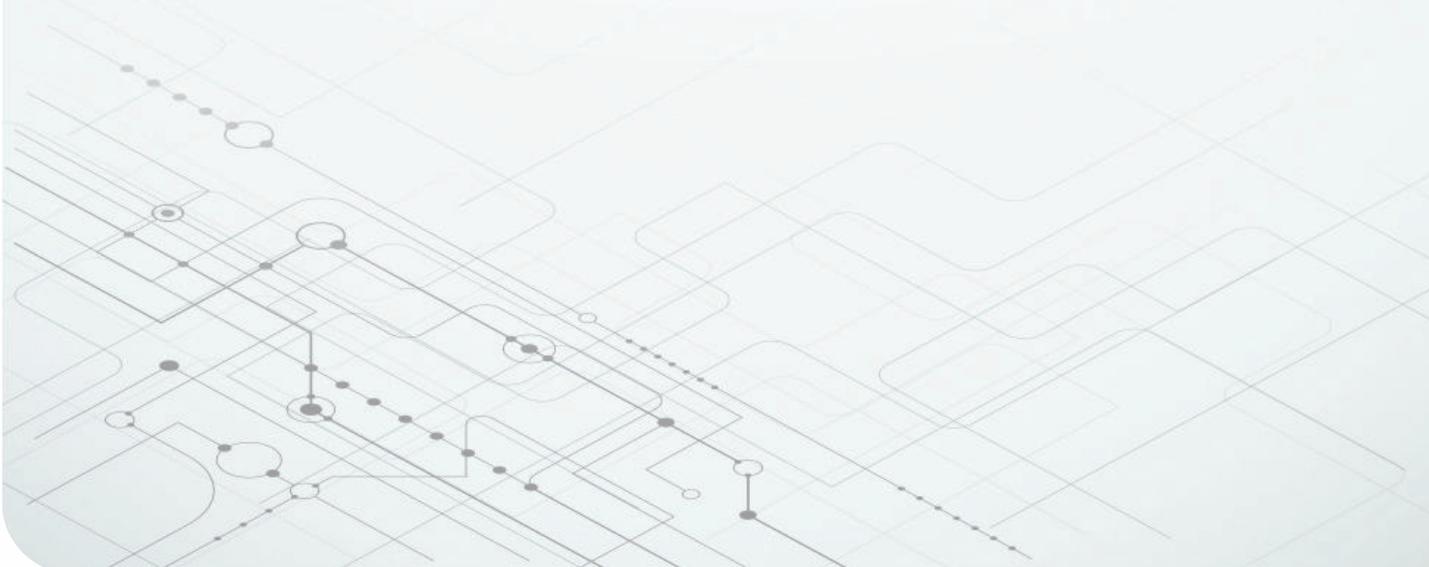


使用 C2000™ 实时 MCU 实现高效 率和 EV 动力总成子系统集成



Manish Bhardwaj,
Systems Engineer
C2000™ Microcontrollers

Waqar Mehmood,
Product Marketing
C2000™ Microcontrollers



电动汽车动力总成子系统中使用了多种架构和拓扑，如车载充电器 (OBC) 和高压转低压直流/直流转换器。使用一个或多个实时微控制器 (MCU)，可以实现对这些系统中功率流的高效率控制和管理。

内容概览

本文讨论车载充电器和高压转低压直流/直流转换器的常见控制挑战，以及 C2000™ 实时 MCU 在这些子系统中的优势。



适用于车载充电器的图腾柱 PFC 和 CLLLC 拓扑

1

图腾柱无桥 PFC 通过减少电流路径中功率器件的数量来提高效率，同时实现双向操作。CLLLC 隔离式直流/直流转换器提供了软开关功能，可实现更高的开关频率和更小的磁体尺寸。



