

Ivana Santrac, Xiaoqiang Sun, Han Zhang

**摘要**

牵引逆变器是每辆电动汽车的关键器件之一。800V 电池系统和高开关频率 SiC 器件的发展趋势有助于显著提高逆变器效率。为了构建高效的系统，硬件和软件都需要具备高性能：从先进技术的 IC、布局、精确的反馈信号传感器，到用于控制开关的控制算法和快速控制环路，都是如此。提高逆变器效率意味着降低损耗，但主要问题之一是提高效率对电动汽车有何影响。在本文中，我们将介绍系统要求，随后展示 300kW、800V 牵引逆变器 (TIDM-02014) 的大功率测试结果，并说明受逆变器效率影响的四个关键方面。

**内容**

1 引言.....	1
2 牵引逆变器系统要求.....	2
2.1 栅极驱动器.....	2
2.2 微控制器.....	3
3 大功率测试.....	4
3.1 测试结果.....	5
4 新一代微控制器.....	7
5 结语.....	7
6 术语.....	8
7 资源.....	8

**1 引言**

TIDM-02014 是一款由德州仪器 (TI) 与 Wolfspeed 合作开发的 300kW、800V 牵引逆变器参考设计。德州仪器 (TI) 开发的栅极驱动器、控制板和控制卡与 Wolfspeed 的 XM3 电源模块相结合，共同打造高性能牵引逆变器系统。此逆变器可以通过 AM263P 和 TMS320F280039C 这两款不同的 MCU 进行控制。可从 [TI.com](https://www.ti.com) 获取设计文件、技术文档和软件包。TIDM-02014 参考设计如图 1-1 所示。



图 1-1. TIDM-02014

## 2 牵引逆变器系统要求

如今，牵引逆变器中的功率级别超过 200kW。提高功率密度的要求与提高电机转速的要求巧妙结合。电机转速最高可达 20000rpm。由于效率对续航里程有直接影响，因此汽车公司正在执行一些驾驶循环（CLTC、WLTP），进行相关评估。本文档介绍了 CLTC 期间的效率以及有助于实现效率目标的重要器件。

### 2.1 栅极驱动器

混合动力汽车/电动汽车上早期使用的栅极驱动器要简单得多。现在，系统安全要求已变得更加复杂，并实现了额外的功能来提高效率。尽管这些功能可采用分立式实现方案，但将它们整合到封装内可节省大量布板空间并降低系统成本。主动短路 (ASC)、DESAT、软关断、米勒钳位和动态可编程驱动强度只是 UCC5880-Q1 隔离式栅极驱动器中实现的功能的其中一部分。

可调驱动强度对效率的提升有很大的影响。若能采用更大电流驱动电源开关，则可以更大限度减少通断时间，从而降低开关损耗。尽管这种强大的驱动能力可提高逆变器效率，但不能一直使用。快速开关可在轻负载条件下和电池电压较低时带来优势，而慢速开关主要用于重负载。每个电源模块都有特定的最大电压额定值（例如，EAB450M12XM3 的最大电压额定值为 1200V）。由于存在杂散电感，更强的开关会导致更高的电压过冲，因此接近模块的电压限制。如果栅极驱动器继续以这种方式开关，则会给电源模块带来应力，从而缩短寿命。具有可调栅极驱动强度的另一个好处是 EMI 改进。更改  $dv/dt$  可改善第二个转角频率之后的 EMI。图 2-1 和图 2-2 分别展示了在 800V 直流链路电压、7000rpm 和 150Nm 条件下针对弱驱动和强驱动情况获得的大功率测试结果。这些波形显示了以两种不同的栅极强度进行驱动时  $V_{gs}$  下降沿和上升沿以及  $V_{ds}$  过冲的差异。通道描述如下：

- M2 ( U(A) 相 ) : 相电流，200A/div
- Ch2 ( $V_{gs}$ ) : 栅源电压，10V/div
- Ch4 ( $V_{ds}$ ) : 漏源电压，400V/div

