Technical Article

提高下一代电动汽车 (EV) 牵引逆变器性能所需的三个关键元件

George Lakkas

牵引逆变器将 EV 电池的高压直流转换成电机所需的交流电。牵引逆变器用于控制电机的速度和扭矩，其效率对功率耗散和热耗散以及 EV 的续航里程有直接影响。

图 1 显示了牵引逆变器的一些最重要元件：微控制器 (MCU)、隔离式栅极驱动器和隔离式辅助电源芯片或模块。

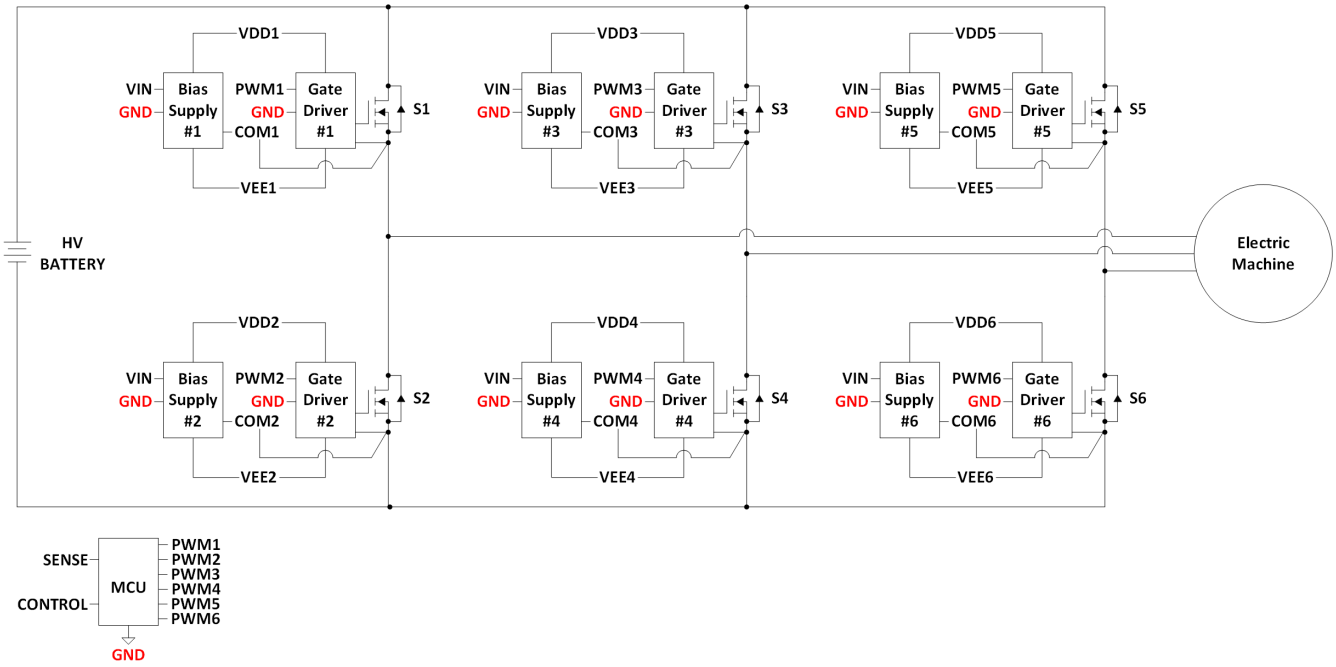


图 1. EV 牵引逆变器框图

为了更大限度地提高牵引逆变器的可靠性和效率，必须解决与这三个组成部分中每一个部分相关的设计挑战。让我们来看看有助于应对这些挑战的创新技术。

元件 1：实时控制 MCU

减小 EV 牵引逆变器的尺寸和重量，从而延长行驶里程并降低成本，这给 MCU 带来了新的需求。减小尺寸和减轻重量的一种方法是以更高的速度 (>20kRPM) 旋转电机，但为此需要优化控制环路以实现低延迟，无论是模数转换器 (ADC) 读取、磁场定向控制 (FOC) 计算、还是脉宽调制 (PWM) 写入。

TI 具有许多加速器和特性来实现低控制环路延迟，包括一些专为牵引逆变器设计的加速器和特性。AM263P4-Q1 MCU 上的两个此类加速器包括旋转变压器数字转换器 (RDC) 及三角函数加速器 (TMU)。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

RDC 将来自旋转变压器传感器的正弦/余弦反馈转换成速度和位置。此计算在专用硬件中进行，以加快转换过程并从主内核上卸载此功能。TI MCU 中内置的其他诊断功能包括 $\sin^2 + \cos^2 = 1$ 检查。将这些诊断与两个冗余 RDC 相结合，可为牵引逆变器提供优化解决方案，该解决方案必须符合汽车安全完整性等级 (ASIL) D。

