Application Note

采用 UCC25661x 的全桥 LLC

Amrita Mitra, Sanchayan Das, Aditya Madhavan

摘要

本应用手册描述了基于 UCC25661x LLC 控制器实现全桥 LLC 谐振转换器的方法。由于该控制器主要面向半桥应用，因此采用额外电路来生成全桥工作所需的栅极驱动信号以及必要功能。

内容

1 简介....2
2 全桥 LLC 工作原理....3
3 采用 UCC25661x 的实现....4
3.1 栅极驱动架构....4
3.2 ISNS 电路修改....5
3.3 辅助逻辑实现....6
3.4 逻辑电平信号转换....6
4 硬件结果....9
5 总结....12
6 参考资料....12
7 修订历史记录....13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

LLC 谐振转换器因其能够在宽负载范围内实现软开关操作，而被广泛用于高效隔离式 DC-DC 功率转换应用。通过在零电压开关 (ZVS) 条件下操作初级开关并最小化开关损耗，LLC 转换器具有高效率、较低的电磁干扰 (EMI) 以及高功率密度等优点。这些特性使其在服务器电源、电信电源系统、消费电子和工业功率转换系统中具有吸引力。

半桥 LLC 转换器因其实现简单且元件数量较少，通常用于中等功率应用。然而，随着功率等级提高，全桥 LLC 拓扑因其能够将完整输入母线电压施加到谐振腔两端而变得有吸引力，从而降低电流应力和导通损耗，同时实现更高的功率能力。

UCC25661x 系列是一款高度集成的 LLC 谐振控制器，主要面向半桥 LLC 转换器。在需要更高输出功率的应用中，可能希望保留 UCC25661x 的特性，同时实现全桥功率级。这可以通过额外的接口和栅极驱动电路来实现。

本应用手册介绍了使用 UCC25661x 控制器实现全桥 LLC 谐振转换器的方法。本文讨论了所提出设计的工作原理、栅极驱动生成方法、保护实现、设计注意事项以及实验验证。

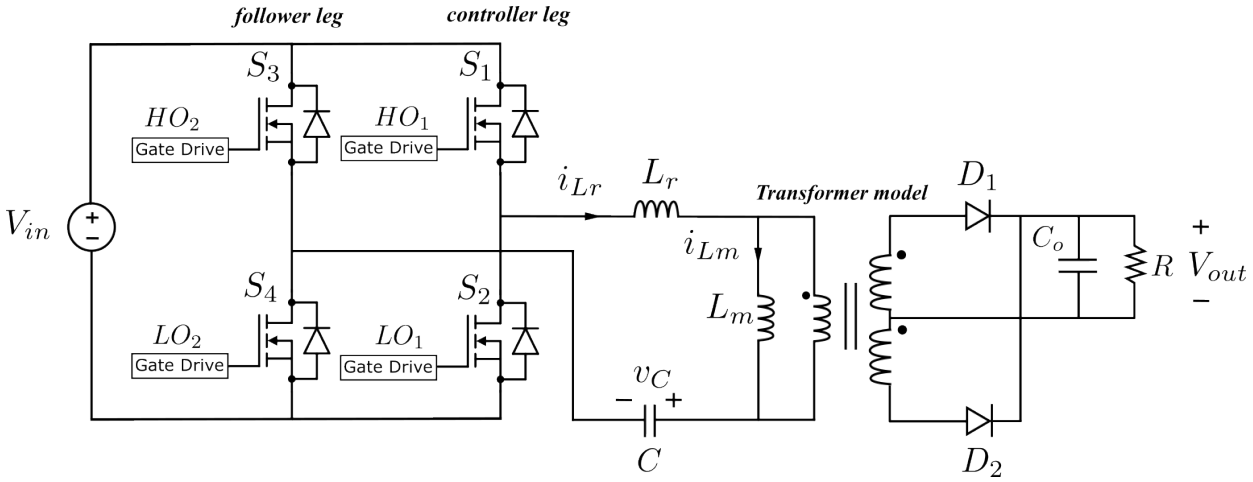


图 1-1. 全桥 LLC 谐振转换器

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 全桥 LLC 工作原理

本节概述全桥 LLC 转换器的工作过程。图 2-1 显示了两个桥臂的互补开关序列。在稳态工作期间，对角相对的开关同时导通，从而在谐振腔两端施加交替极性的电压。这会产生谐振腔方波激励，从而生成流过谐振网络和变压器的近似正弦谐振电流。因此，该交流电流被缩放、整流和滤波，以产生稳压直流输出电压。