高压转低压直流/直流转换器的峰值电流模式控制

2

在 C2000 实时微控制器上进行模拟集成可实现峰值电流模式，控制环路完全在硬件中。



车载充电器的实时 MCU 的可扩展产品组合

3

C2000 实时 MCU 提供了可扩展的产品组合，可满足车载充电器系统中各种集成需求和离散选件的需要。

自 2010 年以来，电动汽车 (EV) 市场一直在快速增长，而原始设备制造商 (OEM) 宣布到 2025 年将推出电动汽车车型。这种更偏向纯电动汽车而非混合动力汽车的演变是对政府环境政策的回应，此类政策要求汽车转型且逐渐弃用内燃机。

更高容量的电池组在减少用户因行驶距离受限而产生的焦虑的同时，对电动汽车的电力电子器件（尤其是车载充电器 (OBC)）的要求也越来越高，不仅需要适应更高的功率

额定值以适应更高的功率容量，还必须具有更高的功率密度和更高的功率，从而减轻车辆重量并降低每次充电的成本。

氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 宽带隙功率半导体的出现为电动汽车中的电力电子器件提供了一个大幅缩小尺寸和减轻重量的机会，因为它们能够在比硅高得多的开关频率下高效地工作。

OEM 和一级供应商面临的挑战是需要提供能够支持众多具有不同电网基础设施的地理区域的 OBC 解决方案。例如，中国的较大功率电动汽车充电器需要支持与三相电源线相连，而美国的电动汽车需要连接单相电源线。OEM 希望提供额定功率通常从 3.3kW 到 22kW 不等（在某些情况下甚至高达 44kW）的产品。

电动汽车动力总成中最关键的系统是用于为高压电池充电的 OBC、为 12V/48V 电池充电的高压转低压直流/直流转换器，以及用于控制电动汽车电机的牵引逆变器，如图 1 中所示。

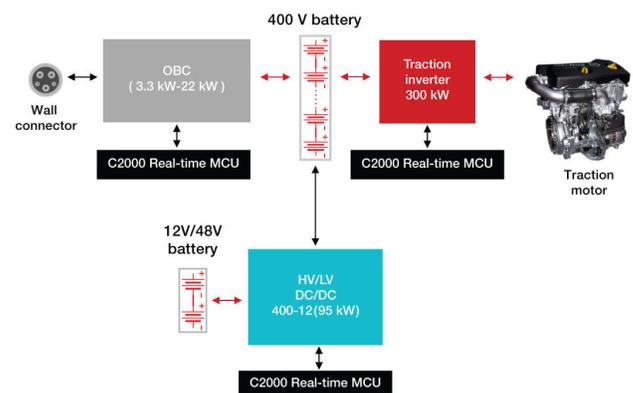


图 1. 电动汽车动力总成系统方框图。

使用一个或多个实时微控制器 (MCU)，可以实现对这些系统中功率流的高效率控制和管理。为节省机加工成本和减少电力电子器件的尺寸，一种常见的趋势是将 OBC 设备

与高压转低压直流/直流转换器集成，这可以节省多达 10%-20% 的电路板空间。然而，这会对实时 MCU 提出额外的要求，因为它需要支持更多的脉冲宽度调制器 (PWM)、更多的 ADC 并需要使用多核处理来管理多个功率级。

此外，OBC 需要支持车辆到电网的双向操作，这导致选择拓扑时更复杂，因而要求在为 OBC 选择 MCU 时更加小心。MCU 必须包含以下功能：

- 通过对电源转换器占空比、频率、死区和相移进行高分辨率控制来实现高频操作，从而减小磁体尺寸并减轻其重量。
- 通过启用不损害效率的软开关方案（如临界模式操作和谷底开关）来减少损耗。
- 通过增加模拟集成来减少设计中外部器件（如比较器和数模转换器 (DAC)）的数量，从而降低成本。

MCU 还应是可扩展产品组合的组成部分，以便在将 OBC 与高压转低压直流/直流转换器集成时支持各种选项。在本白皮书中，我们将回顾每个阶段的典型拓扑和挑战，并重点介绍 C2000 实时 MCU 的一些功能，从而帮助您应对这些挑战。