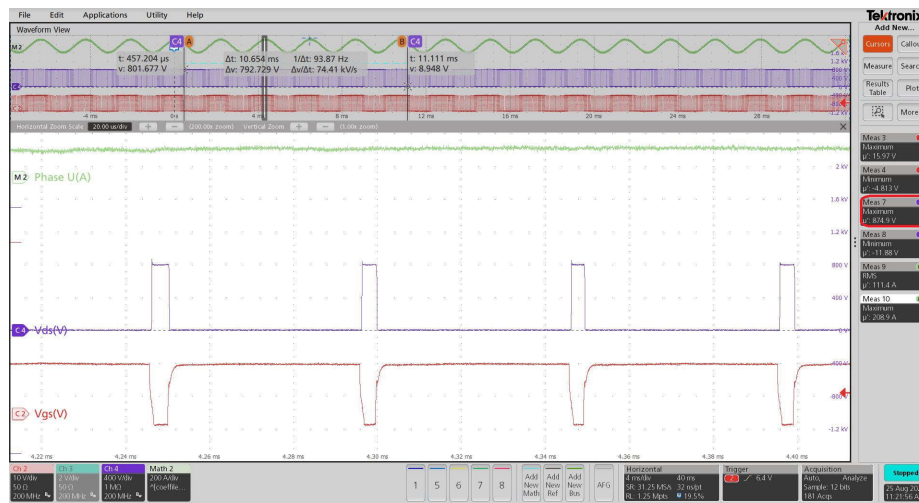


图 2-1. 800V、7000rpm、150Nm 和弱驱动时的开关波形

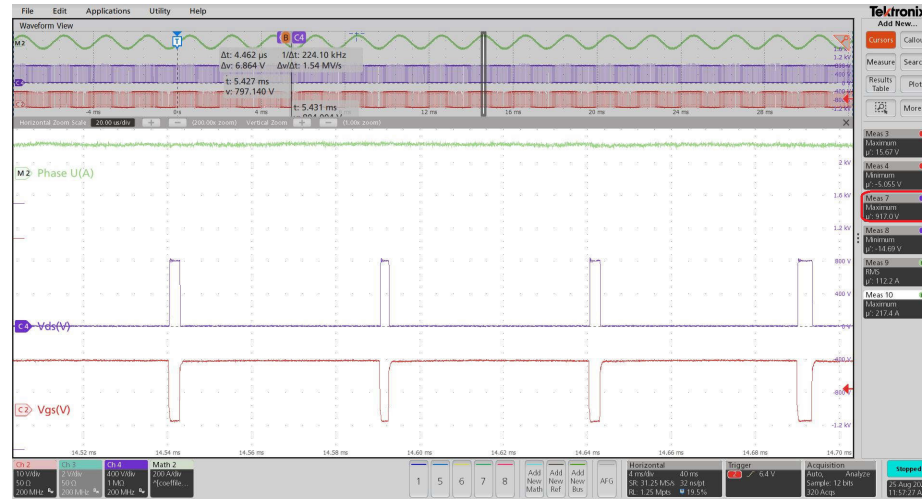


图 2-2. 800V、7000rpm、150Nm 和强驱动时的开关波形

从示波器上可以看出，弱驱动和这一特定工作点的最大电压过冲为 75V，而强驱动为 117V。

## 2.2 微控制器

要实现高效的牵引逆变器系统，必须进行硬件和软件两方面的优化。除了栅极驱动器，其中一个关键元件是 MCU。除了具有精确的位置、电流和电压检测功能之外，快速控制环路对扭矩信号也有很大的影响。扭矩纹波可能会导致速度振荡、噪声和振动。

此参考设计中使用 20kHz PWM 开关频率来控制 XM3 SiC 电源模块。为了实现更高的控制性能，每 25us 便会调用一次 FOC 和 SVPWM 算法，这意味着 PWM 占空比以 40kHz 的频率更新。由于 TI MCU (例如 F280039C 和 AM263P) 有一个可加速三角函数计算的三角函数加速器 (TMU)，因此中央处理单元 (CPU) 负载可以保持在较低的百分比。