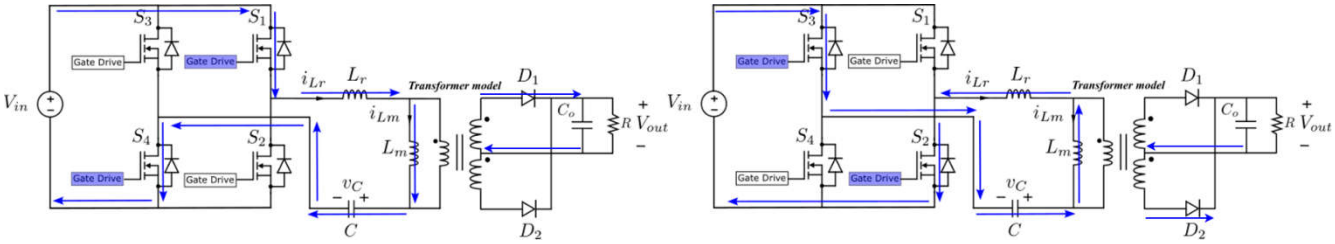


图 2-1. 全桥 LLC 转换器的开关状态与谐振腔工作

从谐振腔的角度来看，全桥 LLC 转换器的工作方式与半桥 LLC 转换器类似。主要区别在于，完整输入母线电压会被施加到谐振腔两端，而在半桥实现中，仅有一半母线电压激励谐振腔。因此，增益关系和变压器匝比选择相差两倍，而谐振腔分析和频率控制方法保持不变。使用一次谐波近似 (FHA) 得到的简化谐振腔增益表达式如方程式 1 所示（其中，对于半桥拓扑，电桥为 0.5，对于全桥拓扑，电桥为 1）：

$$\text{Normalized Gain} = \text{Bridge Gain} \times \text{N(Transformer turns ratio)} \times \text{Impedance Ratio Gain} \quad (1)$$

图 2-3 显示了不同负载条件下的谐振腔增益特性。所有增益曲线在谐振频率处相交，而每条曲线的峰值定义了容性与感性工作之间的边界。为确保零电压开关 (ZVS) 并最小化开关损耗，LLC 转换器被设计为在感性区域工作。相应的谐振腔波形如图 2-2 所示（对于 fs < fr）。

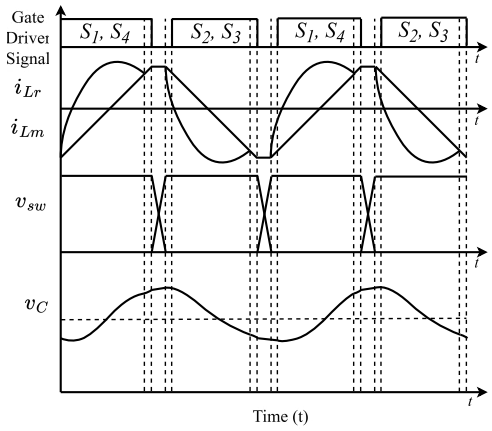


图 2-2. FB-LLC 稳态波形

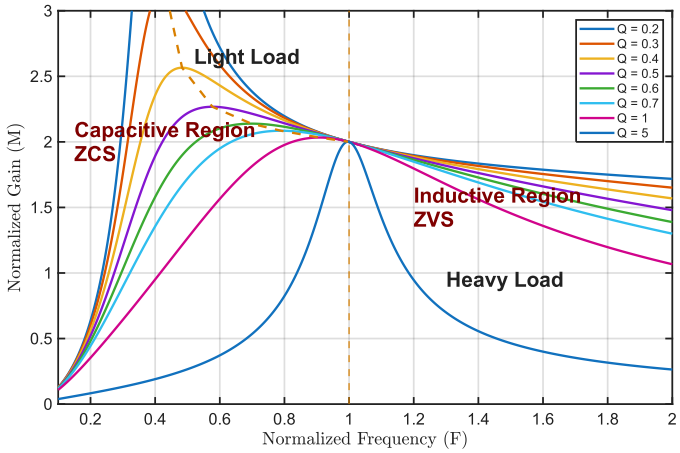


图 2-3. FB-LLC 的增益特性

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 采用 UCC25661x 的实现

3.1 栅极驱动架构

UCC25661x 生成半桥 LLC 运行所需的 *HO* 和 *LO* 信号。在全桥 LLC 转换器中，每个桥臂的高侧开关以不同的悬空开关节点为基准，而不是以接地 (PGND) 为基准。因此，控制器输出不能直接应用于从桥臂。采用隔离式栅极驱动器来验证每个栅极信号是否正确地以其相应的源极端子为基准，从而实现正确的栅极驱动电压。类似的栅极驱动器也可以用于控制器桥臂，以验证两个桥臂之间的延迟匹配情况。在这里，HO1 和 LO1 表示控制器桥臂栅极驱动信号，HO2 和 LO2 表示从属桥臂的栅极驱动信号。HS 和 HS1 分别表示控制器桥臂和从属桥臂的开关节点电压。