适用于车载充电器的图腾柱 PFC 和 CLLLC 拓扑

图 2 显示了一个 3.3kW 的 OBC，其中，OBC PFC 有一个图腾柱 PFC 级，而 OBC 直流/直流转换器有一个电容-电

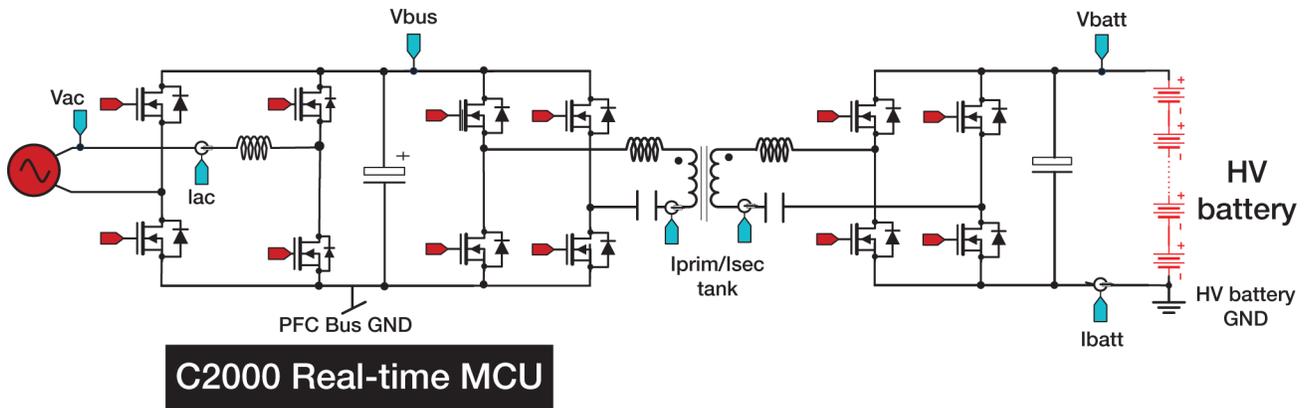


图 2. 带单相 PFC 和隔离式直流/直流级的 OBC 功率级。

高压转低压直流/直流转换器的峰值电流模式控制

从 OBC 直流/直流级来看，隔离式直流/直流转换器（如 CLLLC）是一种常见的选择，因为它具有扩展的零电压开

关 (ZVS) 范围，可提供软开关功能以实现更高的开关频率，这可以实现更小的磁体尺寸。此外，同步整流方案 (图 3) 能够使效率提高多达 2%，但该方案实施起来具有挑战

感-电感-电感-电容 (CLLLC) 级。图腾柱无桥 PFC 通过减少电流路径中功率器件的数量来提高效率，同时实现双向操作（与传统基于桥的 PFC 相比）。由于硅功率金属氧化物半导体场效应晶体管中固有的体二极管在硬开关条件下容易受到高反向恢复损耗的影响，因此，图腾柱无桥 PFC 的实现以前仅限于较低的功率等级。由于其结构中没有这样的体二极管，通过采用 GaN 功率开关（如德州仪器 (TI) 公司的 LMG3410R050），现在已可以实现多千瓦图腾柱无桥 PFC 电源。由于 GaN 器件具有低输出电容 (Coss) 特性，因此可以在高频（100kHz 到 200kHz）下工作，进而允许使用更小的电感器，并缩小图腾柱 PFC 转换器所需的无源器件的尺寸。

然而，在死区时间，GaN 开关中的第三象限操作会导致额外损耗，实时 MCU 需要通过精确调节死区时间来优化这些损耗。C2000 实时 MCU 4 类 PWM 支持高分辨率死区时间等功能，可将死区调节到 150ps 的分辨率。以 100kHz 图腾柱 PFC 为例，采用死区时间优化后的损耗节省为 1W。由于设计人员通过将开关频率提高到 1MHz 并采用临界模式 PFC 等控制技术进一步减小了电感器尺寸，因此可以节省高达 10W 的功率损耗，从而使第三象限损耗的优化成为一个关键特性，对于这一点，可以在需要时精确且准确地控制死区时间。

性，并且通常需要外部电路。C2000 MCU 上集成的比较器子系统可实现同步整流，而无需外部组件（如 DAC、比较器或逻辑门）。此外，4 类 PWM 允许在 PWM 周期内

