

## Technical White Paper

## 电动汽车牵引逆变器的设计优先事项



Ivana Santrac and Hannes Schmid

## 摘要

本技术白皮书探讨了牵引逆变器的主要系统趋势、架构和技术。本文档介绍了用于实现牵引逆变器的各个器件，包括嵌入式处理、电源管理、栅极驱动、感应以及高压域和低压域技术。最后，本文档还重点介绍了系统工程概念和德州仪器 (TI) 的参考设计，它们可用于缩短牵引逆变器的设计时间。

## 内容

1 简介.....	3
2 架构和趋势.....	4
2.1 两电平逆变器和三电平逆变器.....	4
2.2 电驱动桥和多合一架构.....	5
2.3 牵引逆变器设计的其他趋势.....	6
3 支持牵引逆变器的关键技术.....	8
4 微控制器和电源管理 IC.....	9
4.1 C2000™ 系列.....	9
4.2 电源管理 IC.....	10
5 隔离式栅极驱动器.....	11
6 低压隔离式偏置电源.....	14
7 高压隔离式偏置电源.....	16
8 直流链路有源放电.....	16
9 转子位置感应.....	17
10 隔离式电压和电流检测.....	18
10.1 隔离式电流检测.....	19
10.2 隔离电压检测.....	20
11 系统工程和参考设计.....	21
12 结语.....	22
13 参考资料.....	23

## 插图清单

图 2-1. 具有额外 T 型开关桥臂的三电平 T 型牵引逆变器.....	4
图 2-2. 三电平设计 (顶部) 与两电平设计 (底部) 的电压输出波形.....	5
图 2-3. EESM 牵引逆变器系统图.....	7
图 3-1. 牵引逆变器系统方框图.....	8
图 4-1. TI C29 MCU 系列与其他同类产品的实时控制性能对比.....	10
图 4-2. TPS65386x-Q1 PMIC 的典型应用图.....	11
图 5-1. 弱栅极驱动与强栅极驱动以及对损耗和过冲的影响.....	12
图 5-2. 可编程栅极驱动器的组合驱动输出.....	12
图 5-3. 可编程驱动强度应用示例.....	13
图 5-4. UCC5880-Q1 用于牵引逆变器中可变隔离式栅极驱动的评估模块.....	14
图 6-1. 低压偏置电源架构.....	14
图 6-2. 隔离式偏置电源的常见拓扑.....	15
图 6-3. 转换器模块 (全分布式) 与反激式 (半分布式) 系统设计的尺寸比较.....	15
图 8-1. 基于智能 AFE 的直流链路有源放电 (左) 和测试波形 (右).....	17
图 9-1. 旋转变压器结构具有励磁线圈 $L_{EXC}$ 和次级线圈 $L_{SEC1/2}$ , 用于获取电机旋转角度.....	18
图 9-2. 使用 LCD5072-Q1 的电感式感应图.....	18

图 10-1. TMCS2100-Q1 物理配置.....	19
图 10-2. AMC0380D-Q1 方框图.....	20
图 10-3. 将电阻分压器集成到 TI AMC038x-Q1 系列可节省系统空间.....	21
图 11-1. TIDM-02014 牵引逆变器参考设计.....	22

## 表格清单

表 2-1. 电动动力总成中的不同元件集成级别.....	5
表 2-2. 多合一集成的设计策略.....	6
表 7-1. 支持高压隔离式偏置电源拓扑的 TI 器件.....	16
表 10-1. 牵引逆变器中的不同电流检测方法.....	19

## 商标

Prius™ is a trademark of Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha.

Bolt EV™ is a trademark of General Motors LLC.

Focus Electric™ is a trademark of Ford Motor Company.

e-Golf™ is a trademark of Volkswagen Aktiengesellschaft.

iX3™ is a trademark of Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft.

C2000™, Sitara™, and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Toyota® is a registered trademark of Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha.

Chevrolet® is a registered trademark of General Motors LLC.

Ford® is a registered trademark of Ford Motor Company.

VW® is a registered trademark of Volkswagen Aktiengesellschaft.

BMW® is a registered trademark of Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft.

Wolfspeed® is a registered trademark of Wolfspeed, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

牵引逆变器是电动汽车 (EV) 传动系统的核心。因此，逆变器在提高全球电动汽车的采用率方面发挥着至关重要的作用。牵引逆变器通过将电池或发电机（如混合动力汽车）的直流电源转换为交流电源来提供扭矩和加速度，从而为永磁电机 (PMSM)、感应电机 (IM)、外部励磁同步电机 (EESM) 和开关磁阻电机 (SRM) 等牵引驱动电机供电。牵引逆变器还转换电机的回收能量，并在车辆滑行或制动时对电池充电。

在测量牵引逆变器的性能时，需要考虑几个关键的设计优先事项和权衡：

- 功能安全和信息安全 - 功能安全设计通常遵循 ISO 26262 或电子安全车辆入侵保护应用流程，其中包括安全诊断、系统级失效模式和影响分析，以及硬件安全模块 (HSM)。
- 重量和功率密度 - 实现高功率密度逆变器设计的关键技术是宽带隙开关和动力总成集成。根据美国能源部 (DOE) 和美国橡树岭国家实验室的数据，到 2025 年，美国市场上的原始设备制造商已达到 100kW/L 的逆变器功率密度目标。使用 SiC 可实现 800+V 直流母线电压、降低额定电流并简化线束。
- 效率 - 系统效率包括牵引逆变器效率、电机效率和再生制动模式下的逆变器效率。
- 性能和可靠性 - 通过电机扭矩控制来测量逆变器系统的性能，包括电流检测环路和电机扭矩瞬态响应。可靠性包括电源模块可靠性、电机可靠性和隔离等。
- 系统成本 - 除了电机和线束之外，主要元件包括：
  - 机械结构：逆变器壳体和冷却、母线排
  - 电源模块
  - EMI 滤波器
  - 直流链路电容器
  - MCU 和控制电子产品
  - 栅极驱动器
  - 电源转换
  - 有源放电电路
  - 电机位置传感器
  - 电流和电压传感器
  - 通信接口

## 2 架构和趋势

牵引逆变器的架构因车辆类型而异。插电式混合动力汽车 (PHEV) 和纯电动汽车 (BEV) 使用三相电压源牵引逆变器拓扑来驱动汽车，功率级别在 100kW 至 500kW 范围内。虽然单桥驱动是这些产品中的标配（前桥或后桥），但在另一个车桥上增加第二个牵引逆变器和电机来构建所谓的双电机架构，已成为一种广受欢迎的方案。此外，在 PHEV 中，用于启动内燃机（有时甚至用于驱动汽车）的集成式起动机发电机 (ISG) 采用了另一种逆变器结构。

在电池组和牵引逆变器之间，会放置一个直流链路电容器，用于为逆变器提供受控的直流电压。该电容器为高频电流提供低阻抗路径，同时提供储能以保持低纹波电压。在发生关断、故障或事故时，该直流链路电容器必须快速放电，使应急响应人员能够安全地操控汽车。这可实现牵引逆变器的核心功能之一，即直流链路有源放电。

在某些情况下，可在电池电压进入直流链路电容器之前，使用直流/直流升压转换器升高电池电压。这种情况适用于电池电压电平较低的车辆，主要见于混合动力汽车。在如此低的电压 (100+V) 下为牵引逆变器提供功率输出会导致较高电流流过接线，而通过将直流/直流升压转换器输出端的电压电平升高到 400+V，可有效降低该电流。此外，直流/直流升压转换器可稳定直流链路电压并实现可扩展的电池架构。但是，转换器可能会增加系统的成本、尺寸和重量，并导致转换损耗。

### 2.1 两电平逆变器和三电平逆变器

两电平逆变器是电动汽车和业界常用的牵引逆变器拓扑，其功率范围为数十千瓦到数百千瓦不等。两电平逆变器具有两个电压电平 DC+ 和 DC-，以及六个独立开关，后者可根据相位方向生成交流信号，从而为定子绕组通电。开关频率典型范围为 5kHz 至 30kHz。

此设计的一个改进方向是三电平逆变器，它可显著提高效率、降低谐波失真，并允许使用更小的电磁干扰 (EMI) 滤波器。在三电平 T 型逆变器中，在现有开关之间增加一个开关桥臂 (T 型桥臂)，使系统能够为逆变器级提供第三个电压电平 (DC/2)。请参阅图 2-1。

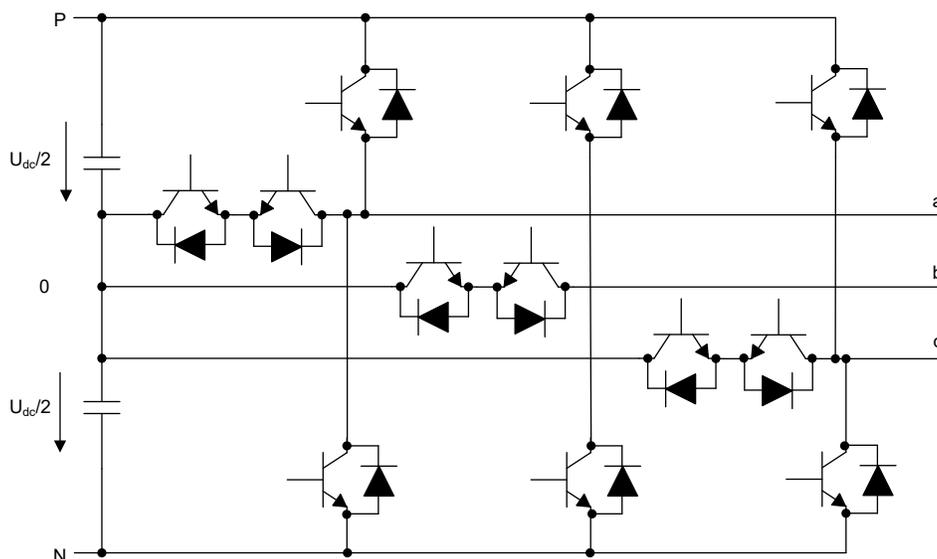


图 2-1. 具有额外 T 型开关桥臂的三电平 T 型牵引逆变器

如图 2-2 所示，为三电平 T 型逆变器提供的第三个电压电平改善了输出电压正弦波形。第三个电压电平还显著降低了三次谐波失真 (THD)。综合起来，这可以降低电机功率损耗，而这正是系统中的主要损耗。

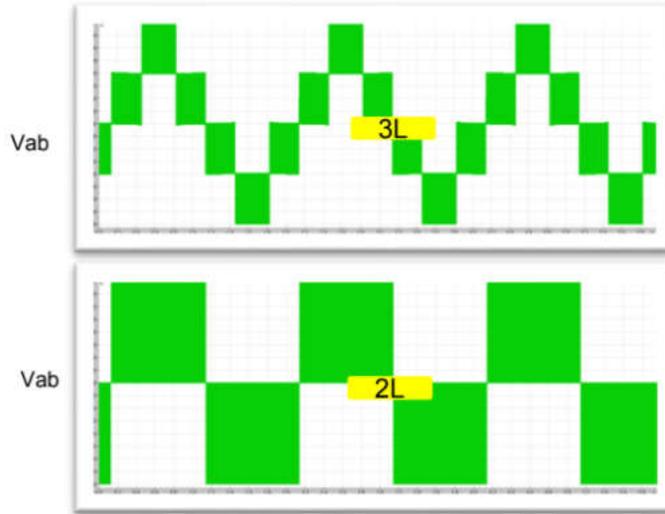


图 2-2. 三电平设计 (顶部) 与两电平设计 (底部) 的电压输出波形

为了进一步提高系统性价比，可以在不同负载条件下将三电平 T 型逆变器作为两电平和三电平控制的组合驱动。在此设置中，T 型桥臂开关仅在轻负载条件下工作，因此可降低额定电流，从而可能降低系统的总体成本。在高负载条件下，系统照常在两电平模式下工作。