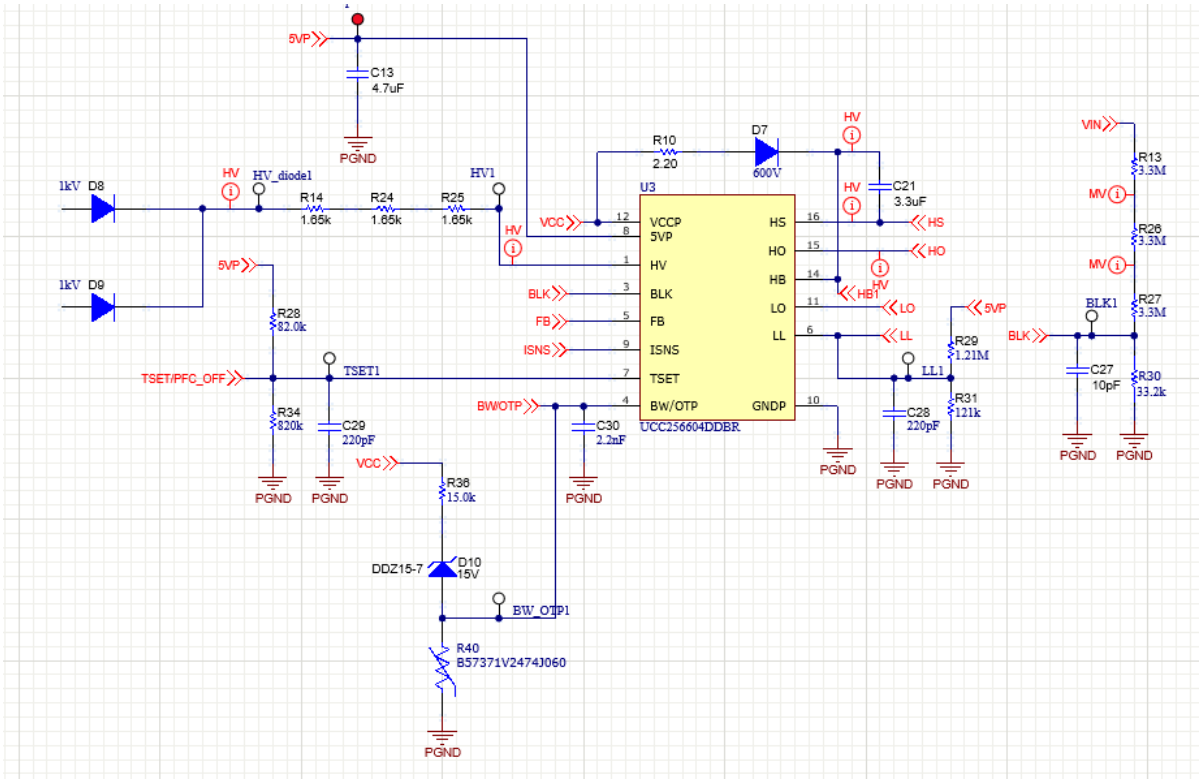


图 3-1. UCC25661x 在半桥 LLC 中的实现

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

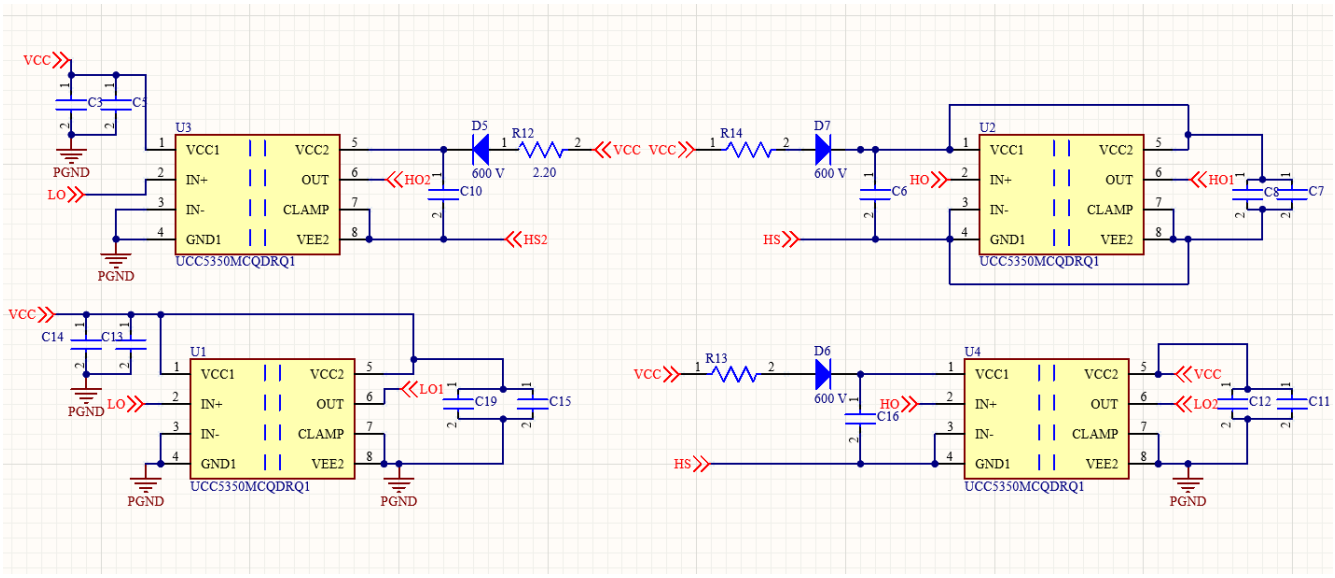


图 3-2. 全桥 LLC 隔离式栅极驱动实现

控制器输出 HO 和 LO 通过四个隔离式栅极驱动器路由，以生成全桥 LLC 转换器所需的栅极驱动信号 HO1、LO1、HO2 和 LO2。高侧栅极驱动器采用自举电路，以提供参考其各自开关节点（HS 和 HS1）的浮动栅极驱动电源。

3.2 ISNS 电路修改

UCC25661x 半桥 LLC EVM 使用分离谐振电容布局和基于微分器的电路来检测 ISNS 引脚处的谐振腔电流。在全桥 LLC 实现中，不再需要分离电容布局，谐振腔的两端都连接到有源开关的桥节点。因此，谐振电容和谐振腔网络不再具有固定参考节点 (PGND)，使得原有的基于微分器的检测方法不再适用。因此，微分器电路被替换为基于电流互感器 (CT) 的检测方法。

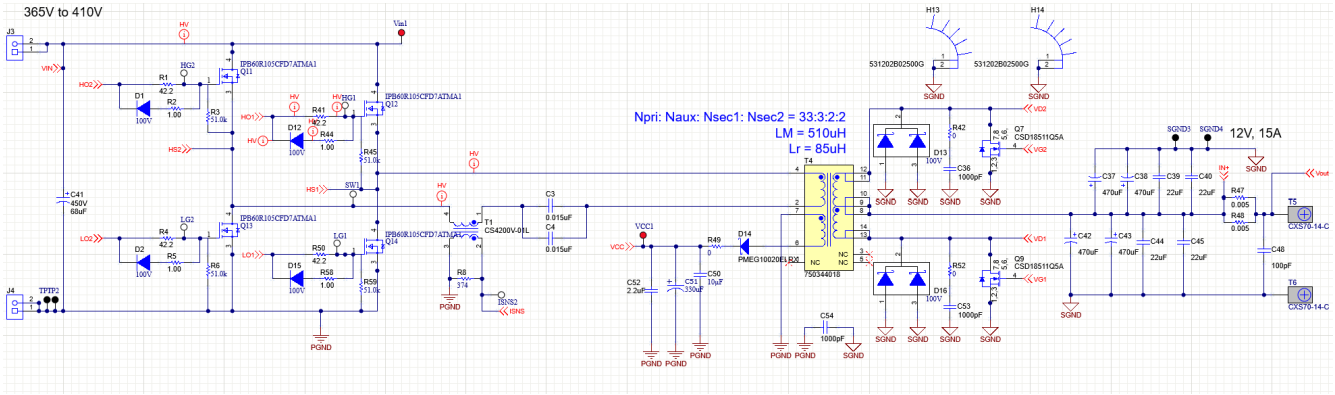


图 3-3. FB LLC 功率级原理图