TI MCU 支持软件旋转变压器数字转换 (RDC)。为了提高 CPU 负载性能，F280039C 可以使用控制律加速器 (CLA) 来执行 RDC 算法。CLA 是独立、完全可编程的 32 位浮点数学处理器，为 C28x 系列实现了并发控制环路执行功能。

在电机控制软件中，为了在最高效率点控制电机，会使用一个查找表来实现 MTPA (每安培最大扭矩) 和 MTPV (每电压最大扭矩)。最高效的工作点存储在常量数据中。软件根据扭矩、电气速度和直流总线电压获取适当的直轴 (d) 和交轴 (q) 定子电流命令。MTPA 和 MTPV 如图 2-3 所示。

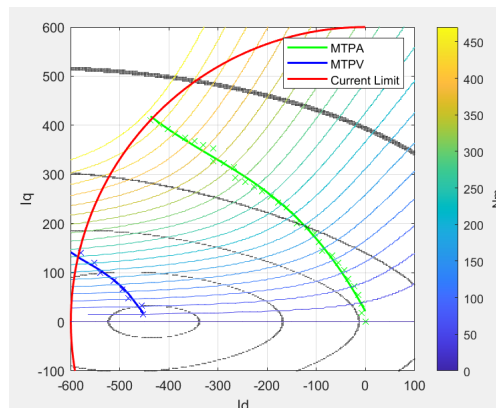


图 2-3. MTPA 和 MTPV 曲线

### 3 大功率测试

在 Wolfspeed 实验室使用 AVL 的电动机仿真器 (E-ME) 执行了大功率测试。电动机仿真器允许根据用户指定的数学模型在不同的电机类型之间进行选择。该数学模型可以是线性的，也可以是非线性的。由于 E-ME 可以模拟真实电机的行为，因此 E-ME 还包含用于模拟位置反馈的仿真器。此大功率测试中使用了非线性 PMSM 电机参数和旋转变压器仿真器。TI 开发了在扭矩模式下工作的闭环电机控制算法。扭矩命令由 PC 发送，而速度命令由 TCP 客户端 (AVL GUI) 直接提供给 E-ME。图 3-1 直观展示了这一控制系统。

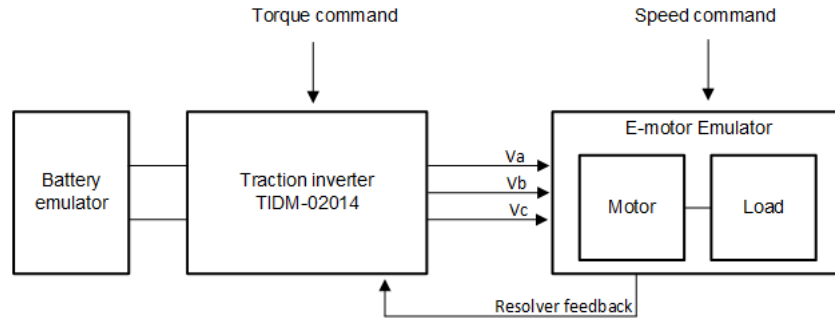


图 3-1. 使用电动机仿真器时的控制命令

在图 3-2 中，E-ME 机柜显示为 AVL 设置的一部分，其中实际放置和连接了逆变器。Yokogawa WT5000 功率分析仪和 Tektronix 5 系列示波器用于监测信号并收集测量数据。



图 3-2. Wolfspeed 实验室中的逆变器测试设置

### 3.1 测试结果

大功率测试是在 800V 直流链路电压条件下针对多个扭矩和速度命令进行的。此数据显示在图 3-3 和图 3-4 的逆变器效率图中。图 3-3 展示了弱栅极驱动强度 (5A) 的效率，而图 3-4 展示了强栅极驱动强度 (20A) 的效率。X 轴以 rpm 为单位显示机械速度，范围为 0rpm 至 9000rpm。Y 轴以 Nm 为单位显示电气扭矩，范围为 0Nm 至 150Nm。每条曲线都显示了特定的效率。如果取同样的点，例如 5500rpm 和 110Nm，弱驱动条件下的逆变器效率为 98.41%，而强驱动条件下为 98.94%。