## 2.2 电驱动桥和多合一架构

改进系统级集成的一个示例是实现电驱动桥，将电力电子系统、电机和变速器组合在一个外壳中。电驱动桥通过实现更高扭矩和极高转速来提高电机性能，同时改进的冷却功能和线圈绕组结构可提高功率密度和电机效率。电驱动桥如今已得到广泛应用，可见于前桥和后桥驱动以及双电机车型中。

集成可以扩展到电动动力总成的其他部分。这推动了多合一系统集成趋势的兴起，将更多的动力总成元件组合起来，从而有可能改善尺寸、成本、效率和重量。多合一设计不存在标准组合。通常，表 2-1 中的元件最高可实现十二合一组合。

表 2-1. 电动动力总成中的不同元件集成级别

元件	多合一设计名称			
电机	三合一 (电驱动桥)	六合一	八合一	十二合一
逆变器				
变速箱				
车载充电器 (OBC)				
高压直流/直流转换器				
配电单元 (PDU)				
车辆控制单元 (VCU)				
电池管理系统 (BMS)				
起动机发电机				
智能升压模块				
热管理				
正温度系数 (PTC)				

对于这些多合一级别中的任何一个，通常可以观察到三种不同的策略 (参阅表 2-2)：

1. 盒内多合一：将不同的元件板组合到一个箱体中。
2. 电路板级多合一：将多个功能组合到一块电路板上。

### 3. 器件级多合一：将多个功能组合到一个 MCU 中。

**表 2-2. 多合一集成的设计策略**

集成因素	一个盒体	一块电路板	一个芯片
可扩展性	高 - 每项功能都具有特定的 PCB	可扩展性低	
负载共享	负载较低 - 每个 MCU 都专注于实时任务，不会过载	在 MCU 之间共享工作	负载较高 - MCU 同时处理多项实时任务
安全	必须实现		
可用性	独立运行	在一块电路板和芯片设计之间	如果通用元件 (MCU、PMIC 等) 出现故障，则无法实现可用性
布局	更易于布局		难以布局，存在散热和 EMC 问题
软件	复杂度较低		复杂度较高
热量	多发热点分布热量		单发热点，可能需要主动冷却
资源	可使用不同的处理器元件进行扩展		需要级联设计
通信	需要电缆、连接器和 PHY	无需电缆、连接器或 PHY	
资源扩展	无需 GPIO 扩展器	可能需要 GPIO 扩展器	固定资源和引脚数，可能需要额外的逻辑
设计重量	高 - 由于采用多个电路板和接线	低	
设计尺寸	最大体积 (堆叠电路板)	单板设计，实现低高度	

2025 年，八合一架构在市场上占据主导地位。然而，预计从 2030 年开始，十二合一集成将与较为落后的六合一集成版本一起占据相当大的份额。截至目前，集成进程主要由中国推动。

### 2.3 牵引逆变器设计的其他趋势

在牵引逆变器设计中，还有其他趋势值得一提。其中部分趋势包括：

- 提高功率级别和汽车安全完整性等级 (如 100kW 至 500kW、ASIL C 至 ASIL D)
- 随着开关瞬态电压升高，向 800+V 技术转型 (截至 2025 年，900V 汽车已上市)
- 轻松调整栅极驱动强度以减少过冲并提高效率
- 采用电感式位置感应技术而不是旋转变压器，从而可降低成本
- 采用无芯电流检测替代方案，包括 U 形屏蔽器件和多传感器无芯 (TMCS2100-Q1) 器件等，以简化系统复杂度
- 通过外部励磁同步电机 (EESM，参阅图 2-3)，去除电机中的稀土材料
- 实现以太网通信
- 可采取其他方法来提高 IC 级集成度，以实现潜在的成本降低和空间节省：
  - 将有源放电集成到栅极驱动器中
  - 将直流/直流控制器集成到栅极驱动器中
  - 将变压器集成到偏置电源中

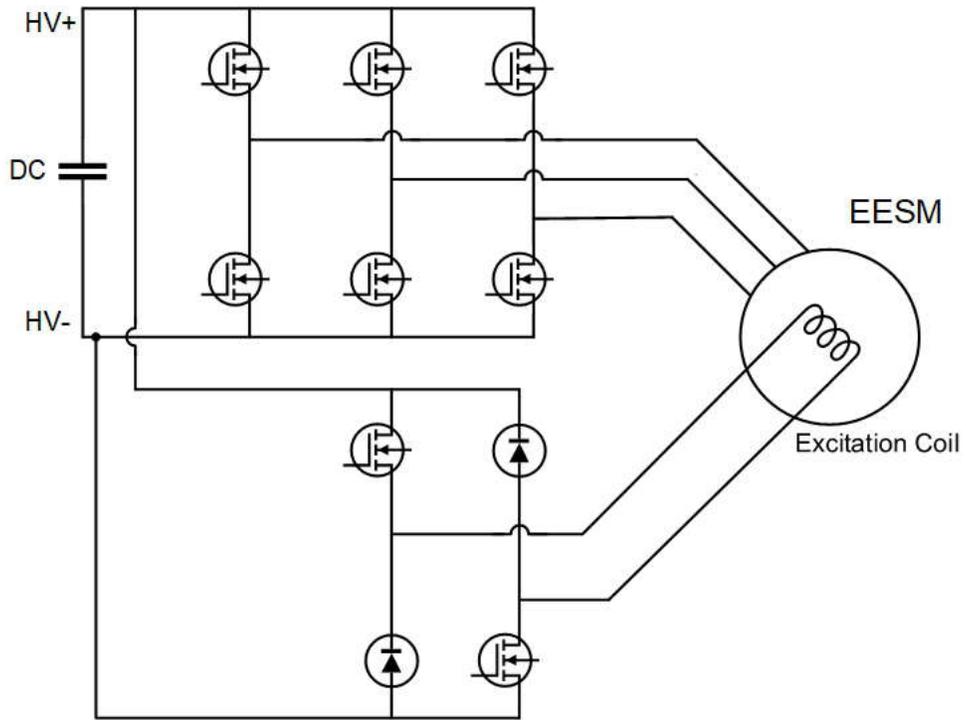


图 2-3. EESM 牵引逆变器系统图

### 3 支持牵引逆变器的关键技术

牵引逆变器综合了动力总成架构的高压部分（高压电池侧，400V 至 800V+V）和低压部分（低压电池侧，12V 至 48V）的功能。因此，牵引逆变器需要在低压域和高压域中的器件之间进行隔离。隔离式栅极驱动器、数字隔离器、隔离式调制器和放大器以及固态继电器中采用的 TI 电容和电感隔离技术，可在使用二氧化硅作为电介质的电容电路中整合增强型信号隔离。图 3-1 所示为牵引逆变器系统的方框图。隔离栅（红色虚线）将低压域（低压电池侧）和高压域（高压电池侧）隔开。

在低压域中，微控制器 (MCU) 决定了如何驱动功率级。MCU 向隔离式栅极驱动器发送脉宽调制 (PWM) 信号，后者跨过内部隔离栅将信号传输到高压侧，以驱动功率级的栅极。为了将信号放大至大容量功率级所需的强度，隔离式栅极驱动器需要来自隔离式偏置电源的栅极电源电压。MCU 在闭环中运行感应和速度控制，并处理主机功能以满足强制的硬件和软件安全要求以及安全代码执行要求。MCU 与旋转变压器或霍尔效应传感器的模拟前端相连。

实施安全电源树可防止 MCU 和关键电源轨断电。连接到低压汽车电池的电源管理集成电路 (PMIC) 为 MCU 供电。在到达隔离式偏置电源之前，低压电池电压可预调节至稳定的电源电压。此外，为了达到更高的安全级别，可以添加高压转低压直流/直流电源，以通过 ORing 在低压侧提供电压，即使在低压电池或预调节出现故障也是如此。

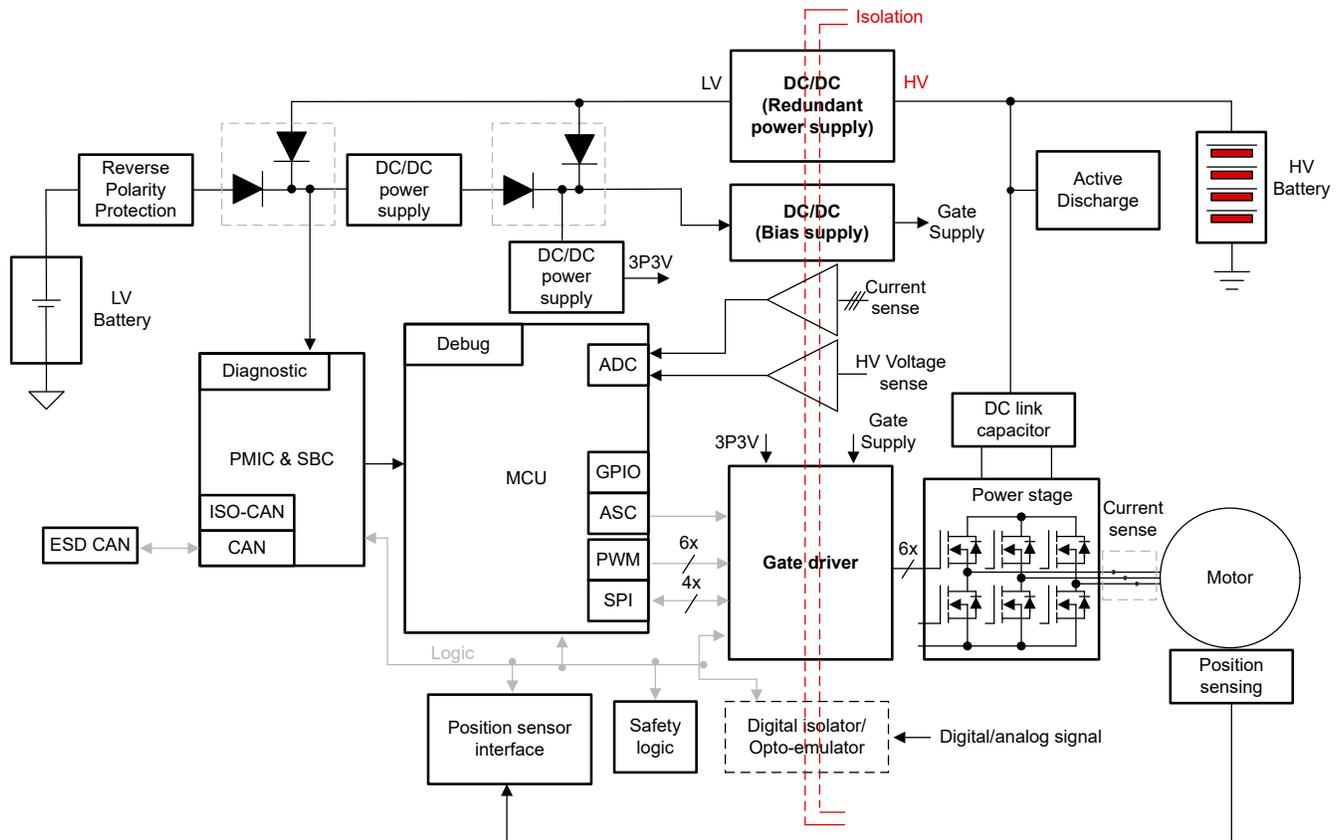


图 3-1. 牵引逆变器系统方框图

高压域中的主要功能包括：

- 电源开关 - 通常为基于碳化硅 (SiC) 或绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的电源模块，它们由具有保护和监控功能（例如内部温度检测和主动短路 (ASC) 保护）的隔离式栅极驱动器控制。
- 隔离式栅极驱动器 - 此 IC 从低压侧 MCU 获取 PWM 信号输入，以驱动高压侧电源模块的栅极。隔离式栅极驱动器跨内部隔离栅传输该数字信号，并使用高压侧的信号来驱动电源模块的栅极。同时，隔离式栅极驱动器可防止危险的直流电或不受控制的瞬态电流从高压域中流出。
- 隔离式偏置电源 - 电隔离电源，从低压侧获取模拟输入并将输入传输到高压侧，从而为栅极驱动器提供次级电源。其中，隔离式栅极驱动器将模拟电压与 PWM 信号相结合，以驱动功率级栅极。