ISNS 引脚还会设定过流保护水平 (OCP1)。OCP1 的阈值为 3.5V 或 4V，具体取决于 TSET 引脚电阻器和正在使用的型号。在此设计中，使用了 UCC256611，且 OCP1 阈值 (OCP1_Threshold) 为 3.5V。如果已知满载时的峰值谐振电流 (I_PEAK)，则对于匝数比 N (Pri : Sec) 的 CT，可以选择的负载电阻 (RT) 为：

$$RT < OCP1_Threshold \times N / I_PEAK \quad (2)$$

然后 OCP1 级别峰值谐振电流 (I_PEAK_OCP1) 由下式计算得出：

$$I_PEAK_OCP1 = OCP1_Threshold \times N / RT \quad (3)$$

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

备注

所选择的 CT 必须提供在预期工作范围内的足够电流额定值和伏秒能力。

3.3 辅助逻辑实现

在启动期间，控制器施加初始的 200µs LO1 脉冲，为高侧开关的自举电容充电。然而，如果使用隔离式电源模块进行自举充电，转换器会立即进入正常全桥运行模式，HO2 与 LO1 同时导通。结果，谐振腔承受 V_{IN} + V_{CR} 的电压，该电压施加在谐振电感或漏感两端，导致产生很大的谐振腔电流，可能超过功率开关的安全工作限制。为避免这种情况，辅助逻辑电路会在启动期间强制 LO2 与 LO1 一起导通。这有效地将谐振腔的两端连接到直流负母线，允许谐振电容在安全电流限制下放电，然后再使能正常全桥运行。