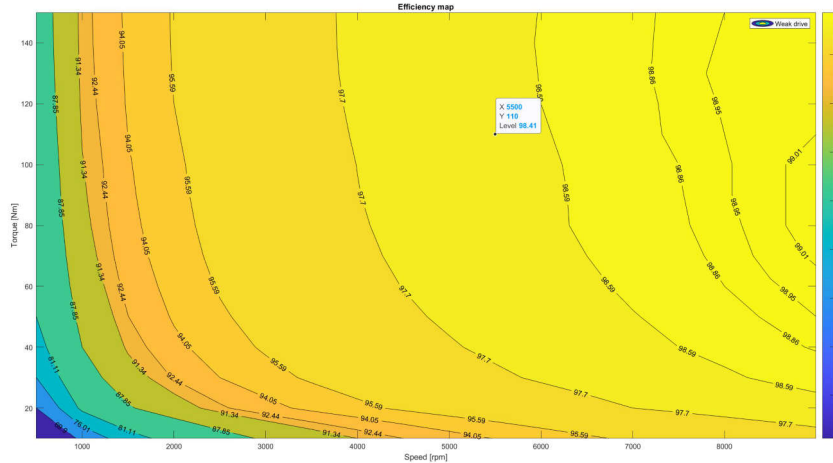


图 3-3. 弱驱动 (5A) 条件下的效率图

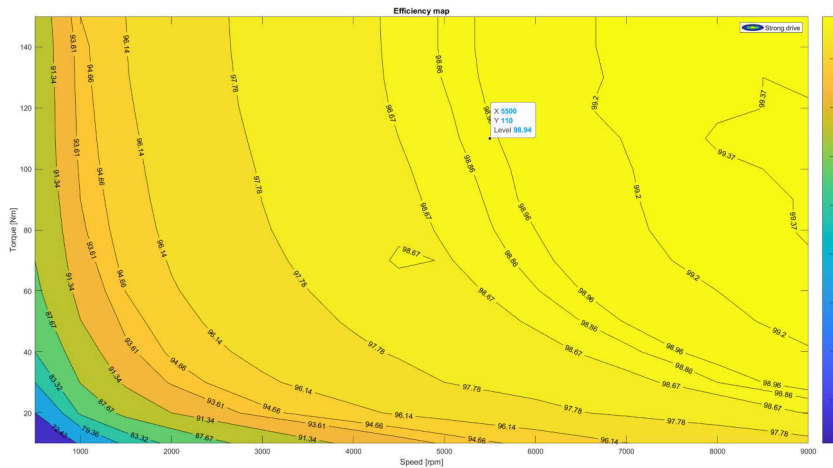


图 3-4. 强驱动 (20A) 条件下的效率图

上面显示的效率图涵盖了中国轻型汽车测试循环 - 乘用车 (CLTC-P) 驾驶循环所要求的扭矩/速度命令。从效率图来看，对于相同的速度命令和不同的扭矩命令，更高扭矩的逆变器可实现更高的效率。具体车辆的 CLTC-P 所需的最高扭矩值为 140Nm，从而产生最大 165Arms 的相电流。此驾驶循环用于展示由于动态更改栅极驱动强度而带来的效率提升。CLTC 期间可调栅极驱动强度的结果会被收集并与仅在弱驱动条件下运行的同一循环加以比较。根据 CLTC-P 速度数据 [km/h]，即可计算特定车辆类型所需的速度和扭矩命令。图 3-5 展示了一个 CLTC 驾驶循环内随时间变化的速度 (以 RPM 为单位)。