- 隔离式电压和电流检测 - 用以检测直流链路电压和电机相电流，并确保向电机施加正确的扭矩，同时用于电机控制环路。
- 位置感应 - 对于闭环控制满足安全要求至关重要。对于位置控制，传感器可实现对已知位置和整个运动过程中位置的感应。
- 有源放电 - 将直流链路电容器电压放电至安全电压。对于能够产生反电动势 (EMF) 的电机类型，需要进行有源放电。联合国欧洲经济委员会第 94 号联合国条例要求直流母线电容器的电压在 5 秒内降至安全电压 (60V)。此外，还包含诊断电路，用于对关键功能执行自检，以防止系统故障。

逆变器控制和安全方案也因车辆类型而异。例如，可以使用永磁同步电机 (PMSM)，因为 PMSM 具有高效率、低扭矩纹波和宽速度范围。PMSM 通常使用空间矢量 PWM 控制，也称为场定向控制。PHEV 和 BEV 中的其他常用电机类型包括感应电机、外部励磁同步电机和开关磁阻电机。

为了减少永磁体中使用的潜在价格昂贵且因地缘政治因素而不稳定的稀土材料，外部励磁同步电机 (EESM) 不仅在次车桥中的应用增加，更是扩展到了主车桥应用。EESM 电机类型包括导电 EESM 和电感 EESM (iEESM)。使用 EESM 的商用车辆包括 Toyota® Prius™、Chevrolet® Bolt EV™、Ford® Focus Electric™、VW® e-Golf™、BMW® iX3™ 等等。在 EESM 中，永磁转子被替换为由单独直流励磁电流供电的电磁体，例如在添加到传统逆变器结构中的 H 桥配置中。此外，这样可以动态控制转子磁通，这是标准磁体无法实现的。

## 4 微控制器和电源管理 IC

定义了逆变器架构和规格后，下一步是选择 MCU。TI 为 HEV 和 EV 应用提供了强大的微控制器产品系列，包括具有实时控制功能和快速控制环路的高性能 C2000™ MCU 系列。除了 MCU 外，还必须选择一款高性能电源管理 IC (PMIC) 来提供电源和安全相关通信环路。尽管 MCU 和 PMIC 通常被视为配套组件，但二者之间不存在固有的依赖关系，因此 TI 可提供独立于 MCU 组件的 PMIC 评估，从而提高系统的灵活性并增加其设计选项。

### 4.1 C2000™ 系列

二十多年来，TI C2000™ MCU 系列一直在数字电源和电机控制应用中提供卓越的实时控制性能。这些 MCU 集成了闪存存储器、用于在时间关键型应用中实现并行测量的模数转换器 (ADC) 模块、高分辨率脉宽调制 (HRPWM)、数字信号处理器 (DSP) 等。C2000™ 系列的应用范围很广，涵盖从独立逆变器到完整的动力总成集成，包括牵引逆变器、车载充电器 (OBC)、高压直流/直流转换器、暖通空调 (HVAC)。

C2000™ MCU 包含 TI 专有的用于实时处理的 64 位 C29 CPU，以及用于高级控制的、经过验证的灵活架构 C2000™ 控制技术。C2000™ MCU 在执行时间方面的实测性能在同类产品中非常出色。请参阅图 4-1。具体而言，F29H85x 系列器件中包含的 C2000™ MCU 具有以下竞争优势：

- 功能安全等级高达 ASIL D
- 4MB 闪存
- 一个硬件安全模块 (HSM) 和可配置逻辑块 (CLB)，支持：
  - AUTOSAR
  - MCAL
  - 第三方基础软件模块 (BSW)

TI 的 C2000™ MCU 包含以下特性，有助于加快牵引逆变器的控制算法：

- 基于状态机的 32 位浮点控制律加速器，能够独立于主 DSP 内核磁场定向控制执行代码
- 此系列支持 32 位浮点运算或 64 位浮点运算
- 三角函数加速器 (TMU)，提供内在指令以支持变换和扭矩环路计算中常见的三角数学函数。
- 减少了复杂数学方程式中 Viterbi 和循环冗余校验运算的周期数

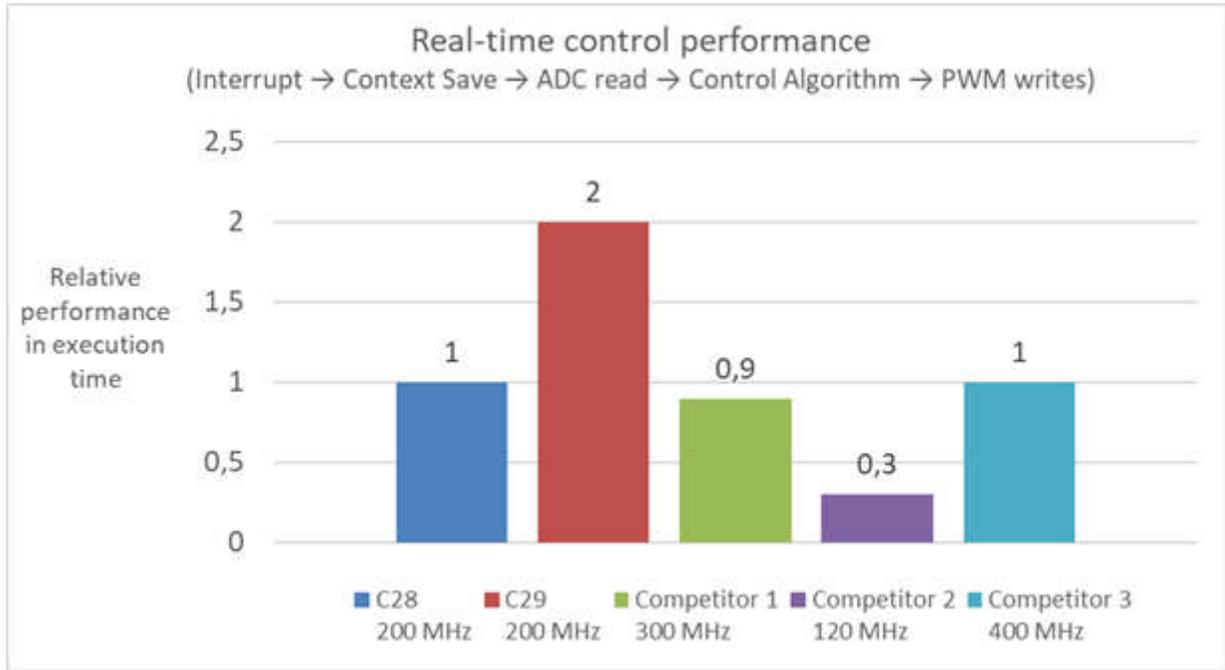


图 4-1. TI C29 MCU 系列与其他同类产品的实时控制性能对比

## 4.2 电源管理 IC

PMIC 整合了 MCU 监控功能，例如看门狗（问答式或触发式）计时器、错误信号监控以及使用 SPI、GPIO 和 I2C 接口的诊断。PMIC 与 MCU 之间通信的复杂度通常促使牵引逆变器设计人员从一个供应商选择两个组件。但是，TI 配置了一系列安全 PMIC，它们也支持其他同类产品的 MCU，同时达到所需的功能安全等级。这种额外的支持增加了设计的灵活性。

对于牵引逆变器使用场景，TI 推荐使用 [TPS653860-Q1](#) 和 [TPS653861-Q1](#) PMIC 器件，它们具有以下电源输出：

- 前置稳压器（降压/升压转换器）在 1.5A（版本 1）或 2.8A（版本 0）条件下具有 6V、5V 或 4.3V 输出
- 受保护的 LDO (PLDO) 1 + 2 具有 VBAT 和 GND 短路保护功能，在 1.xV、2.5V、3V、3.3V 和 5V 条件下可提供高达 200mA 的电流
- LDO 1 + 2 具有旁路模式，可在 1.0V 至 1.8V、3.3V 和 5.0V 条件下提供 600mA 的电流
- LDO 3 + 4 具有旁路模式，可在 1.0V 至 1.8V、3.3V 和 5.0V 条件下提供 200mA 的电流，精度为 1%

有关典型应用图，请参阅图 4-2。由于最大输入电压为 36V，采用 48V 电池的车辆需要一个前置稳压器件。在车辆架构内，处理 48V 阶跃的多个应用中都观察到了类似的配置。

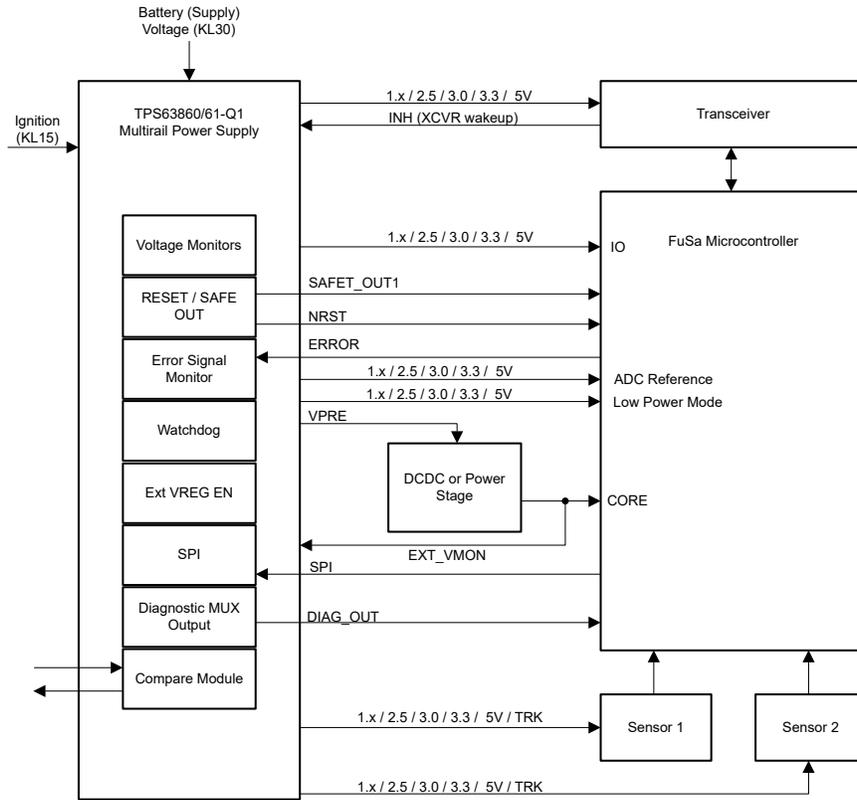


图 4-2. TPS65386x-Q1 PMIC 的典型应用图

## 5 隔离式栅极驱动器

TI 栅极驱动器具有高达 5.7kVRMS 的隔离能力，有助于防止电击，同时提供更高的工作电压以及更宽的爬电距离和间隙，从而提高系统可靠性。主要提供两个隔离式栅极驱动器系列：