增加消隐窗口，并且可以锁定电流过零事件以增加同步整流方案的稳健性，进而向实现添加噪声弹性。

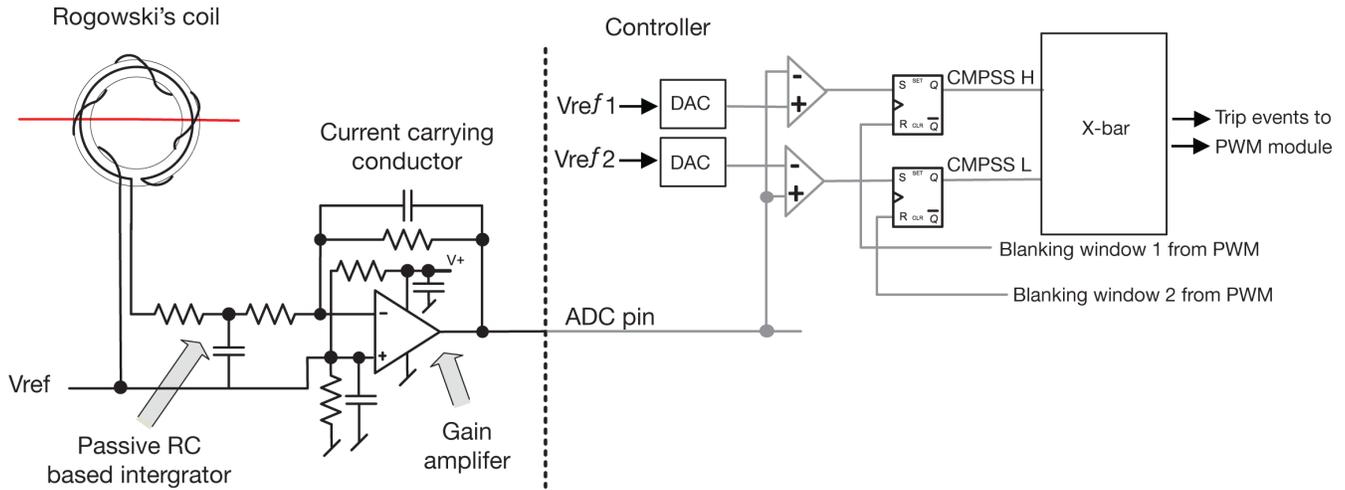


图 3. 用于高频转换器且具有片上资源的有源同步整流方案。

从高压转低压直流/直流转换器来看，相移全桥 (PSFB) 是所用的一种典型拓扑。有了峰值电流模式控制，就不再需要昂贵的直流阻断电容器。实施峰值电流模式控制的主要

挑战在于它可能导致系统不稳定，如图 4 所示。将斜率补偿添加到峰值电流参考点可避免这种不稳定性，而斜率补偿通常以模拟方式实现。

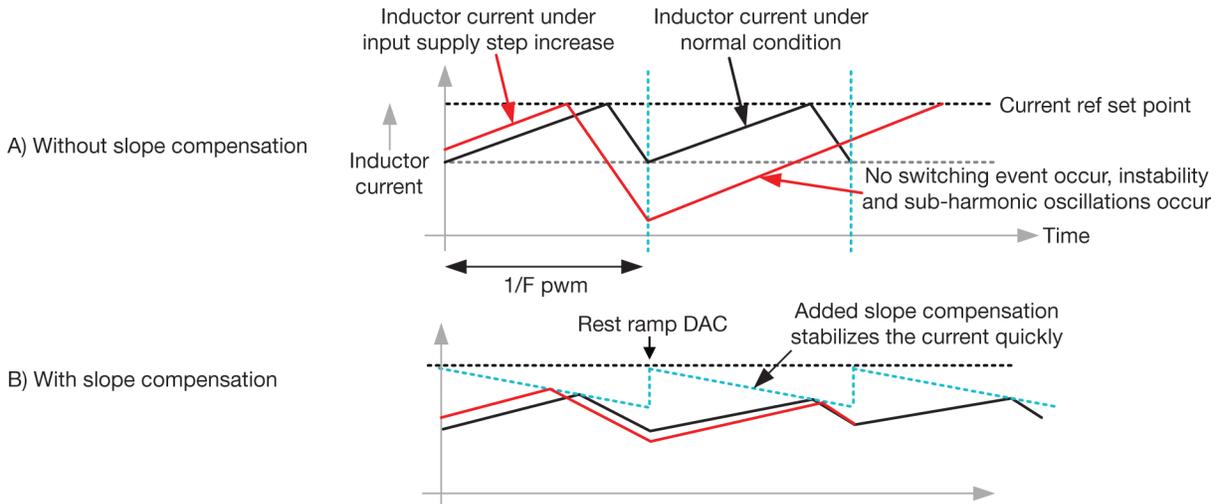


图 4. 使用斜率补偿实现峰值电流模式控制。

通过在 C2000 实时 MCU 比较器子系统中进行高级模拟集成，可以使用数字控制器来实现这一高级控制。此外，4 类 PWM 功能（例如，在发生峰值电流事件时插入死区）使数字控制器能够生成补充的 PWM。这样就可以在不同的线路和负载条件下更改死区，以维持软开关。数字控制还可以实现其他功能，例如，使用高压转低压直流/直流转

换器对牵引逆变器总线进行预充电，这可以消除对外部预充电电阻的需求，并进一步减少动力总成中的器件数量。

车载充电器的实时 MCU 的可扩展产品组合

OBC 的范围包括适用于插电式混合动力电动汽车的 3.3kW 和适用于电动汽车的 6.6kW 至 22kW 等。适用于 3.3kW 至 6.6kW OBC 的常用架构包括图腾柱 PFC 和 CLLLC。

表 1 列出了基于系统架构的各种实时 MCU 选择以及集成选项。

	至少需要的资源			典型实时 MCU 选项		
	PWM	模数转换器	MIPS	独立控制器	单控制器用于 OBC, 独立控制器用于 HV/LV DC/DC	单个集成控制器