控制器的 HO 和 LO 输出首先被转换为 5V 逻辑电平，表示为 LO2_5V 和 LO_5V，以验证与数字逻辑电路的兼容性。在 LLC 启动序列期间，TSET 信号在控制器生成 200µs LO1 启动脉冲之前变为低电平。在故障重试运行期间重复相同的序列，其中 TSET 在 1s 空闲间隔后再次变为低电平。使用单稳态电路检测该下降沿，为 SR 锁存器生成一个短的 SET 脉冲。类似地，使用第二个单稳态电路检测 LO_5V 的下降沿，以生成一个短的 RESET 脉冲。这些 SET 和 RESET 脉冲控制 SR 锁存器，其输出 Q 决定转换器的工作模式。

当锁存器被置位 (Q = 1) 时，逻辑会强制逻辑电平 LO2 为高，HO2 为低，从而建立预定义的启动开关状态。锁存器保持该状态，直到 LO_5V 的下降沿生成 RESET 脉冲。接收到 RESET 脉冲后，锁存器被清除 (Q = 0)，从而移除逻辑输出端的强制作用。此后，LO2 和 HO2 跟随转换后的控制器信号，从而启用正常全桥 LLC 工作。

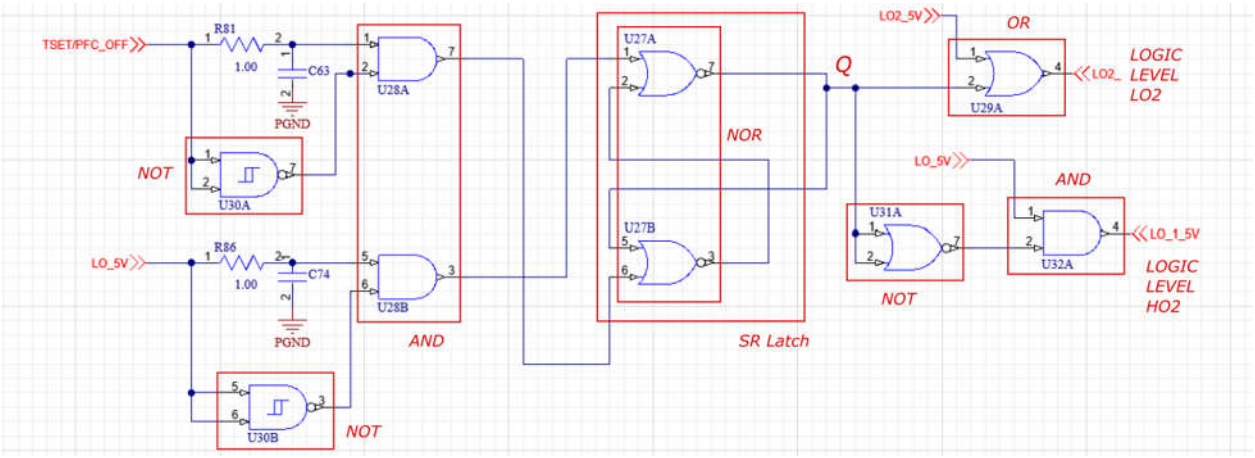


图 3-4. 辅助逻辑实现原理图

3.4 逻辑电平信号转换

1. 为实现辅助逻辑电路，来自控制器的 HO 和 LO 信号需要分别转换为逻辑电平 5V（LO2_5V 和 LO_5V）。