TMU 协处理器与每个内核并行运行，从主内核卸载三角函数，同时还将这些函数的速度提高了 8 倍。提高的速度为牵引逆变器提供了显著的控制环路优势，因为大多数牵引逆变器控制环路使用 FOC 算法来实现需要三角数学函数的 Clarke 和 Park 变换。

RDC 和 TMU 加速器（包括控制子系统）可使实时控制延迟小于 3µs，从而能够控制远超过 20kRPM 的高速牵引逆变器电机，从而能够减小系统尺寸和减轻重量。

元件 2：栅极驱动器

随着牵引逆变器的功率等级接近 500kW，提高效率（减少整个驱动周期的能量损耗）是栅极驱动器的主要设计考虑因素。其他设计要求包括功率密度、重量、高度、功能安全及成本。

为了提高效率，业界广泛采用碳化硅 (SiC) 场效应晶体管 (FET)；为这些开关供电的隔离式栅极驱动器变得更加复杂，现在包括隔离式 ADC 检测、多种过流保护模式、偏置电源监控、栅极监控、可编程安全状态、内置自检、以及一项称为实时可变栅极驱动强度的新特性。

根据系统的安全要求，具有符合功能安全标准的栅极驱动器集成电路 (IC) 有助于支持系统符合国际标准化组织 26262 标准。例如，栅极驱动器可帮助确保单个故障和潜在故障的 ASIL-D 故障检测分别为 ≥99% 和 ≥90%。

现代栅极驱动器 IC 通过电压的压摆率控制方法（瞬态电压）尽可能快速地开启和关闭 SiC FET，从而最小化“时间 = dt”分量，降低开关过程中的导通和关断能量，进而减少整体开关损耗。这种控制和改变栅极驱动电流强度的能力显著降低了开关损耗，但代价是在开关过程中增加了开关节点处的瞬态过冲，如图 2 所示。

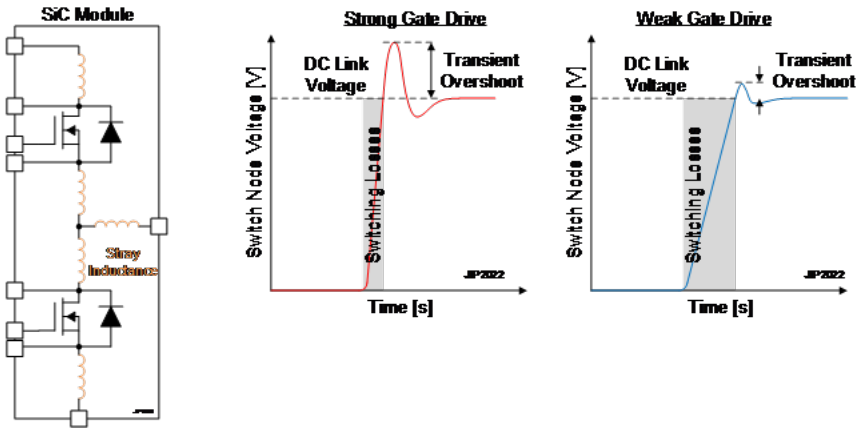


图 2. 通过改变栅极驱动器 IC 驱动强度控制 SiC 开关速度

实时可变的栅极驱动强度为优化牵引逆变器设计提供了出色的灵活性，从而提高效率并缓解瞬态过冲。

从 EV 电池充电周期来看，SiC 瞬态过冲减少和效率优化是可能的，四分之三的充电周期可用于提高效率；请参阅图 3。

English Document: SSZTD11
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

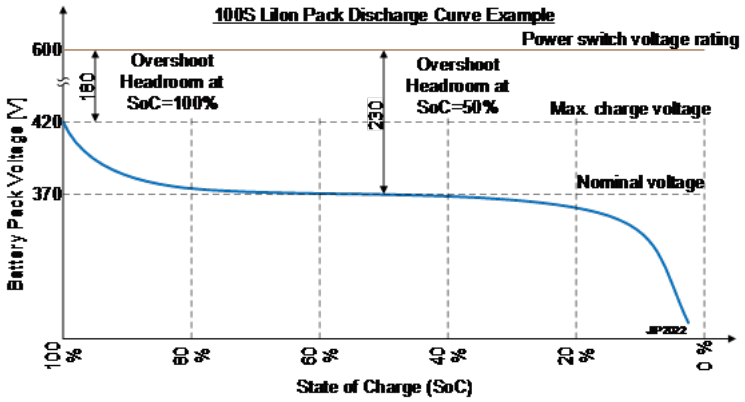


图 3. 电池峰值电压与荷电状态间的关系期间的效率区

符合功能安全标准的 UCC5880-Q1 栅极驱动器有助于通过 4MHz 双向串行外设接口 (SPI) 总线或三个数字输入引脚（如果您不希望使用 SPI 总线在上电时设置驱动强度），使用双输出、分离输出结构和可变电流强度配置实现效率增益。