- 保护栅极驱动器 [UCC2182xx-Q1](#)
- 可编程栅极驱动器 [UCC5881-Q1](#)

[UCC2182xx-Q1](#) 是一款隔离式栅极驱动器，具有主动保护和高级安全特性，例如多种 UVLO 选项（12V、15V 和 17V），并具有增强型隔离、去饱和 (DESAT) 和过流 (OC) 保护以及过热保护。与传统器件相比，灌电流和拉电流增加到 15A，而 20-DFP 封装可将占用空间减小 45%。该器件具有软关断引脚，可用于在关断期间微调电流，支持初级和次级主动短路 (ASC) 保护，并在启动时进行内置自检，以检查诊断功能中的比较器。

可编程栅极驱动器 [UCC5881-Q1](#) 因其可编程寄存器而得名，后者可设置为根据器件数据表修改不同参数，例如 UVLO 或 DESAT。这些寄存器可通过 SPI 来寻址。在 TI 的新一代可编程栅极驱动器中，用户还可以改变栅极驱动强度。在驱动功率级的栅极时，强驱动信号可降低开关损耗，因为强信号可缩短开关在压降条件下导通电流的时间。同时，强驱动信号会产生可能接近漏源电压限值的较大过冲，这可能会损坏开关，尤其是在充满电的电池组（余量最小）条件下。弱驱动信号会降低过冲并提高运行安全性，但由于压摆率降低，开关损耗就会升高。请参阅图 5-1。

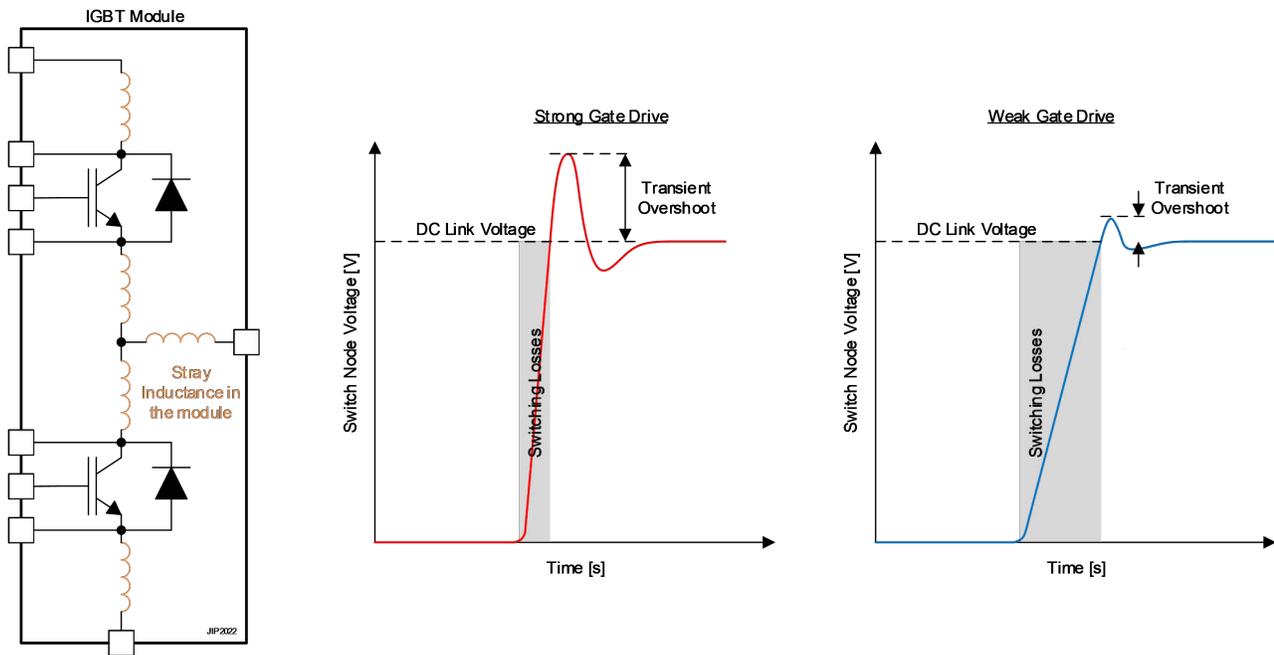


图 5-1. 弱栅极驱动与强栅极驱动以及对损耗和过冲的影响

可编程栅极驱动器 (例如 UCC5881-Q1) 可以利用弱驱动信号和强驱动信号来产生组合驱动。驱动电流与开关节点的电压上升时间成反比, 因此强驱动电流会增加开关节点电压的斜率。当电流达到直流链路 (目标) 电压时, 开关节点电压会在短时间内继续上升, 然后再回落至直流链路 (目标) 电压。这种额外上升称为过冲。驱动电流越强, 斜率就越高, 因此电压电平可以轻松达到漏源电压限值。

可编程栅极驱动的强度 (可以通过 SPI 或 GPIO 随时设置确切的运行模式) 会采用强驱动工作模式, 直到输出电流达到特定值, 此时驱动会切换至弱栅极驱动模式。这种组合驱动可降低过冲损坏开关的风险 (与仅强栅极驱动相比), 同时能够显著降低功率损耗 (与仅弱栅极驱动相比)。请参阅图 5-2。

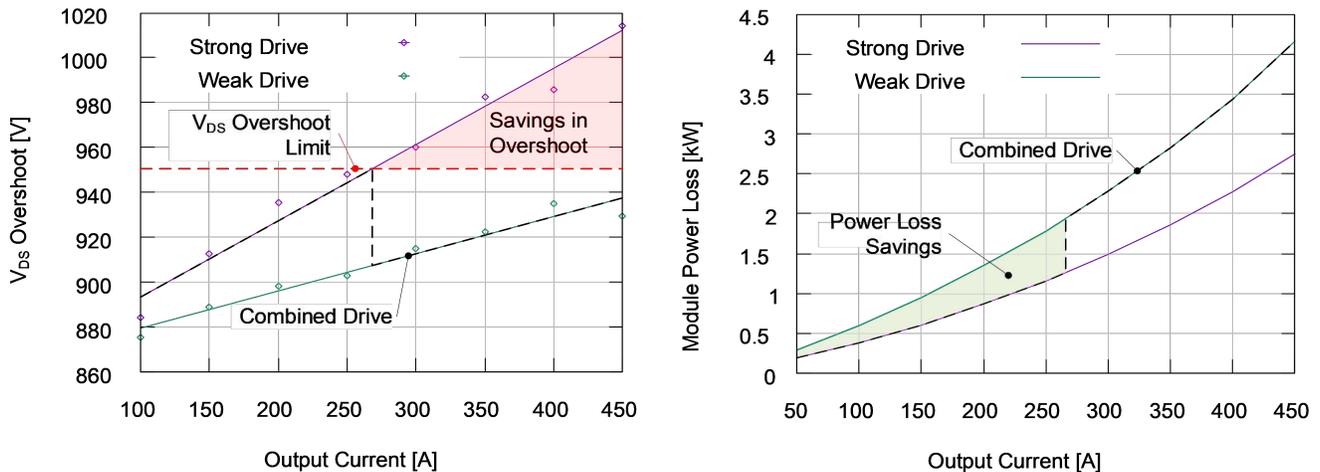


图 5-2. 可编程栅极驱动器的组合驱动输出

根据 CLTC 驱动循环, 使用可变强度驱动来降低功率损耗可带来:

- 逆变器效率提高 2% 以上
- 电池成本节省 140 美元
- 续航里程增加 15.5km
- 重量减轻 9kg

- 电池体积减少 7.5l ( 物理尺寸 )

图 5-3 显示了可编程栅极驱动器的强度特性在实际应用中的实现。当使用强栅极驱动 (20A) 使关断瞬态电压 (黄色曲线) 在  $I_{LOAD} = 300A$  条件下接近 1080V VDS 过冲限制时, GPIO 驱动的信号强度变化 (绿色曲线) 将开启弱驱动模式 (5A), 瞬变电压将在下一个开关周期降至 991V。

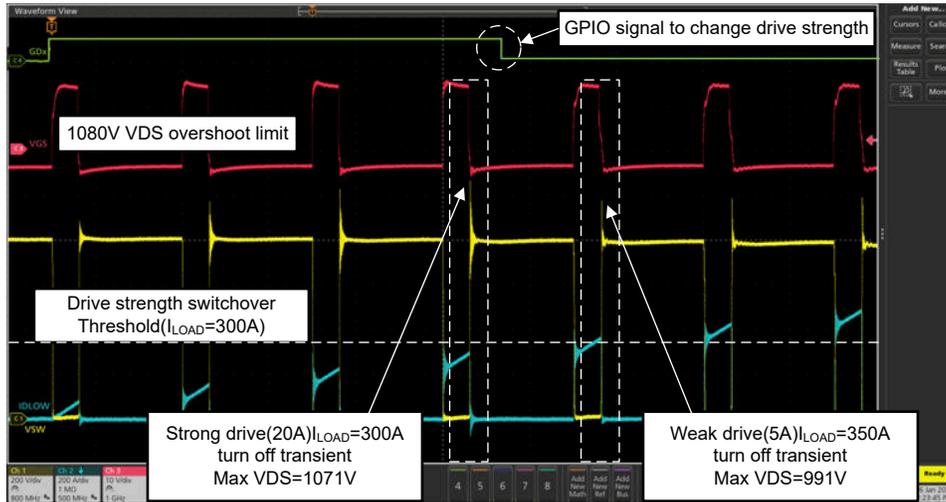


图 5-3. 可编程驱动强度应用示例

UCC5881-Q1 驱动器系列包括以下额外功能：

- 初级侧和次级侧 ASC 保护, 可提高系统设计灵活性
- 具有双路输出的分离式输出驱动器, 支持可调节栅极驱动 (  $\pm 15A$  和  $\pm 5A$  驱动电流 ), 集成 4A 有源米勒钳位功能, 也可选配外部驱动用于米勒钳位晶体管
- 互锁和击穿保护以及可编程最小脉冲抑制
- 内部和外部电源欠压和过压保护
- 集成的诊断功能支持高达 ASIL D 等级的 ISO26262 功能安全要求, 例如运行状况监控 ( 在系统的生命周期内执行阈值电压测量 ) 和故障预测 ( 向 MCU 提供电源开关数据以预测故障 )
- 基于分流电阻器的过流保护
- 过热 ( PTC、NTC 或二极管 ) 和 DESAT 检测
- 工作温度范围为  $-40^{\circ}C$  至  $+125^{\circ}C$

UCC5880-Q1 逆变器评估模块 (EVM) 既可通过焊接在电路板上的 100nF 电容器负载, 独立用于测试栅极驱动器, 也可基于 Wolfspeed® XM3 SiC MOSFET 用于直接驱动半桥功率模块, 以进行高功率测试。请参阅图 5-4。

该板上包含两个 UCC14241-Q1 隔离式偏置电源。该 EVM 支持灵活配置不同的 SPI 通信方法, 包括常规 SPI、菊花链和基于 TI 地址。该 EVM 可与 Sitara™ 和 C2000™ 实时微控制器控制卡连接, 用于高达 300kW 的三相逆变器测试。