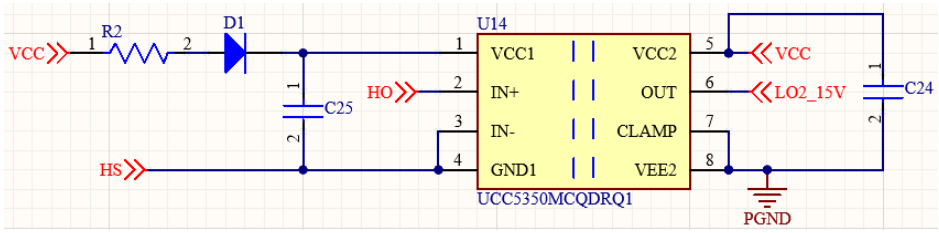


图 3-5. HO 控制器输出的逻辑电平转换 - 1

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

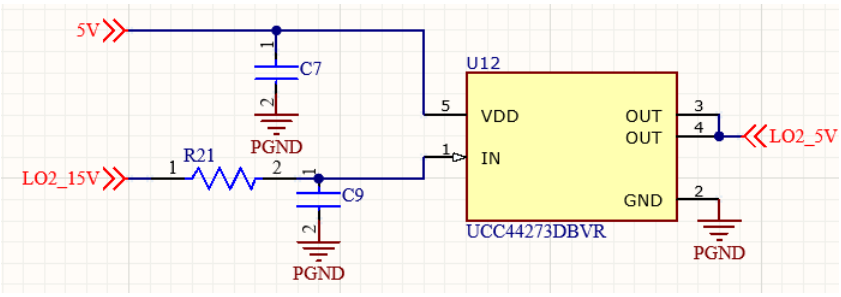


图 3-6. HO 控制器输出的逻辑电平转换 - 2

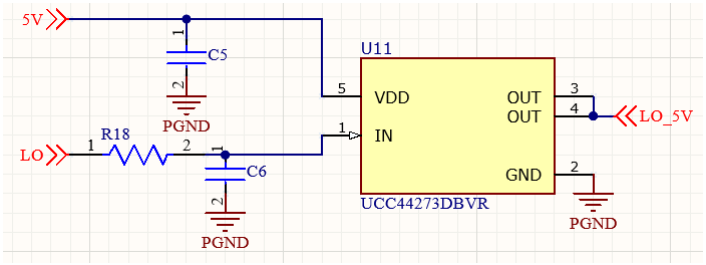


图 3-7. LO 控制器输出的逻辑电平转换

图 3-7 显示了元件数量更少的替代实现方案。浮动 HO 信号使用 ISO1211 隔离式数字输入接收器进行转换，而 LO 信号使用电阻分压器进行转换，以生成用于辅助逻辑电路的逻辑兼容 5V 信号。

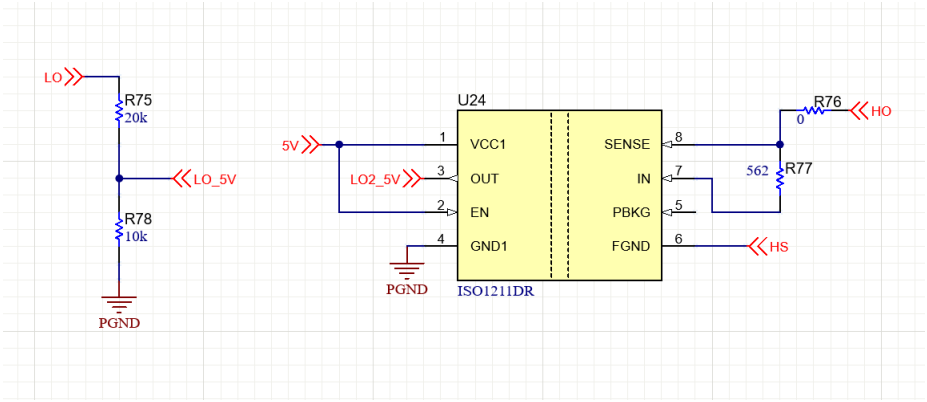


图 3-8. HO 和 LO 控制器输出的替代逻辑电平转换

由辅助逻辑电路生成的逻辑电平输出 HO2 (LO_1_5V) 和 LO2 (LO2_5V) 可以使用图 3-8 所示的四路隔离式栅极驱动器实现与功率级的连接。或者，如图 3-9 所示，可以使用半桥栅极驱动器实现相同功能。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