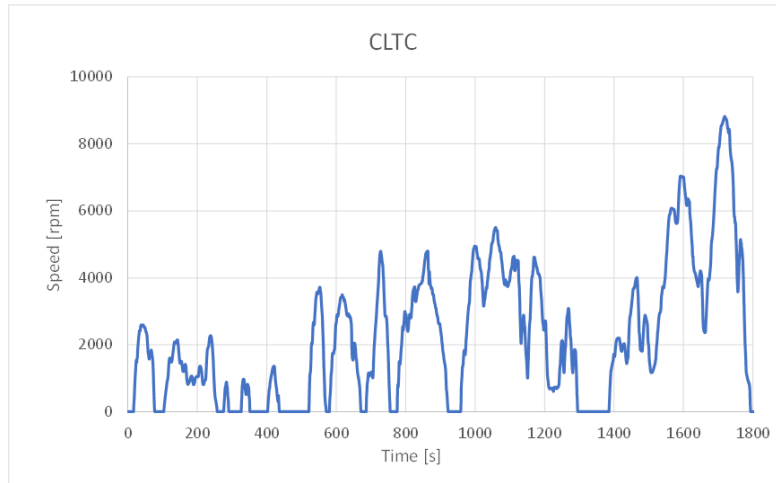


图 3-5. CLTC 驾驶循环

驾驶循环所需的扭矩和速度命令与上一步中获取的数据相关联，并通过该方法比较能耗。图 3-6 展示了 CLTC-P 驾驶循环期间弱栅极驱动和强栅极驱动的功耗。

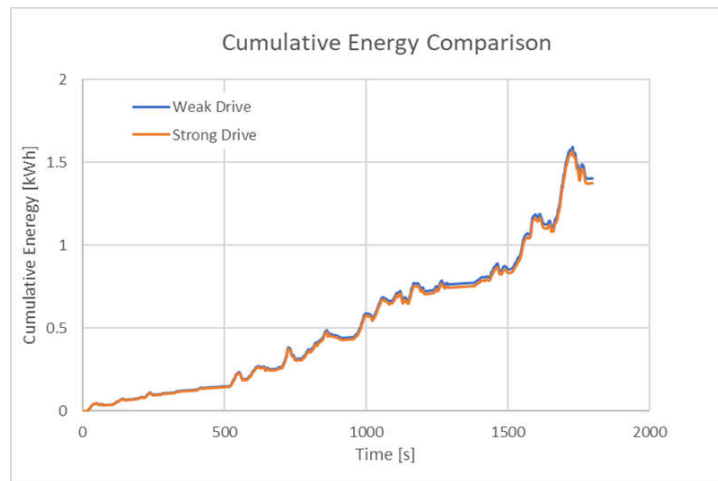


图 3-6. 累积能量比较

CLTC-P 驾驶循环内弱驱动的累积能量为 1.407kWh，而强驱动的累积能量为 1.375kWh。CLTC-P 的总距离为 14.94km，因此弱驱动和强驱动的平均功耗分别为 93.9Wh/km 和 92.03Wh/km。

在 CLTC-P 驾驶循环期间使用可调栅极驱动强度可将效率提高 2%。以 72kWh 电池为例，这将带来图 3-7 所示的四项关键改进。效率提高 2% 可以在相同的里程下节省 140 美元的电池成本（重量减轻 9kg，电池体积减小 7.5l），或者可以增加行驶里程 15.5km。

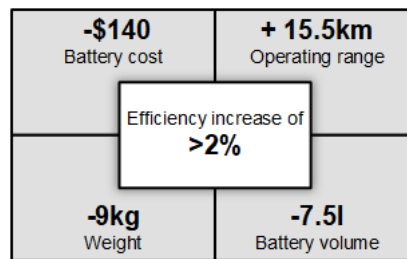


图 3-7. 受 2% 效率提升影响的四个关键方面

能耗和逆变器效率取决于车辆类型。车辆重量、最大速度和轮胎半径只是必须考虑的部分因素。不同的车辆也需要不同的功率才能在一个驾驶循环内达到相同的速度。如果车辆重量更重，则需要更大的功率，因此可调栅极驱动强度具有更大的影响力。对能耗有很大影响的另一个重要因素是驾驶方式。更频繁加速需要更频繁使用可调栅极驱动强度，而这种驾驶方式的效率提升会更多。

