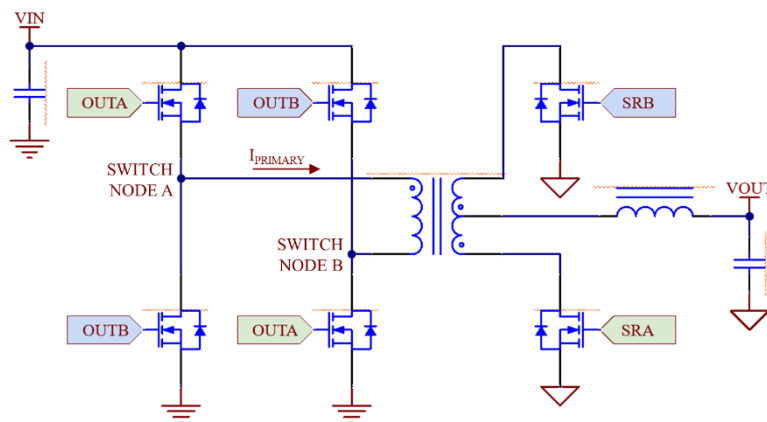


图 1. 同步 HSFB 转换器功率级的示例。来源：德州仪器 (TI)

HSFB

HSFB 转换器使用两个相位相差 180 度的输出信号 (OUTA 和 OUTB) 来控制初级侧电桥上的 FET 对角，如 图 1 所示。控制器允许初级侧 FET 的三种状态：OUTA 为高电平且 OUTB 为低电平，OUTB 为高电平且 OUTA 为低电平，以及 OUTA 和 OUTB 均为低电平。为了保持稳压输出，控制器会调节每种状态下花费的时间之比。

图 2 (从上到下) 显示了 OUTA 和 OUTB 信号，初级侧电桥每一侧的开关节点电压和初级侧绕组电流。在死区时间 (OUTA 和 OUTB 均为低电平时) 内，开关节点电压会回落到输入电压的一半。

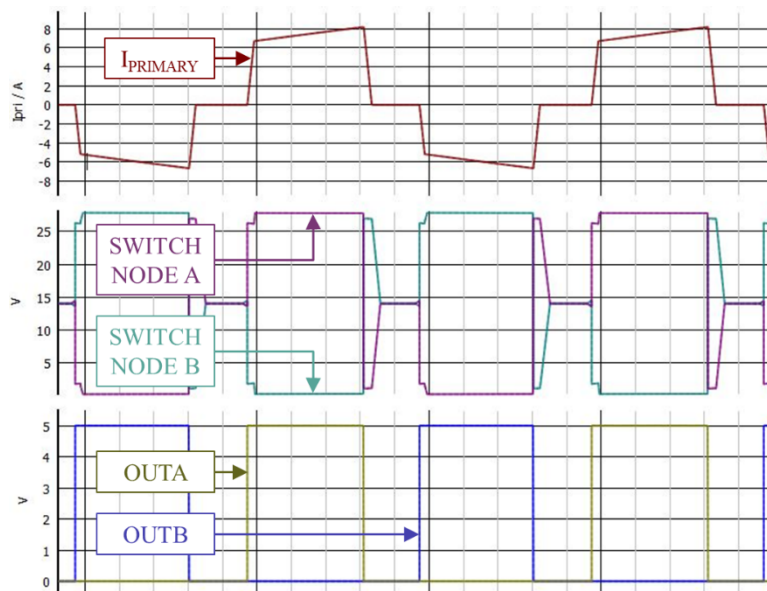


图 2. 在初级侧驱动对侧 FET 的传统配置 (1 μ s/div)。来源：德州仪器 (TI)

当死区时间内没有初级侧 FET 处于导通状态时，次级电流将继续通过同步整流器续流。此时，存储在初级侧的泄漏能量与初级侧 FET 的输出电容谐振，从而在 OUTA 或 OUTB 变为低电平时产生较大的泄漏尖峰。这种谐振会影响初级侧上的全部四个 FET。图 3 显示了泄漏尖峰可以达到多大。在实际应用中，较大的泄漏尖峰可能导致需要使用耐受更高电压的元件。