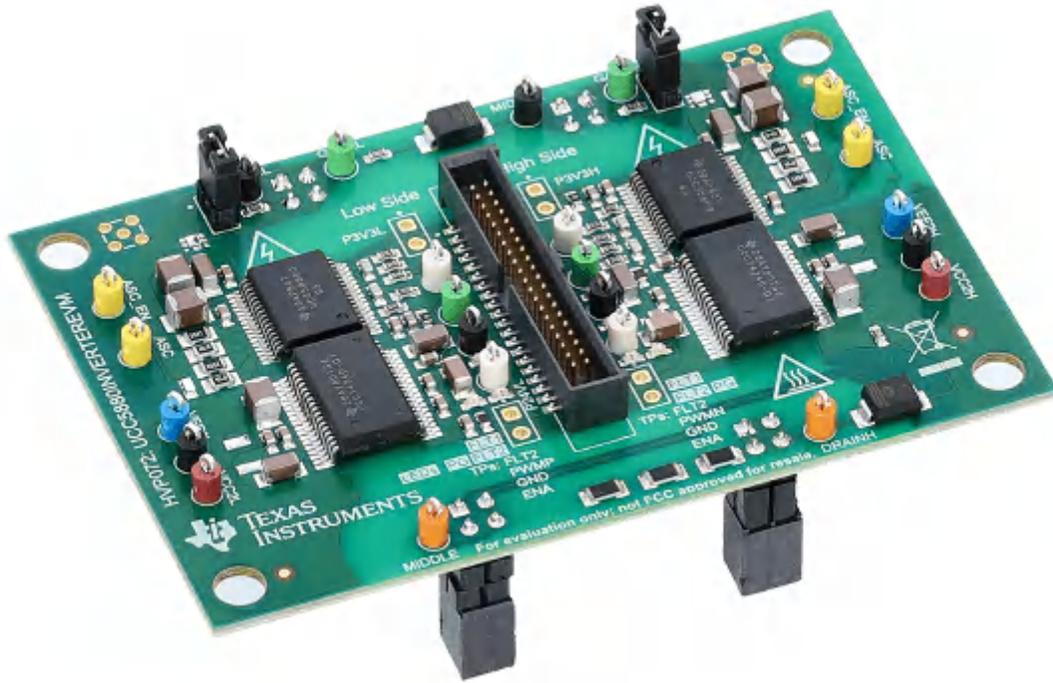


图 5-4. UCC5880-Q1 用于牵引逆变器中可变隔离式栅极驱动的评估模块

## 6 低压隔离式偏置电源

在牵引逆变器中，低压隔离式偏置电源连接到低压源（例如 12V 或 48V 电池），以在栅极驱动器的次级侧提供偏置电源。支持三种主要的低压隔离式偏置电源架构。请参阅图 6-1：

- 全分布式：每个栅极驱动器连接到单个偏置电源。该系统可实现最简单的 PCB 布线并具有最高的容错能力，但可能成本更高。
- 集中式：具有多个输出的单个转换器为所有栅极驱动器供电。每个栅极驱动器都可以接收单独的隔离式电源（需要 1:6 变压器）。不过，也可选择使用单个 1:4 变压器，为高侧单独供电，为低侧共同供电。PWM 驱动器模块仍是电源中控制变压器的核心 IC。该系统的成本可能较低，但需要更大的变压器，并且由于单点故障而使满足功能安全分类要求变得复杂。
- 半分布式：这是兼顾成本和故障冗余的权衡方案。低侧栅极驱动器共用一个偏置电源（来自 1:3 或 1:1 变压器），而每个高侧栅极驱动器获取单独的偏置电源。

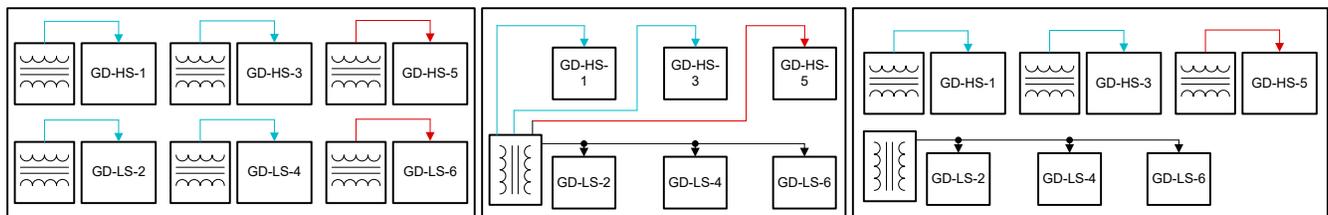


图 6-1. 低压偏置电源架构

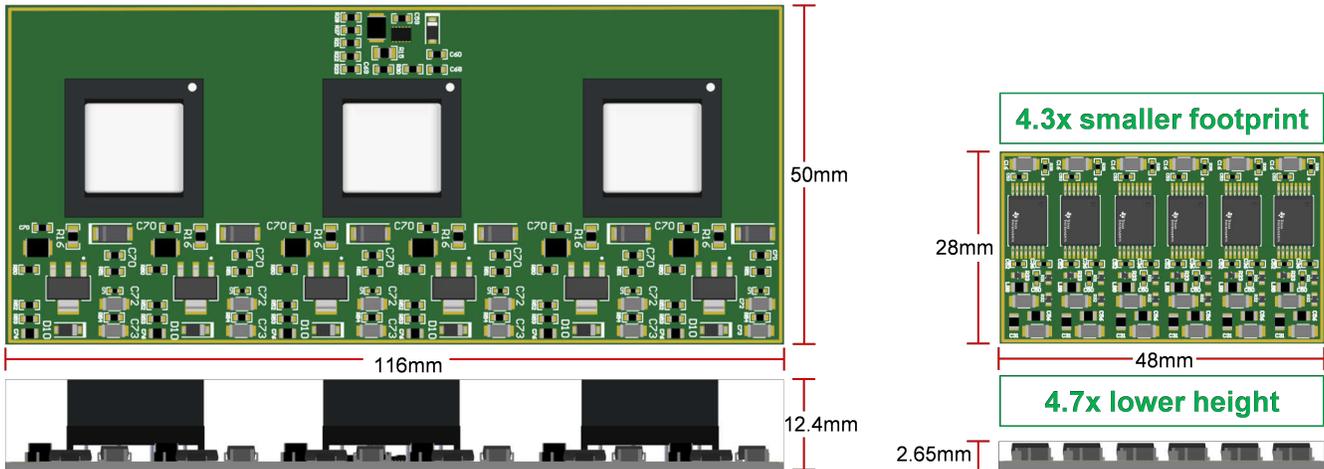
TI 为隔离式偏置电源的四种常见拓扑提供多种设计。其中包括初级侧稳压反激式转换器、开环推挽式转换器、开环电感器-电感器-电容器 (LLC) 谐振转换器和完全集成式模块。请参阅图 6-2。除了转换器外，还提供具有外部场效应晶体管 (FET) 和外部磁性元件的控制器选项。

	Primary side regulated flyback	Open-loop push-pull	Open-loop LLC	Fully integrated modules (full-bridge + transformer)
$V_{IN}$ min / max	4.5 V / 65 V*	3 V / 36 V	9 V / 34 V	5.5 V / 20 V
Max POUT	Up to 15 W*	Up to 7.5 W	Up to 9 W	Up to 3 W*
$V_{OUT}$ regulation	Regulated	Unregulated / $V_{IN}$ controlled	Unregulated	Regulated
SW frequency	20-350 kHz	0.1 – 2 MHz	0.1 – 1.2 MHz	11 – 15 MHz
Isolation	Depends on transformer used			Up to 5 kV, basic/reinforced
Basic circuit				
Example devices	<a href="#">LM(2)518x-Q1</a> , <a href="#">LM515x-Q1</a>	<a href="#">SN650x-Q1</a>	<a href="#">UCC25800-Q1</a>	<a href="#">UCC3414x-Q1</a> , <a href="#">UCC3513x-Q1</a>

\*depends on the variant

图 6-2. 隔离式偏置电源的常见拓扑

UCC34xxx-Q1 和 UCC35xxx-Q1 系列隔离式直流/直流转换器模块具有宽输入电压范围 ( 5.5V 至 28V )。集成变压器后, 可实现更小的 BOM 尺寸, 因此成本可能低于其他设计。对于完整的逆变器设计, 与半分布式反激式设计相比, UCC34xxx-Q1 器件将系统占用空间缩小了 77%, 将元件数量减少了 20%。请参阅图 6-3。UCC34xxx-Q1 系列器件的输出功率为 1.5W, 输出电压精度  $\leq 1.5\%$ ; 新一代 UCC35xxx-Q1 系列可提供 2W 功率。



Components reduction 113 → 90 Footprint shrink 5800 mm<sup>2</sup> → 1344mm<sup>2</sup>

图 6-3. 转换器模块 (全分布式) 与反激式 (半分布式) 系统设计的尺寸比较

**UCC25800-Q1** 器件是一款电感器-电感器-电容器 (LLC) 谐振转换器, 具有超低 EMI 辐射。该器件允许设计使用漏电感较高但寄生初级到次级电容较小的变压器, 并具有可调节过流保护、输入过压保护、过热保护和引脚故障保护等保护特性。

**SN6507-Q1** 器件是一款高频推挽式变压器驱动器, 具有集成的 MOSFET 和占空比控制, 可实现宽输入电压范围。该器件集成了一个控制器和两个异相切换的 0.5A NMOS 电源开关。该器件还包括可编程软启动、展频时钟和引脚可配置的压摆率控制。

LM2518x-Q1 系列器件是一款初级侧稳压 (PSR) 反激式转换器，具有集成电源开关并能够在 4.5V 至 42V 的宽输入电压范围内运行。从初级侧反激式电压采样隔离输出电压数据，无需使用光耦合器、电压基准或变压器的第三绕组进行输出电压稳压。通过采用边界导电模式 (BCM) 开关，可实现紧凑的磁设计以及优于  $\pm 1.5\%$  的负载和线路调节性能。

## 7 高压隔离式偏置电源

为提高系统级安全，牵引逆变器通常采用高压隔离式电源，该电源可转换高压 (HV) 电池的电源并连接到低压侧，从而创建冗余电源路径。因此，如果低压供电路径中出现器件故障，系统可由 HV 电池供电。ASC 需要此电源，其中必须为高侧或低侧功率级供电，以使系统进入安全状态。

该高压隔离式电源可能需要在输入电压低至 30V 时启动，并且还必须能够针对 800V 电池在高达 1kV 的电压下运行，以适应负载突降场景并考虑电池荷电状态 (SOC)。车辆发生碰撞后或牵引逆变器故障导致高压蓄电池分离时，可能会出现启动电压过低的情况。电机开始旋转并充当发电机，从而将非受控电压引入直流母线。为了控制电压以使电压不超过 50V (触摸安全)，辅助电源必须打开并为安全相关电路加电，这些电路可以对直流链路电容器进行放电 (有源放电) 或主动对电机进行短路。与低压隔离式偏置电源一样，这些器件可以是直流/直流控制器、转换器或集成模块。

TI 提供各种参考设计来满足此要求：

- [UCC28C56EVM-066](#) - 用于初级侧控制反激式稳压器的 40V 至 1kV 输入、15V<sub>out</sub>、40W PSR 反激式评估模块
- [TIDA-01505](#) - 支持可再生制动测试的汽车类 40V 至 1kV 输入反激式参考设计
- [PMP22288](#) - 适用于汽车逆变器电源的 15W 反激式参考设计
- [PMP10200](#) - 超宽输入电压范围 PSR 反激式转换器参考设计