## 4 新一代微控制器

混合动力汽车和电动汽车 (HEV/EV) 中牵引逆变器对 MCU 的要求迅速发展，不断突破集成的界限。虽然尚未成为标准，但在单个牵引控制 MCU 中整合多个功能的趋势日益流行。这些功能通常包括车辆控制单元 (VCU)、直流/直流转换器以及 (尤其是在混合动力汽车设计中) 双电机控制功能。要实现这样的多功能，MCU 不仅需要提供高性能的快速控制计算，还需要提供大存储器容量来容纳广泛的程序映像和数据表。此外，为了实现精确检测和驱动，这些 MCU 需要高级模拟和数字外设 (如 ADC 和 PWM)。

为了适应这些不同的需求并促进相同或不同组织内不同团队的开发工作，具有多个 CPU 内核的 MCU 至关重要，让每个内核专用于特定功能。这种方法可以实现模块化设计并增强与其他电子控制单元 (ECU) 的通信，通常要求与 AUTOSAR 和 MCAL 框架兼容，尤其是在主机和 VCU 内核中。

AM263Px MCU 系列巧妙地满足了这些复杂要求。AM263Px MCU 系列整合了 ARM CPU 内核的高性能和广泛的生态系统支持以及德州仪器 (TI) 旗舰型实时控制 MCU C2000 的控制外设。这种协同作用可带来卓越的控制性能。此外，AM263Px 还引入了新的硬件旋转变压器数字转换 IP，提供最多两个旋转变压器反馈通道，并配备必要的安全检查。AM263Px 符合 ASIL D 安全标准并具备全面的网络安全功能，因此可作为满足现代混合动力汽车/电动汽车牵引逆变器复杂需求的整体设计。

## 5 结语

影响牵引逆变器效率的因素有很多。MCU、栅极驱动器、传感器和控制算法便是其中一些影响因素。本文介绍了逆变器效率对电动汽车的影响。TIDM-02014 参考设计的大功率测试结果表明，在特定车型的 CLTC-P 驾驶循环中使用可调栅极驱动器强度时，牵引逆变器的功耗可降低 2%。使用不同类型的车辆和驾驶方式可能需要更多或更少的功率，因此对效率提升的影响也不同。

## 6 术语

**ADC**  
**AUTOSAR**  
**CLA**  
**CLTC**  
**CPU**  
**EV**  
**E-ME**  
**HEV**  
**IC**  
**MCU**  
**MTPA**  
**MTPV**  
**PMSM**  
**PWM**  
**RDC**  
**RPM**  
**SIC**  
**TMU**  
**WLTP**

### 术语

模数转换器  
汽车开放系统架构  
控制律加速器  
中国轻型汽车驾驶循环  
中央处理单元  
电动汽车  
电动机仿真器  
混合动力电动汽车  
集成电路  
微控制器单元  
每安培最大扭矩  
每电压最大扭矩  
永磁同步电机  
脉宽调制  
旋转变压器数字转换  
每分钟转数  
碳化硅  
三角函数加速器  
全球统一轻型汽车测试程序

## 7 资源

[TIDM-02014](#)  
[UCC5880-Q1](#)  
[UCC14240-Q1](#)  
[AM263P4-Q1](#)  
[TMS320F280039C-Q1](#)  
[AMC3330-Q1](#)  
[ISO1042-Q1](#)  
[TCAN1043-Q1](#)  
[ALM2403-Q1](#)  
[EAB450M12XM3](#)

AVL 的电动机仿真器

Yokogawa WT5000 功率分析仪

Tektronix 5 系列示波器

### 元件

### 设备



## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司