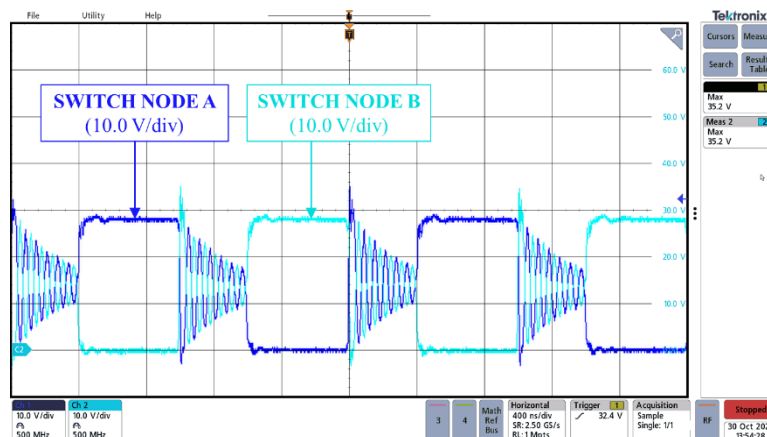


图 3. 采用传统配置的初级侧开关节点 (400ns/div)。来源：德州仪器 (TI)

采用互补逻辑的替代方法

一种替代方法是在电桥的每一半上使用互补逻辑来控制初级侧 FET。在此方法中，PWM 为高电平时高侧 FET 导通，PWM 为低电平时低侧 FET 导通。图 4 显示了使用此方法的示意图。

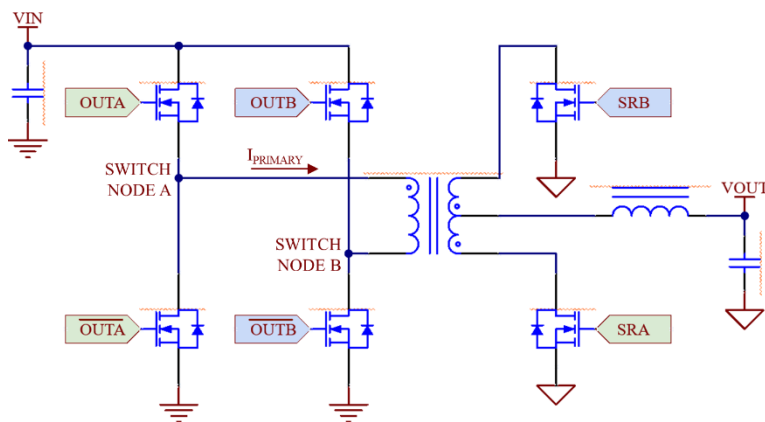


图 4. 同步 ZVS 全桥转换器功率级的示例。来源：德州仪器 (TI)

图 5 显示了该方法的 PWM、开关节点电压和初级侧电流。借助初级侧电桥每一侧的互补信号，两个低侧 FET 现在可在死区时间内导通。这使得初级侧电流能够在传统方法中的死区时间内，通过两个低侧 FET 持续续流。