3.3kW/6.6kW OBC PFC 级 (图腾柱 PFC)	2	5	70	F280025	F280049	F2837S
3.3kW/6.6kW OBC 直流/直流转换器 (CLLLC)	8	5	50	F280025	F280025	
3kW 高压转低压直流/直流转换器	6	5	40	F20025		

表 1. 适用于 3.3kW 至 6.6kW OBC 和高压转低压直流/直流系统的实时 MCU。

对于 11kW 及更高的 OBC，一种方法是堆叠三个 3.6kW 充电器（在拓扑结构上类似于 3.3kW 充电器）；这称为模块化 OBC 方法。还可以通过堆叠 11kW 充电器或通过并联或选择不同的场效应晶体管 (FET) 来设计额外的 22kW 充电器。另一种实现 11kW 的方法是使用三相 PFC 前端（单相运行时有一定的降额）。

OEM 选择的方法可能因地理区域而异。例如，在美国，单相很常见，因此模块化方法比较常用。在欧洲或亚洲，三

相更常见，三相 PFC 可以提供更高的密度和更低的成本，因为系统需要的功率器件和开关较少。为解决这一广泛的功率级别，需寻找一个可扩展的控制器产品组合，不仅可以处理高级拓扑控制，还可以实现集成。C2000 MCU 产品组合 (表 3)，其范围包括低端到中高端器件，可支持表 1 和表 2 中的系统实现选项。

	至少需要的资源			典型实时 MCU 选项	
	PWM	模数转换器	MIPS	独立控制器	单个集成控制器
11kW 模块化 OBC (PFC + 直流/直流转换器)	10	10	120	三个 F280049	F28388D
3kW 高压转低压直流/直流转换器	6	5	40	F280025	F28388D
11kW OBC PFC 级 (T 型)	12	8	50	F280025	
11kW OBC 直流/直流级 (两个直流/直流转换器, 每个 5.5kW)	16	8	100	F280049	

