

Technical Article

使汽车设计人员能够通过 LLC 拓扑提高功率密度和可靠性



Andrew Plummer



汽车电源设计人员必须选择拓扑和控制器，除了满足外形和效率等规格要求外，还需满足国际标准化组织 26262 确定的汽车安全完整性等级标准。过去，设计人员使用在半桥拓扑中配置的简单模拟脉宽调制 (PWM) 控制器。但是，对于需要高级保护或更高效率的系统，PWM 控制器无法满足要求。

全新的混合动力汽车或电动汽车 (EV) 需要更高的功率密度、轻负载性能和更高的可靠性，从而更大幅度地延长续航里程和提高安全性，鼓励设计人员探索用于动力总成系统（例如辅助、冗余、分布式和区域模块）的新型架构。为了减少排放，摩托车、高尔夫球车、叉车甚至割草机制造商正在投资购买电压更高的电池组、电动模型和充电基础设施。轻型电动汽车 (LEV) 设计人员需要能够提供高功率密度但不影响成本或可靠性的产品。

与基于 PWM 控制器的半桥转换器相比，由于配有固有的谐振和零电压开关 (ZVS)，电感器-电感器-电容器 (LLC) 拓扑可以提供更好的效率和电磁兼容性 (EMC)。但是，尽管 LLC 拓扑具有诸多优势，例如超低待机功耗和可听到的噪声低，但 EV 制造商一直不愿使用 LLC 拓扑，因为工作输入电压范围有限。汽车直流/直流转换器需要宽输入和/或输出电压的支持或者两者的支持，才能在冷启动、瞬态或碰撞相关事件中保持性能。

Diagram illustrating the vehicle architecture and component integration. The vehicle is shown with various components connected to a central gateway and control units.

Legend:

- Body (Grey circle)
- Infotainment (Dark grey circle)
- ADAS (Red circle)
- HEV/EV powertrain/chassis (Red circle)

Key Components and Connections:

- Central Gateway:** Connects to the Vehicle compute, Telematics control unit, and four Zonal modules.
- Vehicle compute:** Connected to the Central gateway.
- Telematics control unit:** Connected to the Central gateway.
- Zonal modules:** Four modules (two on the left, two on the right) connected to the Central gateway and various sensors/actuators.
- Sensors/Actuators:** Various components like cameras, radar, lidar, and sensors are connected to the Zonal modules via yellow lines.

使用 LLC 拓扑在汽车系统中实现更高的功率密度

UCC25661-Q1 LLC 控制器中的 750kHz 谐振频率有助于缩小磁性元件的尺寸和重量，从而节省成本并提高可靠性。在车辆中分布的许多 LLC 转换器强化了使用更小、更轻的磁性元件的优势。

PWM 控制器能支持高频运行，但其硬开关特性意味着在没有大型 EMI 滤波器的情况下，要符合 EMI 限制要求（例如国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 25 中规定的 EMI 限制）可能具有挑战性。LLC 控制器具有固有的软开关特性，这是因为它们在功率级中具有一个谐振回路。因此，与硬开关半桥拓扑相比，LLC 拓扑产生的传导 EMI 和开关损耗更少。