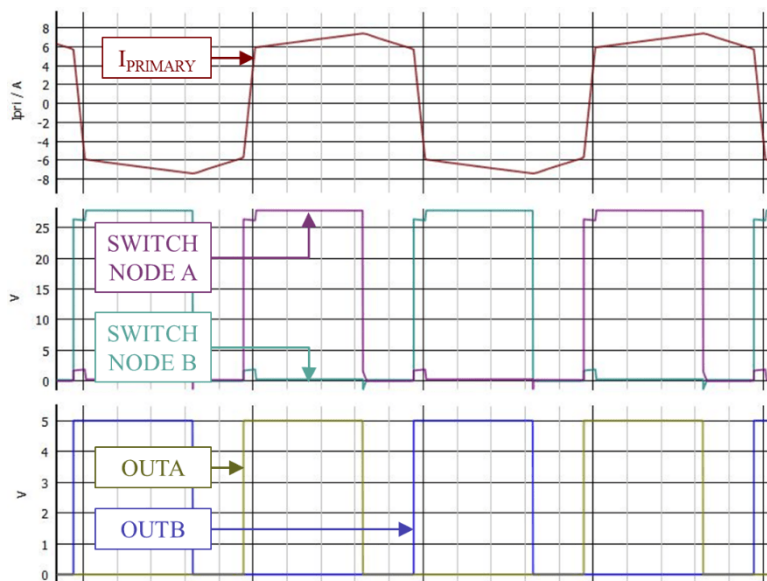


图 5. 驱动初级侧 FET 的互补 PWM (1μs/div)。来源：德州仪器 (TI)

在初级侧实现续流电流有诸多好处。首先，初级侧 FET 可实现 ZVS。图 6 显示了 ZVS 事件期间全桥一侧的初级侧开关节点和 PWM 逻辑。如果在引入栅极驱动信号之前，漏源电压下降到零，即表示实现了 ZVS。

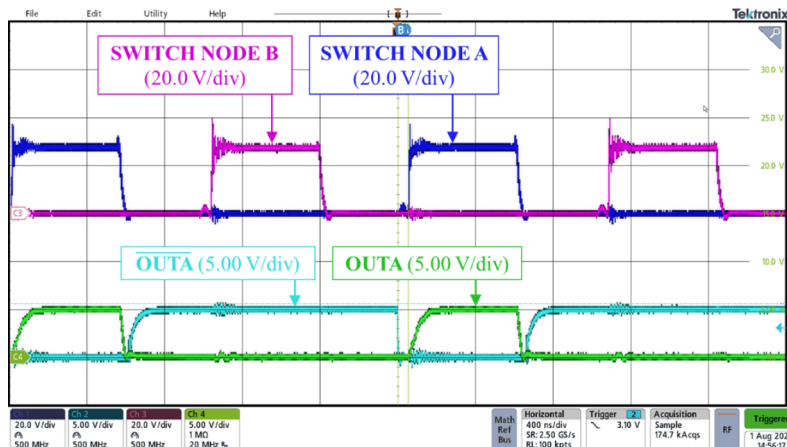


图 6. 采用互补 PWM 配置的初级侧开关节点 (400ns/div)。来源：德州仪器 (TI)

另一项优势是整个转换器中的噪声更低。从图 3 中的初级侧开关节点波形到图 6 时，消除了大型泄露尖峰和谐振振铃。次级整流器还可在更改初级侧以实现 ZVS 后降低噪声。

图 7 比较了两种设计方案下，次级整流器的漏源电压。HSFB 变体的振铃现象明显更严重，需要通过缓冲器来降低应力，但代价是整体系统效率会降低。在初级侧更改为 ZVS 会导致次级 FET 上的振铃减少。仍然存在泄漏尖峰，但相比缓冲器，二极管钳位电路在这种情况下更合适。

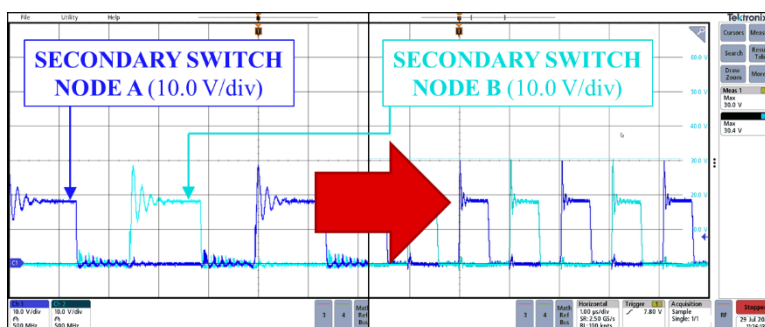


图 7. 传统配置 (400ns/div) (左)；使用互补 PWM 信号 (1.00μs/div) (右)。来源：德州仪器 (TI)