表 2. 适用于 11kW 和更高 OBC 和高压转低压直流/直流转换器系统的实时 MCU。

器件	PWM	ADC	MIPS
F280025	14	16	100
F280049	14	21	200
F28377D	24	24	800
F28388D	32	24	925

表 3. C2000 实时 MCU 产品系列。

在模块化方法（堆叠三个单相充电器以达到 11kW）中，每个模块的设计功率为 3.6kW，使用单相交流输入，通常有单相 PFC 级和直流/直流级 (图 5)。高压和低压直流/直流转换器一端连接高压电池，另一端连接 12V 电池。由于系统中存在多个隔离平面，因此可以为每个相位设计一个

单控制器，使用独立控制器（使用 F280049）或单控制器（如 F28388）控制 OBC 的所有三个级。F280025 还可以控制高压转低压直流/直流转换器，因为该控制器提供了必要的高级模拟集成来控制相移全桥功率级。

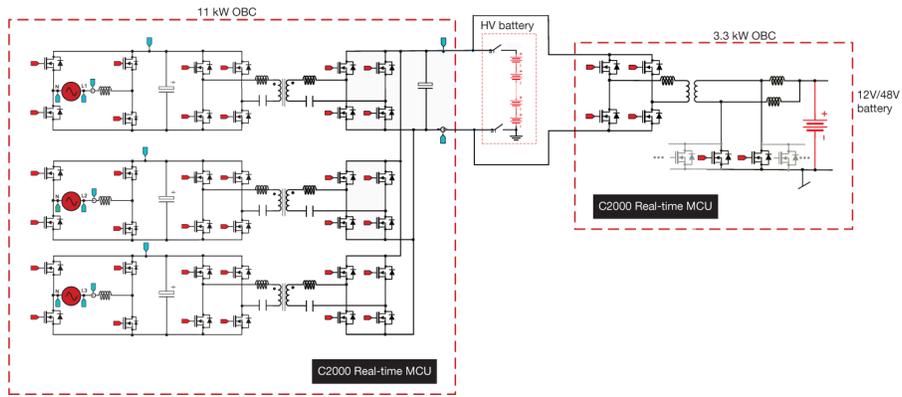


图5. 带 3.6kW 堆叠式充电器和高压转低压直流/直流转换器的 11kW OBC。

如果功率级不是模块化的，您可以使用单控制器来控制整个系统。图 6 显示一个这样的示例，使用 T 型三相 PFC 和交错双有源电桥 (DAB) 转换器来实现 OBC。（表 2 列出了该系统的几种 MCU 选择。）C2000 实时 MCU 系列中的 F28388D 器件可以控制系统中的所有电力电子器件。

随着 OEM 对这些系统进行优化，诸如“一个盒子”之类的概念变得越来越流行，其中 OBC 和高压转低压直流/直流转换器封装在同一个外壳中。“一个盒子”概念通过使用多端口转换器在 OBC 直流/直流级和高压转低压直流/直流转换器之间共享直流/直流级，提供了更多选择。