在器件层面，德州仪器 (TI) 支持适用于高压隔离式偏置电源的多种拓扑。请参阅表 7-1。

表 7-1. 支持高压隔离式偏置电源拓扑的 TI 器件

器件	UCC28C5x-Q1	UCC28700-Q1	UCC28730-Q1	UCC28740-Q1	UCC28781-Q1
开关类型	硬开关式	谷底开关	谷底开关	谷底开关	零电压开关 (ZVS)
反馈稳压	初级、次级 (光耦合器)	初级	初级	次级 (光耦合器)	次级 (光耦合器)
典型功率级别	20W - 100W	2W - 50W	2W - 50W	2W - 50W	50W - 150W

## 8 直流链路有源放电

每个电动汽车牵引逆变器都需要一个直流链路有源放电作为安全关键型功能。在以下条件和要求下，需要使用放电电路释放直流链路电容器中的能量：

- 在紧急情况下或维修期间，系统中的电压必须在 2-5 秒内可安全触摸。紧急情况响应必须在没有 MCU 的情况下运行，并且在本地 (例如在牵引逆变器内部) 运行。
- 在车辆熄火时，所有系统仍保持运行，放电将在几分钟内完成。
- ASIL D 的系统级安全要求

TI 提供多种有源放电设计，可满足不同的系统级要求。通常，有源放电耗散方法可分为三类：电阻放电、通过功率级放电或通过电机绕组放电。

在电阻放电方法中，虽然采用泄放电阻器可以实现放电，但该电阻器始终会消耗电流，并且放电速度可能过慢。因此，可以使用开关电阻器。使用开关电阻器时，通断控制和 PWM 开关控制可通过以下方式实现：

- 使用 [TPSI3100-Q1](#) 器件实现功率晶体管通断控制。TPSI3100-Q1 增强型隔离式开关驱动器采用集成式 17V 栅极电源，能够驱动放电电源开关，而无需次级偏置电源，因为该器件通过由初级偏置电源供电，集成了次级偏置电源。当与外部电源开关相结合时，该器件可构成完整的隔离式固态继电器配置。内部双通道高速比较器可实现具有多种诊断功能的通信反向通道。
- 使用 [AFE539F1-Q1](#) 器件实现受控 PWM。AFE539F1-Q1 智能 AFE 器件具有用于 PWM 和自定义波形发生器的内置非易失性存储器。该器件增加了编程功能和逻辑，支持在没有 MCU 的情况下运行。图 8-1 展示了使用 AFE539F1-Q1 器件时的直流链路放电示波器屏幕截图。通道 1 (黄色) 表示 AFE539F1-Q1 输出，通道 2 (粉

色) 表示电压从 950V 下降到 0V。通道 3 (蓝色) 表示栅极驱动器的 EN 信号输入, 该输入会启动有源放电, 通道 4 (绿色) 表示 SiC FET 漏源电流。

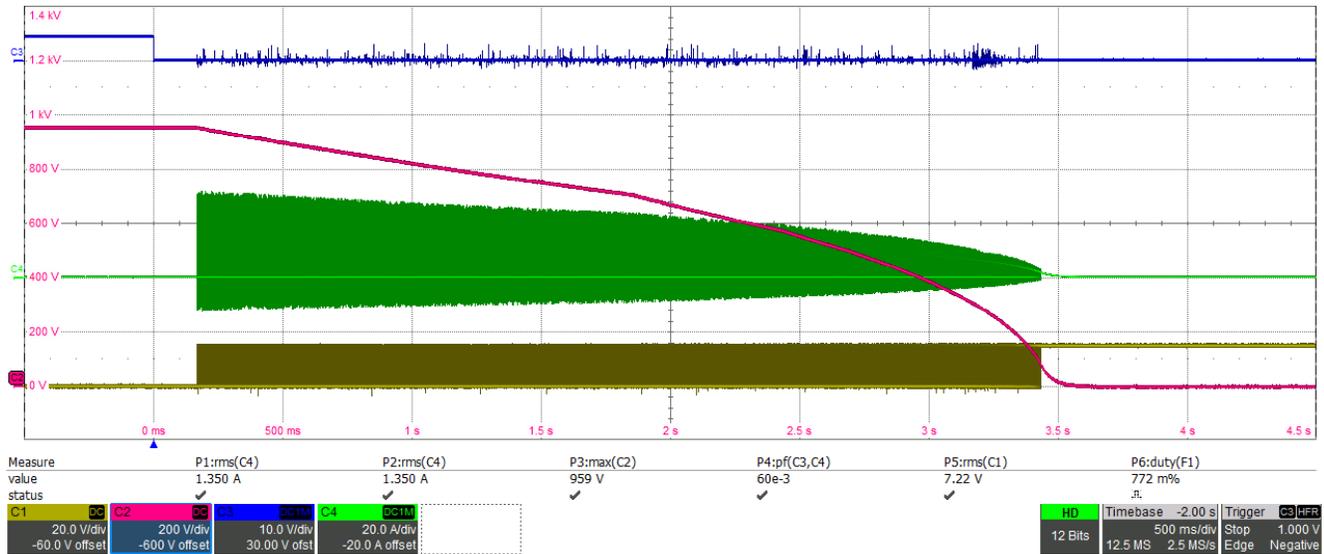


图 8-1. 基于智能 AFE 的直流链路有源放电 (左) 和测试波形 (右)

可通过电机绕组进行能量放电。可以将基于绕组的放电分成多个级。这些级包括快速放电级或总线电压调节级。生成较大的 d 轴负电流会快速降低直流链路能量, 而 q 轴电流必须为零。TI Sitara™ 或 C2000™ MCU 的快速环路控制和安全隔离式栅极驱动器具有串行外设接口 (SPI) 可编程性, 同时六个 ADC 通道可提供可靠且平稳的受控放电。尽管此设计可能具有成本效益, 但它需要一个功能齐全的系统, 涵盖从 MCU 到偏置电源和栅极驱动器的全部环节。

牵引逆变器设计的一个新兴趋势是通过功率级放电。在该方法中, 功率级的脉冲工作模式允许通过 MOSFET 的线性区域放电, 其中 MOSFET 充当电阻器。为此, 栅极驱动器需要非常精确的栅极控制和高频脉冲操作, 以避免对 MOSFET 造成过应力。或者, 栅极驱动器也可以采用脉冲短路工作模式, 对直流链路电压进行放电。

## 9 转子位置感应

电机转子位置传感器可测量转子轴的角度位置。电机位置传感器对于闭环控制满足安全要求至关重要。对于位置控制, 传感器可实现对已知位置和整个运动过程中位置的感应。一般而言, 可探索两种方案: 旋转变压器结构或可简化系统设计的电感式感应。

旋转变压器方法应用了旋转变压器的原理。请参阅图 9-1。该变压器具有一个初级绕组和两个成直角的次级绕组。使用来自 MCU 的通过励磁放大器 (例如 TI 的 ALM2403-Q1 器件) 产生的 PWM 信号, 对初级绕组施加励磁电压 ( $V_{EXC}$ ), 这会产生能生成磁通的电流。磁通通过次级绕组相对于转子旋转角度分布, 并感应产生  $V_{SIN}$  和  $V_{COS}$ 。反馈信号主要是单端信号, 但也可以从差分信号转换为单端输出。安全 MCU 会根据旋转变压器次级绕组上的电压比重新获取转子角度。

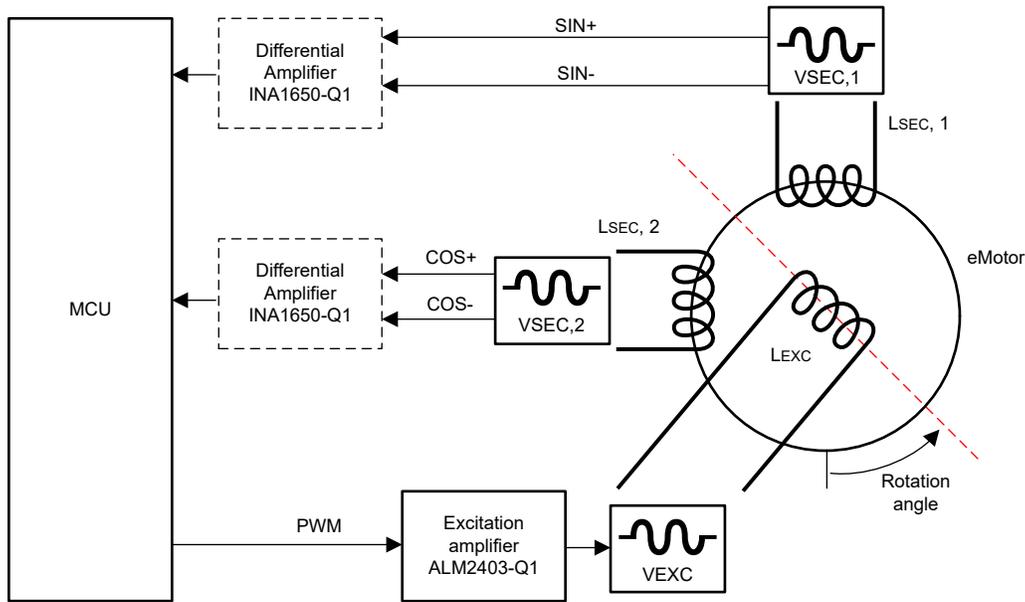


图 9-1. 旋转变压器结构具有励磁线圈  $L_{EXC}$  和次级线圈  $L_{SEC1/2}$ ，用于获取电机旋转角度

对于电感式位置感应，TI 的 [LCD5072-Q1](#) 电感式位置传感器前端 (参阅图 9-2) 与励磁线圈 (黑色) 和感应线圈 (彩色) 配对使用，以覆盖固定在转子上的导电目标。LDC5072-Q1 器件中集成了一个 LC 振荡器，可在 2.4MHz 至 5MHz 频率范围内向励磁线圈生成励磁电流。这消除了对外部励磁结构的需求，从而可进一步简化系统。目标 (由铝或铜制成) 和 PCB 线圈彼此平行放置，励磁电流在目标中激励产生涡流，这也会在感应线圈中产生感应正弦和余弦包络电压。感应电压的幅度由电机角度位置决定。然后，感应信号由 LDC5072-Q1 器件解调，并向 MCU 输出正弦和余弦信号以进行角度计算。

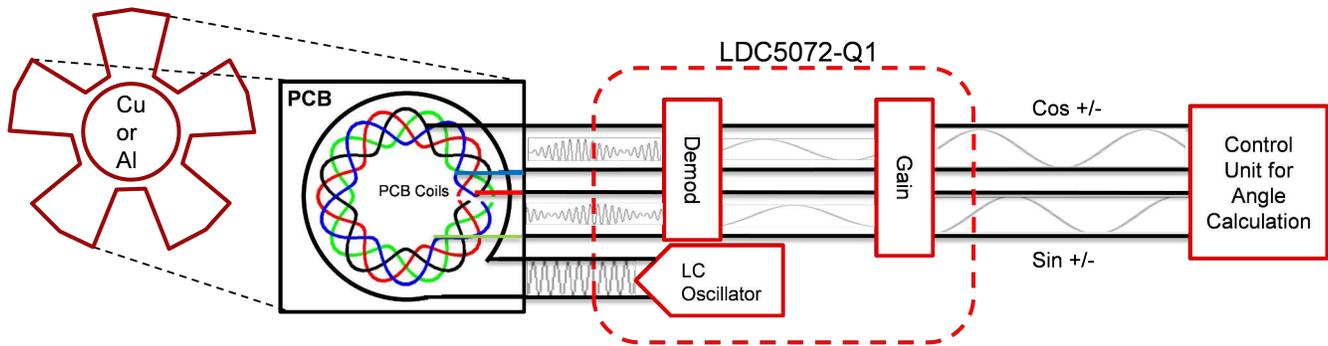


图 9-2. 使用 [LCD5072-Q1](#) 的电感式感应图

[LCD5072-Q1](#) 器件支持非常高的旋转速度，在高达 480,000rpm 的目标速度下，角度精度小于  $1^\circ$ 。该器件根据 ISO26262 设计，以满足功能安全要求。[TLC5072Q1EVM](#) 评估模块有助于快速轻松地评估传感器前端的运行情况和性能。