图 2 说明了硬开关和软开关 (ZVS) 之间的差异。

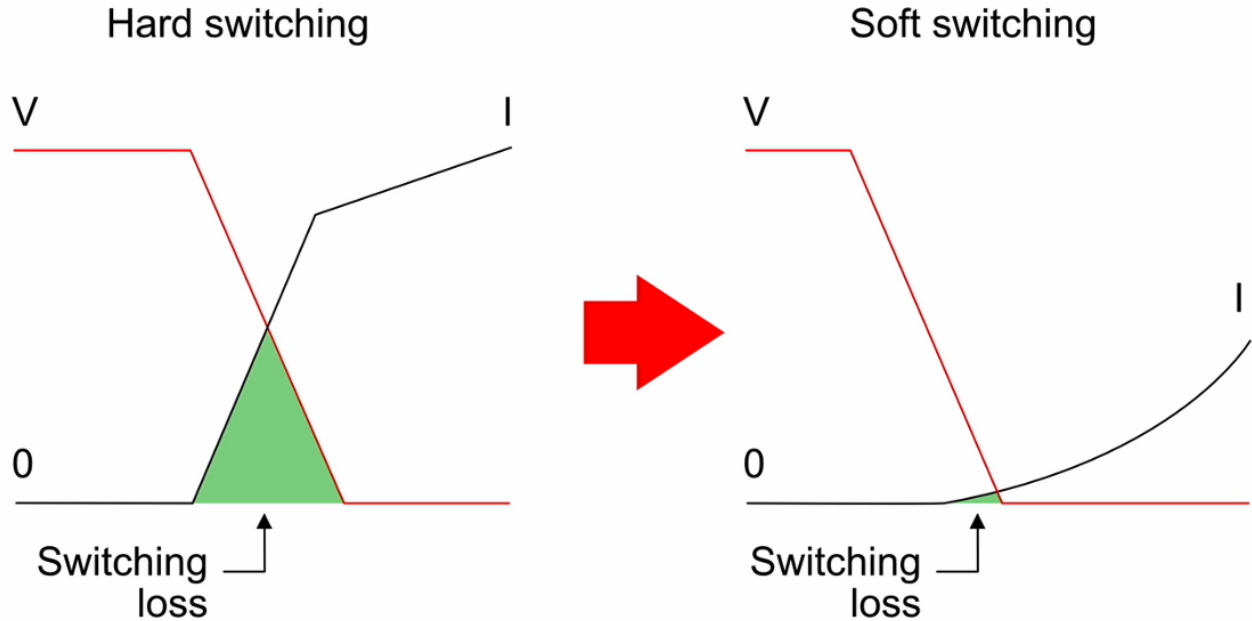


图 2. 半桥 PWM 控制器与 LLC 控制器之间开关事件的示例波形

借助 IPPC 解锁新用例

UCC25661-Q1 LLC 控制器包括 TI 的输入功率比例控制 (IPPC)，可支持电池充电（轻量 EV 适配器，充电站或辅助电源）等宽输出电压应用。IPPC 还支持电动汽车中电池供电型直流/直流系统的宽输入电压应用。LEV 正从 12V 到 36V 的低压电池组过渡到 48V 甚至高于 96V 的更高电压，从而更大限度地扩大续航里程。

支持宽输出电压范围，工程师能够设计 LLC 转换器，避免在电池电压较低时进入突发模式，从而延长电池寿命。在调优突发模式性能稳定性时，IPPC 还会缩短开发时间。UCC25661-Q1 中的 IPPC 能大幅降低控制器的供电开关频率，从而能突破 LLC 控制律的传统限制。这样做可以让工程师避免在车内和车外电池应用中出现不必要的过载保护。

当禁用功率因数校正而不触发过载功率限制时，IPPC 还能更有效地提供功率。混合突发模式不仅可以更大限度地降低可听见的噪声，还可以改善轻负载和空载性能，这对于防止电池耗尽非常重要。

UCC25661-Q1 具有强大的保护功能，例如预偏置启动、软启动和电容区规避功能，这些功能有助于实现高度可靠的电源设计。

通过集成功能简化和保护电源单元

UCC25661-Q1 的自适应软启动功能可稳定并缓慢斜升其电源电压，从而使连接到 VDD 引脚的电容器在启动之前充满电，并保护电源免受过大的浪涌电流的影响。

根据负载条件，使用 LLC 控制器的电源转换器可在电容或谐振区域工作。在电容区运行可能会对功率级造成灾难性损坏。虽然大多数 LLC 控制器在检测到电容区运行情况后 can 停止运行，但 UCC25661-Q1 具有电容区规避功能，可终止栅极驱动，从而防止损坏。

结语

电动汽车依靠 LLC 拓扑等隔离式电源拓扑的改进和 IPPC 等控制方法来定义直流/直流转换器，支持下一代架构。基于 UCC25661-Q1 LLC 控制器的隔离式直流/直流转换器可在相同或更小的外形尺寸内更高效地提供功率，同时保持性能。

其他资源

- 阅读以下应用手册：
 - [UCC25661x-Q1 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。](#)
 - [UCC25661x 产品选型指南。](#)
- 查看以下参考设计：
 - [通用输入，500W 恒流恒压电动自行车充电器参考设计。](#)
 - [适用于轻型电动两轮车的 750W 非车载充电器参考设计。](#)

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

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