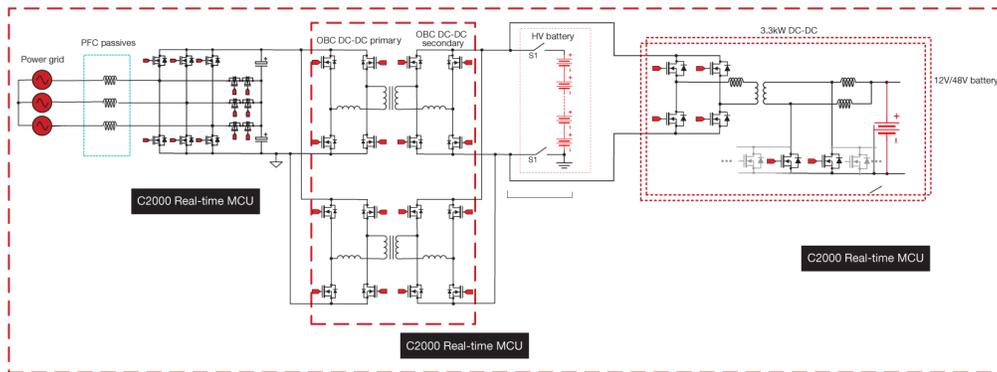


图6. 11kW OBC 加上使用 F28388D 控制的高压转低压直流/直流转换器。

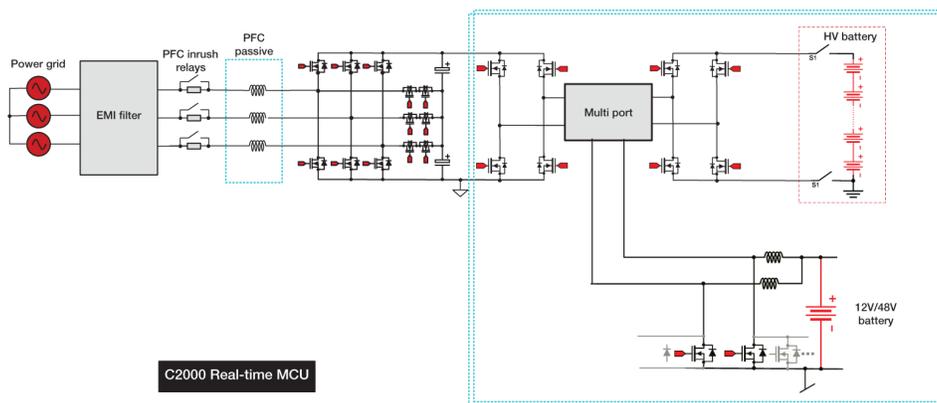


图7. 11kW OBC 加上使用由 F28388D 控制的多端口方案的高压转低压直流/直流转换器。

既然单控制器可控制所有级，进一步的优化就成为可能。

图 7 显示使用多端口转换器的效果，可将所需的开关/高压 FET 的数量减少 16%。

结论

随着 OEM 和一级供应商不断突破效率和功率密度的限制，对实时控制器的需求也随之增加，这些控制器具有可扩展性并能够支持高级拓扑和集成选项。借助 C2000 MCU 中内置的器件功能，系统设计人员能够在保持高效率的同时实现更高的开关频率，从而减小系统尺寸并降低成本。C2000 实时 MCU 产品组合包括模块化、完全集成的解决方案，以及面向高级拓扑的参考设计和软件，如 CLLLC、DAB、图腾柱 PFC、Vienna 整流器、T 型 PFC 和相移全桥 (PSFB)。

这些工具和资源可以加快面向电动汽车应用领域的电源转换器（如 OBC 和高压到低压直流/直流转换器）的设计和开发。

其他资源

- [C2000 实时 MCU](#)
- [GaN 功率器件](#)

参考文献

- [“使用 C2000™ MCU 的双向交错式 CCM 图腾柱无桥 PFC 参考设计。”](#) “TIDM-1007/02008 用户指南”。德州仪器 (TI) 用户指南，文献编号 TIDUD61D，2020 年 3 月，2020 年 10 月修订。

- Sun Bingyao, 2019 年。 [“GaN 是否具有体二极管？ - 了解 GaN 的第三象限操作。”](#) 德州仪器 (TI) 应用报告，文献编号 SNOAA36，2019 年 2 月。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [” 针对 HEV/EV 车载充电器的双向 CLLLC 谐振双有源电桥 \(DAB\) 参考设计。](#) “德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDM-02002。2020 年 10 月 26 日。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [“基于 GaN 的高效率 1.6kW 高密度 1MHz CrM 图腾柱 PFC 转换器参考设计。”](#) 德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-00961。2020 年 10 月 26 日。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [“使用 C2000 实时 MCU 的峰值电流模式控制相移全桥参考设计。”](#) 德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDM-02000。2020 年 10 月 26 日。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [” 三级三相 SiC 交流/直流转换器参考设计。](#) “德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-010039。2020 年 10 月 26 日。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [” 针对 3 级电动汽车充电站的双向双有源电桥参考设计。](#) “德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-010054。2020 年 10 月 26 日。
- 德州仪器 (TI) (日期不详) [适用于 C2000 MCU 的 DigitalPower 软件开发套件 \(SDK\)。](#) 2020 年 10 月 26 日。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司