修改后的 HSFB 参考设计

仅通过引入 ZVS，即可以在各种负载条件下提高效率。图 8 比较了修改后的 HSFB 参考设计“适用于 100kRad 应用的 100W、5V 输出硬开关全桥转换器参考设计”，该参考设计在初级侧使用 ZVS 逻辑，并与最初的 HSFB 数据进行了对比。初级侧 FET 的逻辑是唯一的变化；初级侧 FET 驱动器的优化和次级侧保护电路的改进将进一步提升此方法的优势。

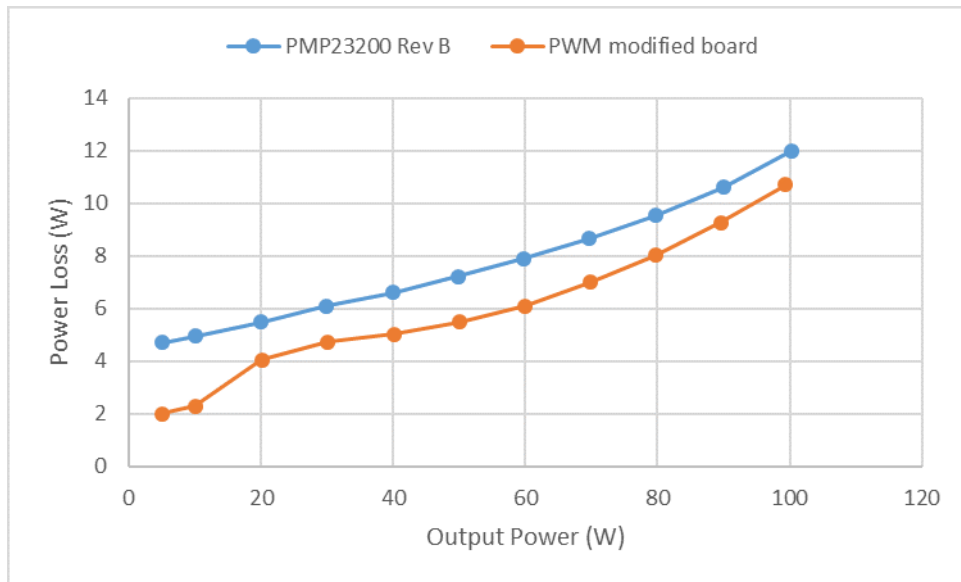


图 8. 传统方案 (TI HSFB 参考设计 B 版) 与 PWM (修改后的电路板) 配置在不同输出功率下的总功率损耗对比。来源：德州仪器 (TI)

使用互补逻辑

在全桥转换器上使用互补逻辑可以使初级侧 FET 实现 ZVS。该方法在提升系统效率方面具有诸多优势，且实现起来也相对简单。

在测试用例中，标准同步全桥转换器只需调整逻辑即可生成互补信号。您可以使用逻辑或非门进行此调整；或者，HSFB 参考设计中的一些驱动器（例如德州仪器(TI) [TPS7H6003-SP](#) 栅极驱动器）具有 PWM 模式：在信号为高电平时，单个输入信号驱动高侧 FET，在信号为低电平时驱动低侧 FET。如您所见，控制逻辑的这种细微变化会显著提高系统性能。

相关内容

- [电源技巧 133](#)：测量 TLVR 中的总漏电感，以优化性能
- [电源技巧 123](#)：使用双升压转换器扩展高转换比设计的功率范围
- [电源技巧 117](#)：在完全工作条件下进行测试之前测量 LLC 谐振回路
- [电源技巧 97](#)：构造 LLC-SRC 增益曲线以满足电池充电器需求
- [电源技巧 94](#)：反向降压拓扑如何替代非隔离反激式拓扑

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