## 10 隔离式电压和电流检测

牵引逆变器系统使用隔离式传感器进行电压和电流测量，例如直流链路电压和电机相电流。TI 提供隔离式电压和电流测量设计，有助于在牵引逆变器设计中达到功能安全要求级别。这包括数字调制器 (数字输出) 和数字放大器 (模拟输出) 以及霍尔效应检测。数字输出隔离器可提供更出色的信号保真度，而模拟输出隔离器则可从硬件设计人员的角度简化系统设计。

## 10.1 隔离式电流检测

霍尔效应电流检测的工作原理是感应通过导线或母线排的电流所辐射出的磁场。这个磁场在传感器中感应产生一个霍尔电压，然后可将该电压用于计算通过导线的初始电流。这种方法不接触各导线，高电流也不会流经传感器，但该方法容易受到杂散磁场的影响。

为了改进测量，大多数霍尔效应传感器都采用所谓的 C 型磁芯结构。这些结构为环形铁磁体，用于引导传感器上的磁场。这种方法较为可靠且不易受位移误差的影响，但 C 型磁芯需要占用大量空间，可能会增加整个系统的 BOM 成本和重量。因此，设计人员也在评估其他电流检测方法，但所有这些方法都需向系统增加屏蔽层或改装母线排。

TI 的 [TMCS2100-Q1](#) 霍尔效应传感器完全避免了增加 C 型磁芯或进行任何其他重大改装，从而提供多传感器无芯设计。[TMCS2100-Q1](#) 器件是一款可编程、精密、无芯霍尔效应电流传感器，凭借可配置的过流检测，可检测 1A 至 >1kA+ 峰值的超高电流。该器件支持任何母线排机械配置，完全无需定制母线排设计，如开槽和屏蔽层。请参阅 [图 10-1](#)。

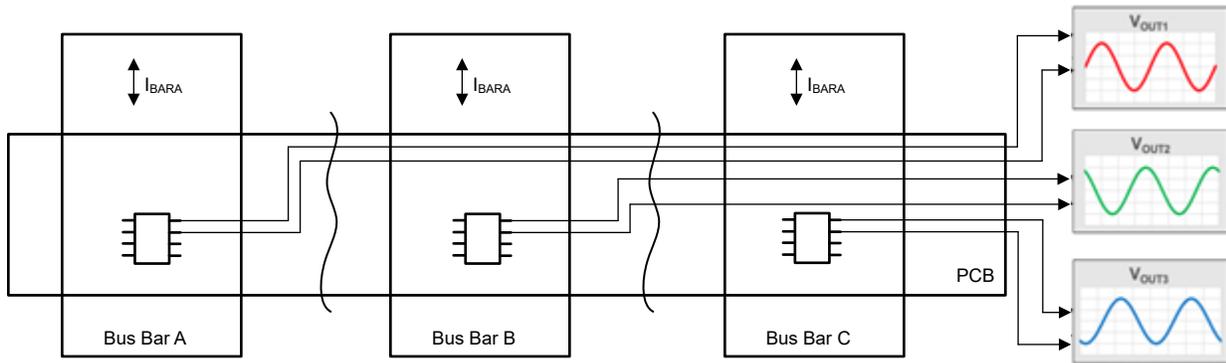


图 10-1. TMCS2100-Q1 物理配置

母线排间距可低至 5mm，同时减轻串扰影响。1mm 时的位移误差保持在 3.7%，同时在不同的寿命参数下实现出色的精度。通过比较牵引逆变器中基于霍尔效应的主要电流检测设计，凸显了多传感器无芯设计的优势。

表 10-1. 牵引逆变器中的不同电流检测方法

关键系统需求	C 型磁芯	U 型屏蔽层	差分无芯	TMCS2100-Q1 多传感器无芯	
制造难度	购买或自制	尺寸或母线排改装	母线排改装	仅限 IC	
相间串扰抑制	采用磁芯设计时 <1%	采用屏蔽层时 <1%	采用间距为 2.6mm 的传感器时 >1.8%	客户校准后 <1%	
杂散磁场抑制	磁芯设计	屏蔽层	差分	差分	
位移误差	不适用	1mm → 约 3.5%	1mm → 42%	1mm → 3.7%	
相位延迟 (1kHz 时)	<4°	<3°	>4°	<2°	
每相 IC 功率	25+mA	10mA-15mA	16-25mA	50mA	
精度	过热	3% + 磁芯	2%	4%	1%
	线性度	3%	1%	1%	0.1%
	整个频率范围	3% + 磁芯	<5%	>5%	1%
	整个寿命周期	>5%	>7.5%	>3%	1%
高度 (母线排以上)	15mm	> 14mm	<2mm	> 3mm	
系统复杂度	IC + 磁芯 + 外壳 + 夹具	IC + 屏蔽层 + 母线排改装 + 夹具	IC + 母线排改装 + 夹具	IC + 夹具	

TI 还提供常规的霍尔效应电流传感器，例如 [TMCS1123-Q1](#) 或 [TMCS1126-Q1](#) 器件。这些传感器在 5kV 增强型隔离电压和 1100V 增强型工作电压条件下具有环境磁场抑制和可配置过流保护特性。由于额定电流限制，TI 建议在 EESM 电机系统的励磁电路中使用 [TMCS1123-Q1](#) 和 [TMCS1126-Q1](#) 器件。

尽管在三相输出的所有相位均进行电流检测是常规做法，但另一种方案是仅检测三个相位中的两个相位，并根据三个电流之和为零来重新计算第三个相位的值。但是，由于牵引逆变器是电动汽车动力总成的一部分，且这些动力总成对确保安全至关重要，因此该方案会增加设计风险。

## 10.2 隔离电压检测

与隔离式栅极驱动器类似，隔离式电压传感器在高压 (HV) 和低压 (LV) 侧均需要电源，从而跨过隔离栅将信号从直流链路 (HV 侧) 传输到 MCU (LV 侧)。这可以通过使用变压器和驱动器组合 (例如 [UCC28700-Q1](#) 器件) 来实现，以便为两侧提供电源电压，但 TI 还提供具有集成电源的隔离式电压传感器。

其中，[AMC33xx-Q1](#) 系列器件 (例如 [AMC3330-Q1](#) 器件) 使用内部隔离式直流/直流转换器，可显著降低系统的复杂度，从而实现与器件低侧的单电源隔离。在输入端，可施加  $\pm 1\text{V}$  的电压用于具有高输入阻抗的电压测量，例如通过电阻分压器网络来感应高压信号。该器件具有模拟输出。

为了检测 HV 系统中的电压，必须在电压检测器件的输入端放置一个电阻分压器，以将输入端的电压降低到电压检测 IC 的可接受范围内。这个电阻分压器网络会增加系统的空间和潜在成本，并且必须进行微调以实现所需的输出电压。TI 提供一个具有  $12.5\text{M}\Omega$  固定输入电阻和高达  $1400\text{VDC}$  输入电压的匹配电阻分压器，即 [RES60A-Q1](#) 器件，实现  $\pm 0.1\%$  标称值范围内的高比率匹配精度。

[AMC038x-Q1](#) 系列器件 (例如 [AMC038D-Q1](#) 器件) 通过提供集成式电阻分压器来解决此问题。请参阅图 10-2。输入端的电阻分压器将施加到 HVIN 引脚的电压降低至  $\pm 1\text{V}$  线性满标量程电平。该信号也在 SNSP 引脚上提供。器件输出是与输入信号成正比的差分信号。

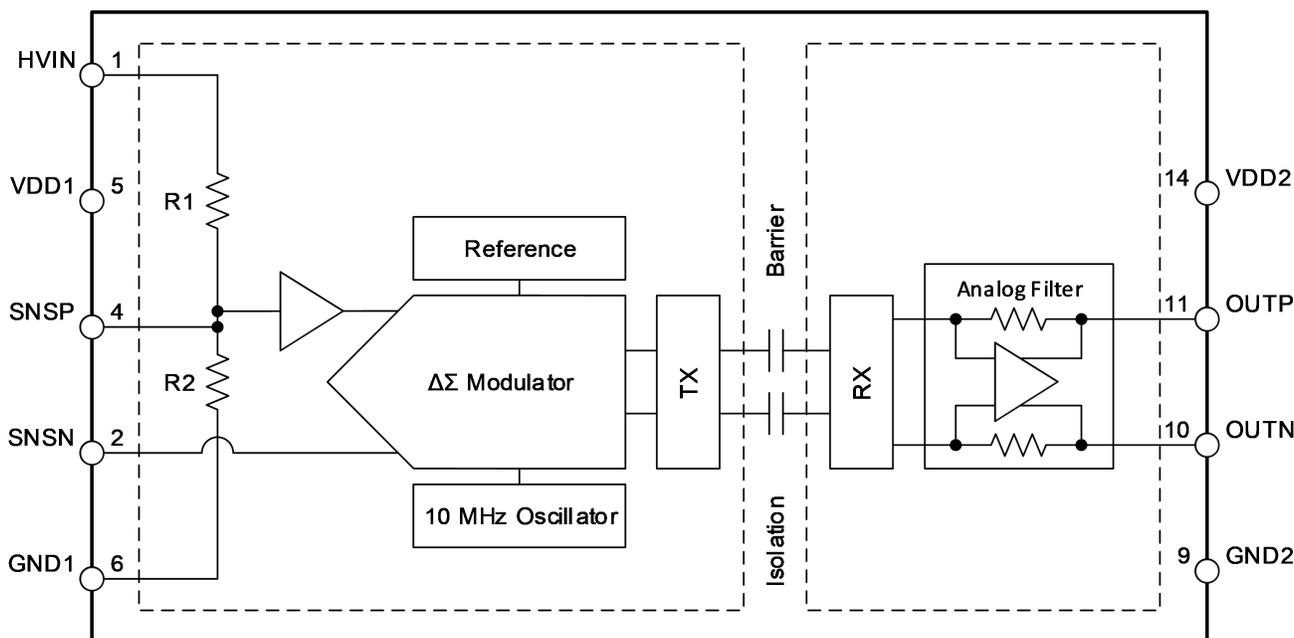


图 10-2. AMC038D-Q1 方框图

集成的电阻分压器可显著节省电路板空间。请参阅图 10-3。同时，由于增益误差在出厂时已校准，且内部电阻分压器的温漂非常低，因此精度也得以提高。通常，即使没有校准，也可以实现优于 1% 的测量精度。集成的电阻分压器具有非常低的使用寿命漂移和三种不同的输出选项： $\Delta$ - $\Sigma$  调制器、单端输出或差分输出模式。