元件 3：辅助电源

EV 需要牵引逆变器进行高效的电源转换，以便在每个完整放电周期内实现更长的电池运行时间。隔离式栅极驱动器辅助电源可以通过尽可能地减小 SiC 电源模块的传导功率损耗来实现高效率。将栅极电压设置为最大允许电平可降低漏源导通电阻 ($R_{DS\ (on)}$)，同时确保可靠性 (图 4)。当牵引逆变器中的电流接近并超过 400A 时，降低 $R_{DS(on)}$ 非常重要，这会使 $I_{dson}^{2} \times R_{DS(on)}$ 的传导功率损耗过大。

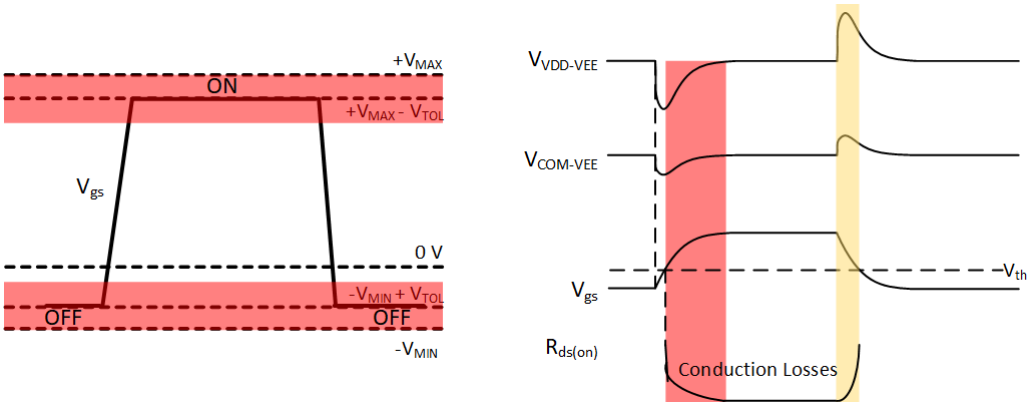


图 4. SiC 栅源电压限值和开关周期内的导通损耗

TI 隔离式直流/直流偏置模块可更大限度地降低导通损耗，而 UCC5880-Q1 可更大限度地降低开关损耗。对于 SiC 或 IGBT 驱动器，正负栅极驱动轨电压均可在最高效的栅极电压设置下轻松调节，在整个工作条件（电压、安全工作区功率、温度和工艺）下的精度小于 1.3%。闭环反馈可为栅极驱动电压控制提供高精度调节，从而更大限度地提高 SiC 或绝缘栅双极晶体管模块的安全性和效率。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

TI 隔离式直流/直流偏置模块可提供高密度解决方案、集成了隔离电源变压器、初级侧电桥、次级侧电桥和控制逻辑。小封装尺寸使多相牵引逆变器实现了高效的小型驱动解决方案，印刷电路板面积减小了>30%，高度小于 4mm，并且省去了 30 多个分立式元件，从而提高了时基故障率 (图 5)。

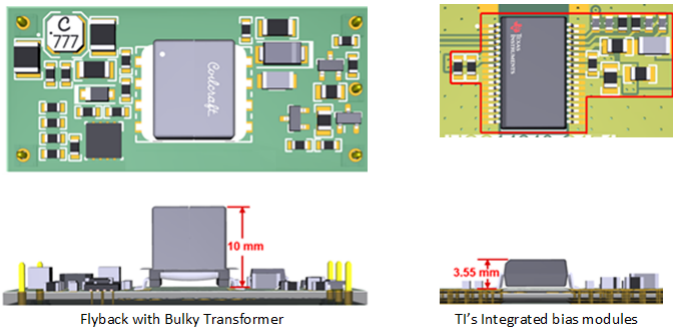


图 5. TI 隔离式辅助电源模块与反激式器件尺寸与器件比较

结语

下一代牵引逆变器的运行效率最高可提高 5%，并可实现更高的速度、更高的功率密度、更低的高度、更轻的重量和更低的系统成本。随着 EV 市场加速发展，新制造商不断推出新产品以从传统领先企业中抢占市场份额，让牵引式逆变器在这些领域持续进步。

其他资源

- 详细了解如何借助实时可变栅极驱动器更大限度地提高效率。
- 阅读降低 SiC 牵引逆变器的功率损耗和热耗散。
- 请查看汽车级大功率、高性能 SiC 牵引逆变器参考设计。

English Document: SSZTD11
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