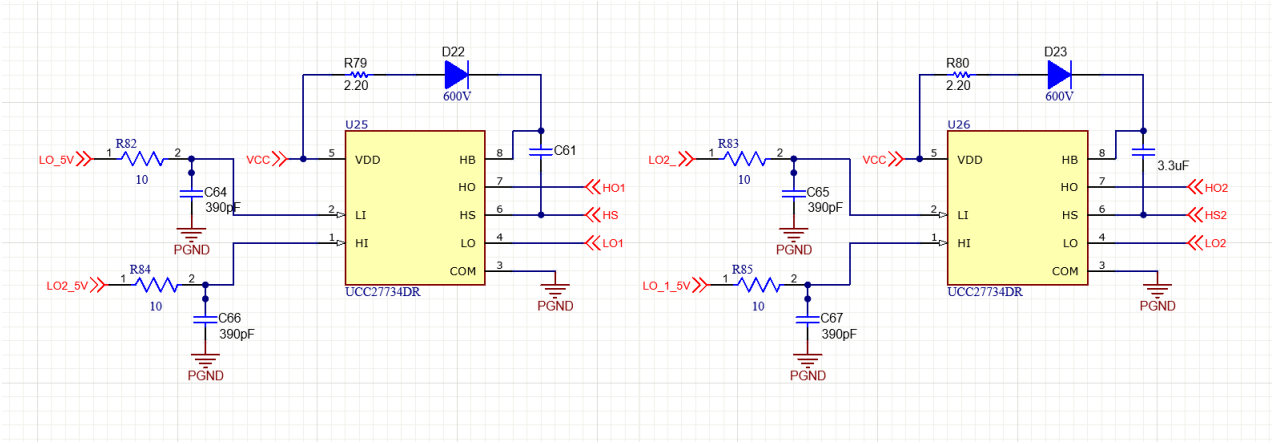


图 3-9. 使用半桥栅极驱动器的替代全桥 LLC 栅极驱动器实现

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 硬件结果

全桥 LLC 在正常谐振模式运行、突发模式运行、启动、负载瞬态和母线欠压下的实验结果如下所示。

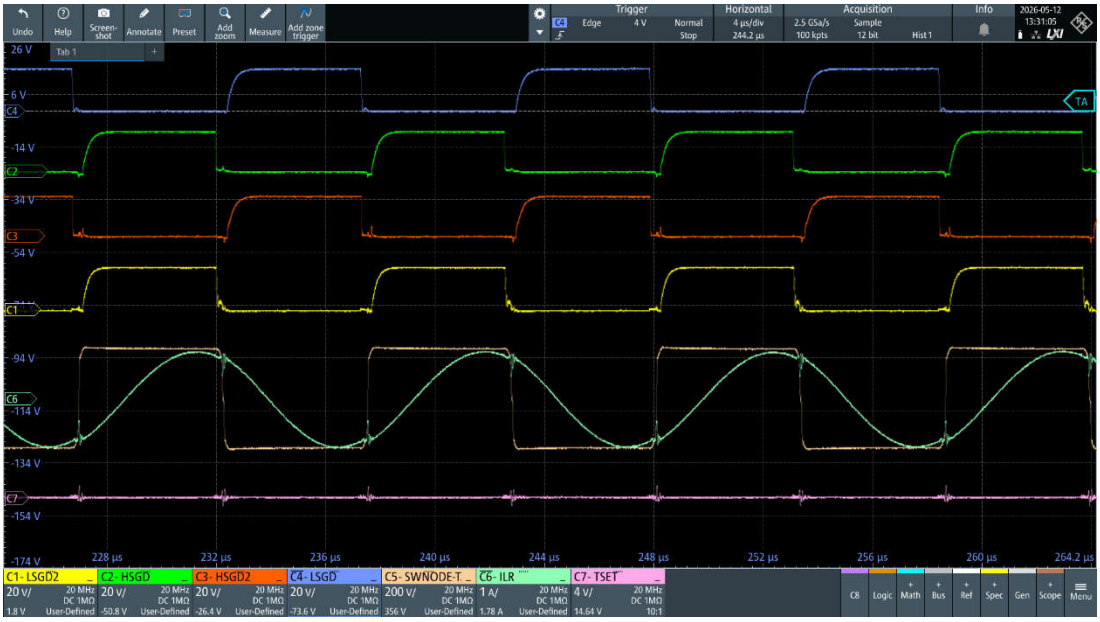


图 4-1. Vin = 185V，Vout = 12V，Iout = 7A，正常谐振模式运行，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压

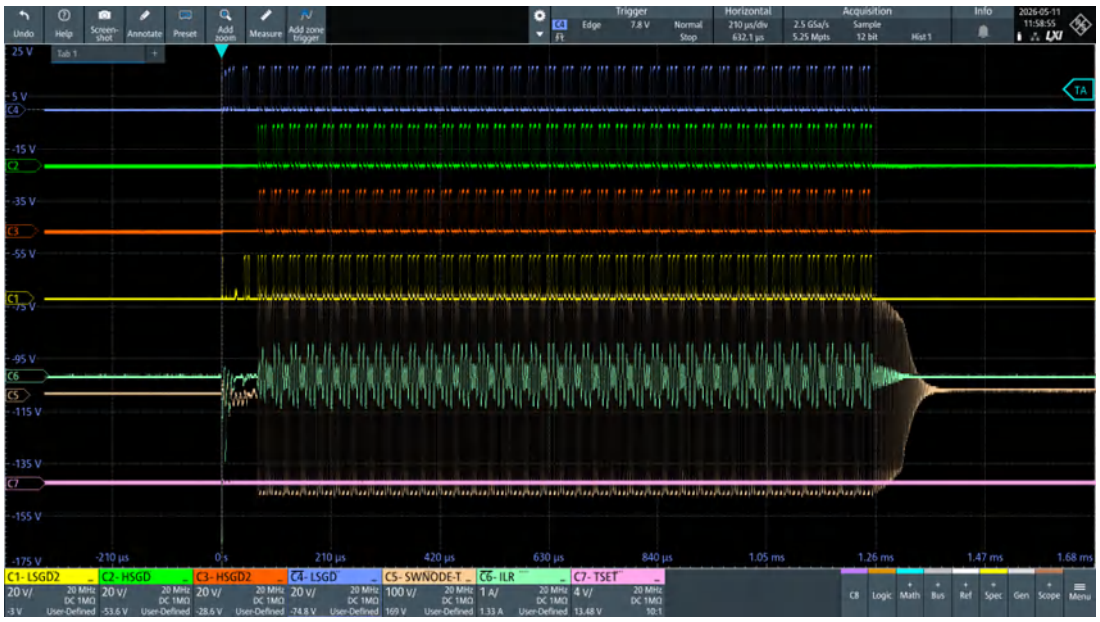


图 4-2. Vin = 185V，Vout = 12V，空载，突发模式运行，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



图 4-3. 启动中的辅助逻辑 – HO2 和 LO2 导通 200µs 脉冲，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压