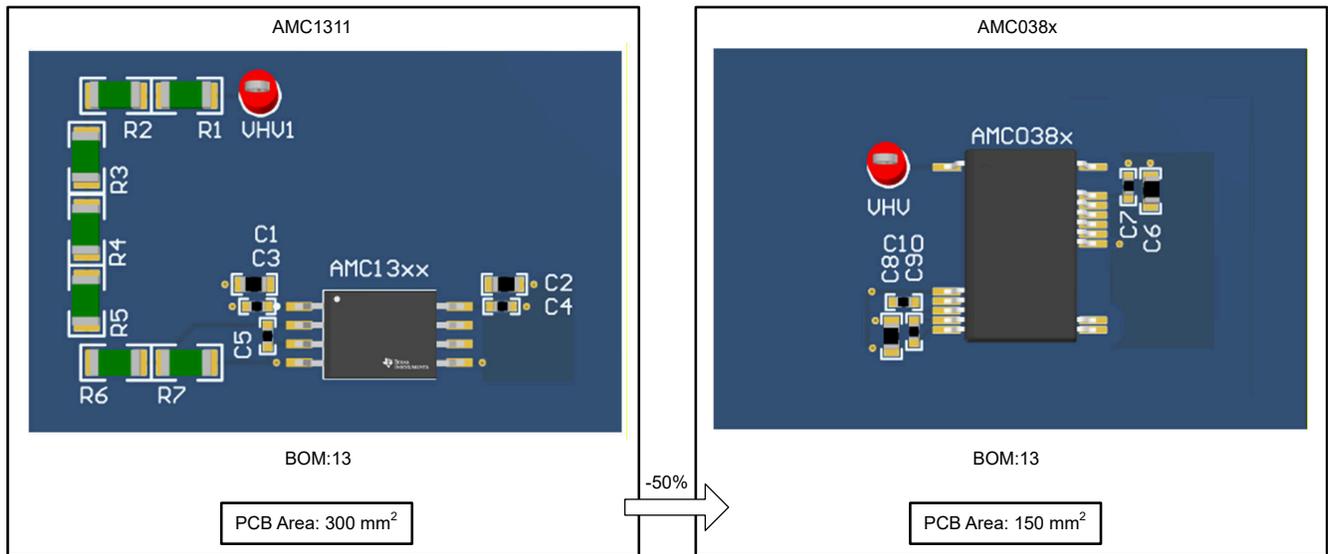


图 10-3. 将电阻分压器集成到 TI AMC038x-Q1 系列可节省系统空间

## 11 系统工程和参考设计

TI 的系统工程团队致力于使用 TI 品类齐全的产品系列开发经过优化的系统设计，从而帮助客户加快系统设计进程。以下部分详细介绍了之前开发的一些参考设计：

- [TIDM-02014 SiC 牵引逆变器参考设计](#)。请参阅图 11-1：

TIDM-02014 是一款由德州仪器 (TI) 和 Wolfspeed® 共同开发的基于 SiC 的 800V、300kW 牵引逆变器系统参考设计。该设计为原始设备制造商和设计师创建高性能、高效率的牵引逆变器系统和加快产品上市速度奠定了基础。该设计展示了 TI 和 Wolfspeed® 的牵引逆变器系统技术如何通过高性能隔离式栅极驱动器和驱动电源模块的实时可变强度栅极驱动器来降低可用电压的过冲，进而提高系统效率。隔离式栅极驱动器与 TI 的隔离式偏置电源设计相结合，显著减小了 PCB 尺寸，使 PCB 面积缩小为不到原来的二分之一，高度小于 4mm，并消除了 30 多个分立元件，从而提高了系统功率密度。TI 的高控制性能 MCU 具有紧密集成的实时外设，可在速度超过 20,000rpm 时，实现有效的牵引电机控制。该设计的快速电流环路实现有助于尽可能地减少电机扭矩纹波，并提供平滑的速度-扭矩曲线。系统的机械和热设计由 Wolfspeed® 提供。

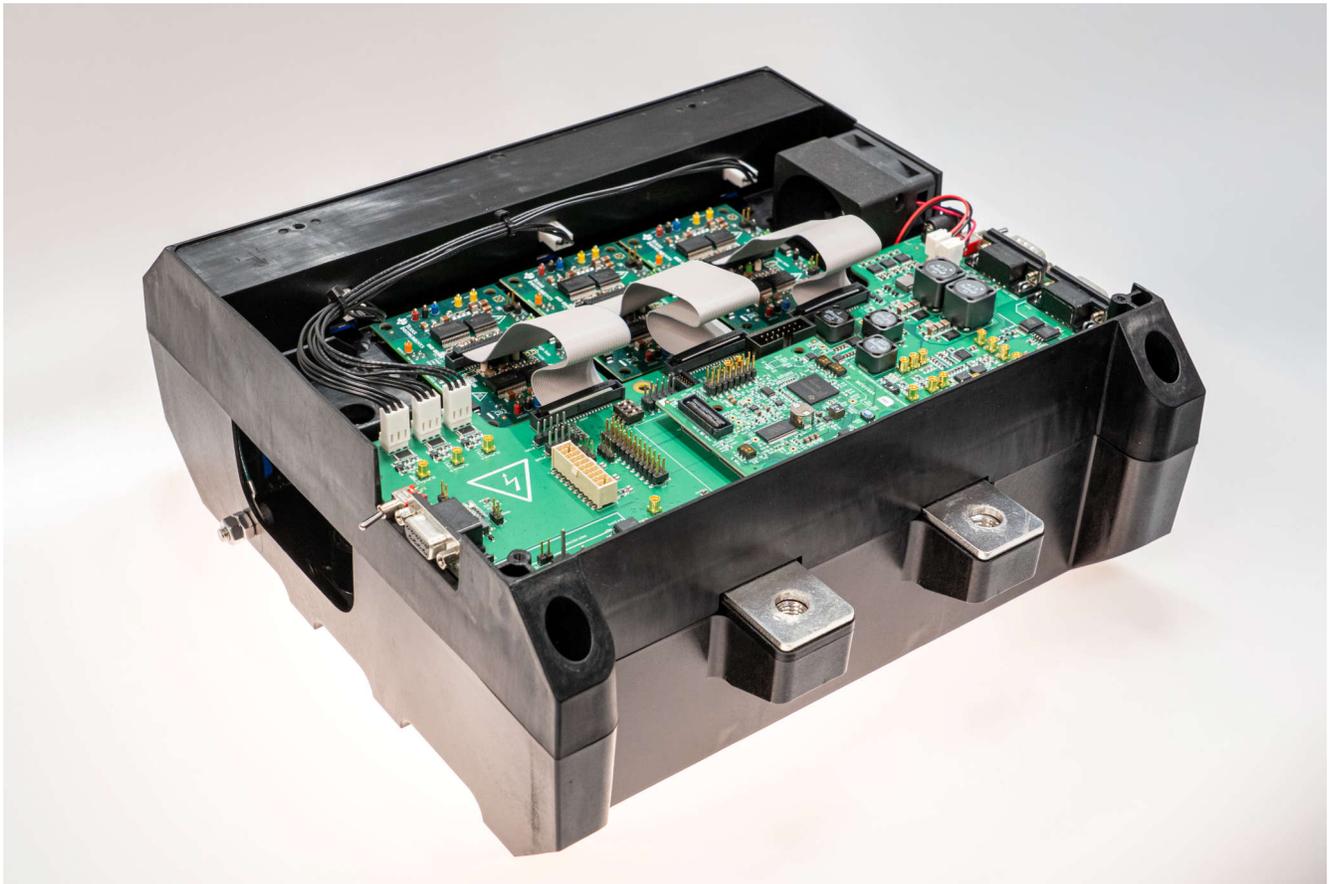


图 11-1. TIDM-02014 牵引逆变器参考设计

- [UCC5880INVERTEREVM](#) 栅极驱动器评估模块：

UCC5880INVERTEREVM 板既可通过焊接在电路板上的 100nF 电容器负载，独立用于测试 UCC5880-Q1 驱动器，也可基于 Wolfspeed® XM3 SiC MOSFET 用于直接驱动半桥功率模块，以进行高功率测试。该板上包含两个 UCC14240-Q1 隔离式偏置电源。该 EVM 支持灵活配置不同的 SPI 通信方法，包括常规 SPI、菊花链和基于 TI 地址。该 EVM 可与 Sitara™ 和 C2000™ 实时微控制器控制卡连接，用于高达 300kW 的三相逆变器测试。

- [TIDA-01527](#) 分立式旋转变压器参考设计：

TIDA-01527 是带有 C2000™ 微控制器且精度为  $\pm 0.1^\circ$  的分立式旋转变压器前端参考设计。此参考设计是适用于旋转变压器传感器的励磁放大器和模拟前端。该设计仅在 1 平方英寸的印刷电路板 (PCB) 上实施分立式组件和标准运算放大器。提供的算法和代码示例使用了 C2000™ 微控制器 (MCU) LaunchPad™ 开发套件，通过 TMS320F28069M MCU 来进行信号处理和角度计算。该参考设计使用了非凡的散射信号处理方法。这种方法将系统精度提高了 250%，同时还可将硬件成本和复杂度保持在合理水平。

## 12 结语

汽车牵引逆变器技术正朝着 800V、高功率密度 (大于 50kW/L)、高效率 (> 99%) 和高安全性 (ASIL D) 要求的方向发展。在所有相关领域，TI 的技术通过新器件和重大改进带来了技术优势。

在 C2000™ MCU 系列中，TI 的新一代 C29 内核可实现超越其他同类产品 (特别是 F29H58x 系列器件) 的超快相对性能执行。新一代 [TPS653860-Q1](#) 和 [TPS653861-Q1](#) PMIC 具备所有必要的控制机制，可满足完整的系统安全要求，同时通过与其他同类产品的 MCU 协同工作来简化设计工作。

新一代 [UCC5881-Q1](#) 栅极驱动器可提高电机控制效率，其栅极驱动强度可调，系统效率提高 2% 以上，同时还能节省空间并可能降低成本。全新的 [UCC34141-Q1](#) 低压隔离式偏置模块配有集成式变压器，可将系统尺寸大幅缩小高达 77%。

**TMCS2100-Q1** 器件采用一种全新的电流检测方法，无需使用笨重而昂贵的 C 型磁芯结构，从而提升了牵引逆变器的设计水平。该器件在隔离式电压检测中集成了电阻分压器或直流/直流电源，并显著缩小了 BOM 尺寸。TI 还支持使用 **LDC5072-Q1 AFE** 器件进行电感式电机位置感应，以此作为旋转变压器的替代配置（无需励磁机），从而从设计人员的角度简化感应配置。

### 13 参考资料

所有者	参考	文档类型	信息概览
德州仪器 (TI)	<a href="#">显示 C2000™ 控制 MCU 优化信号链的实时基准测试</a>	应用手册	介绍了 C2000™ 为实时信号链带来的优势，包括软件基准测试。
德州仪器 (TI)	<a href="#">用于 HEV 和 EV 牵引逆变器的隔离式偏置电源架构</a>	技术白皮书	介绍了牵引逆变器上的隔离式偏置电源。
德州仪器 (TI)	<a href="#">什么是智能 DAC ?</a>	技术文章	介绍了智能 AFE 器件。
德州仪器 (TI)	<a href="#">利用经济实惠的可靠隔离技术应对高电压设计挑战</a>	白皮书	概述了电隔离、高压系统的常见隔离方法以及隔离集成电路 (IC) 如何帮助设计人员。

## 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、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