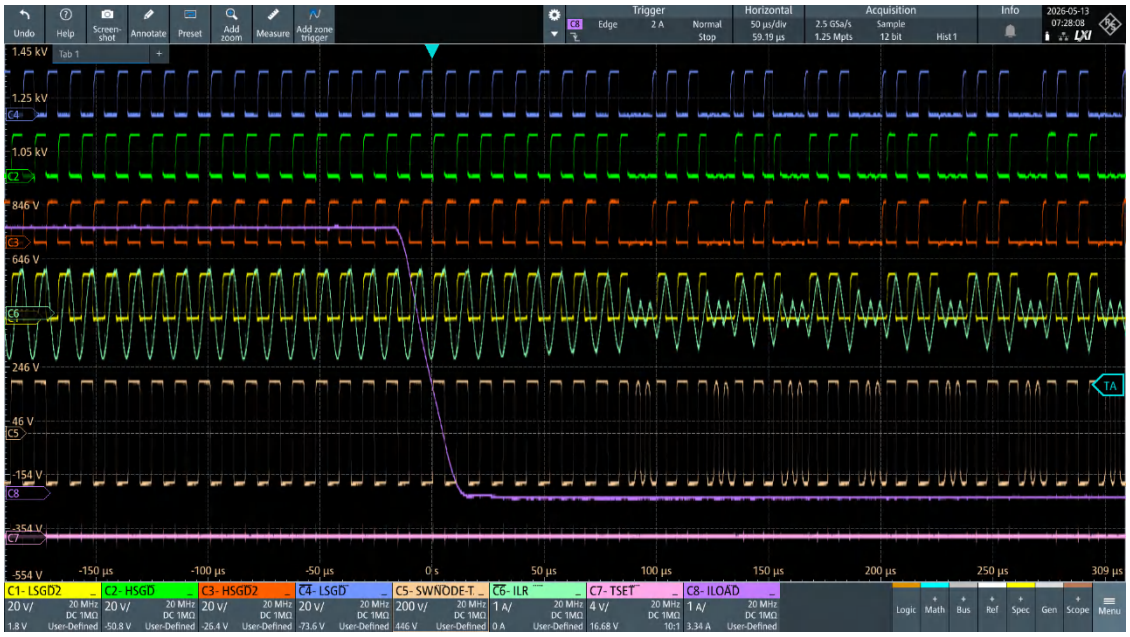


图 4-4. Vin = 185V，Vout = 12V，Iout = 5A 至 0.01A 负载瞬态 (0.2A/µs)，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压，C8 = 负载电流

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



图 4-5. Vin = 185V，Vout = 12V，Iout = 0.01A 至 5A 负载瞬态 (0.2A/µs)，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压，C8 = 负载电流



图 4-6. 在 Vin = 100V、空载下模拟的 BLK 欠压，展示辅助逻辑运行，C1 = LO2 栅极驱动，C2 = HO1 栅极驱动，C3 = HO2 栅极驱动，C4 = LO1 栅极驱动，C5 = 谐振腔电压，C6 = 谐振腔电流，C7 = TSET 引脚电压，C8 = 母线引脚电压

所有实验结果均在修改后的 UCC25661x EVM 上以全桥配置获得，并使能了辅助启动电路（见节 3）。因为全桥 LLC 施加的谐振腔电压是半桥 LLC 的两倍，所以原型机使用原始 EVM 磁性元件在 185VDC 下进行了测试。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 总结

本应用手册演示了使用 UCC25661x 半桥 LLC 控制器实现全桥 LLC 转换器的方法。文中介绍了所需的硬件修改，包括隔离式栅极驱动实现、辅助启动逻辑，以及基于电流互感器的谐振电流检测。在修改后的 UCC25661x EVM 上获得的实验结果验证了所提出的实现方案，并展示了可靠的全桥 LLC 工作。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*UCC25661x 系列针对轻负载效率进行优化的 750kHz 宽 VIN/VOUT 范围 LLC 控制器*，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，*UCC25661x 半桥 LLC 评估模块*，EVM 用户指南。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2026) to Revision A (October 2026)	Page
• 将图 1-1 中使用的术语更新为“控制器桥臂”而不是“主桥臂”	2
• 创建了*栅极驱动架构*子部分	4
• 将内容从*使用 UCC25661x 实现*部分移动至*栅极驱动架构*子部分	4
• 将“主器件”一词全部替换为“控制器”	4
• 创建了 *ISNS 电路修改*子部分	5
• 将内容从*采用 UCC25661x 实现*部分移动至 *ISNS 电路修改*子部分	5
• 创建了*辅助逻辑实现*子部分	6
• 将内容从*使用 UCC25661x 实现*部分移动至*辅助逻辑实现*子部分	6
• 添加了图 3-4	6
• 创建了*逻辑电平信号转换*子部分	6
• 将内容从*使用 UCC25661x 实现*部分移动至*逻辑电平信号转换*子部分	6
• 删除了图 4-7 至图 7-12 与图 4-1 至图 4-6 间的重复内容	9

English Document: SDAA490
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 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。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月