

Technical White Paper

利用德州仪器 (TI) 的新调制技术优化牵引系统效率



Osamah Ahmad

1 内容摘要

随着汽车制造商追求迫切的电气化目标，汽车电气化继续在全球加速。但是，通过提高效率来降低 EV 成本仍然是 OEM 和 1 级供应商面临的关键挑战和关注点。

在目前先进的牵引逆变器系统中，使用了各种不同的空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术。虽然 SVPWM 简单、有效且易于理解，但基于同步最佳脉冲模式 (OPP) 的调制保证提高了效率。最佳脉冲模式的概念是众所周知的，因为晶闸管时代转换器的开关频率非常受限。但是，对 EV 牵引系统应用 OPP 调制需要应对现有 MCU 的处理和外设功能难以克服的几项根本挑战。在介绍其出色脉冲模式 (OPP) 实现方案时，TI 利用 F29x MCU 独特的外设功能和出色的处理能力来应对这些根本性挑战。初步的大功率测试结果表明，牵引系统效率提高了 0.8%，使 EV 制造商每个电池包可节省 100 美元以上。

本文重点介绍了牵引逆变器优化的重要性，OPP 如何实现有意义的系统级优势，以及 TI 的 F29x MCU 如何解决在实现 OPP 时面临的实际挑战。

2 牵引系统效率为何重要

由于牵引系统是 EV 电池电能的主要消耗者，而 EV 电池是 EV 中成本最高的组件，因此提高牵引系统效率是实现以下主要 OEM 目标的有效方法：

表 2-1. OEM 目标和常见设计挑战

OEM 目标	实现目标的技术设计挑战
减少电池尺寸和车辆成本	提升牵引系统效率
增加行驶里程以满足消费者期望	

可能受 OPP 影响的牵引系统效率的两个因素为：

- 功率半导体中的开关损耗
- 电机导通和谐波损耗

TI 独特的 OPP 设计可找到尽可能减少开关损耗和电机谐波损耗的最佳时机，从而优化牵引系统效率。

3 最优脉冲定位：新的调制策略

调制是通过精确地导通和关断开关从直流电池生成交流波形的过程。开关速度更快可实现更干净的正弦波形，但会增加开关损耗，因为每次开关 FET 时都会有损耗。由于正弦波形失真，较慢的开关会引入电机谐波损耗。精心设计的调制技术可在整个驾驶循环中优化开关损耗和电机谐波损耗，而不会影响车辆性能或驾驶员体验。

前面提到的传统调制技术 SVPWM 具有固定的周期/频率，并在 PWM 周期内使用预定数量的边沿。OPP 使用可变开关频率，在一个 PWM 周期内可能会发生多个开关事件和边沿。这从根本上释放了使用 OPP 实现有意义效率提升的潜力。图 3-1 将 OPP 波形与 SVPWM 波形进行了比较，突出了调制差异和复杂性。

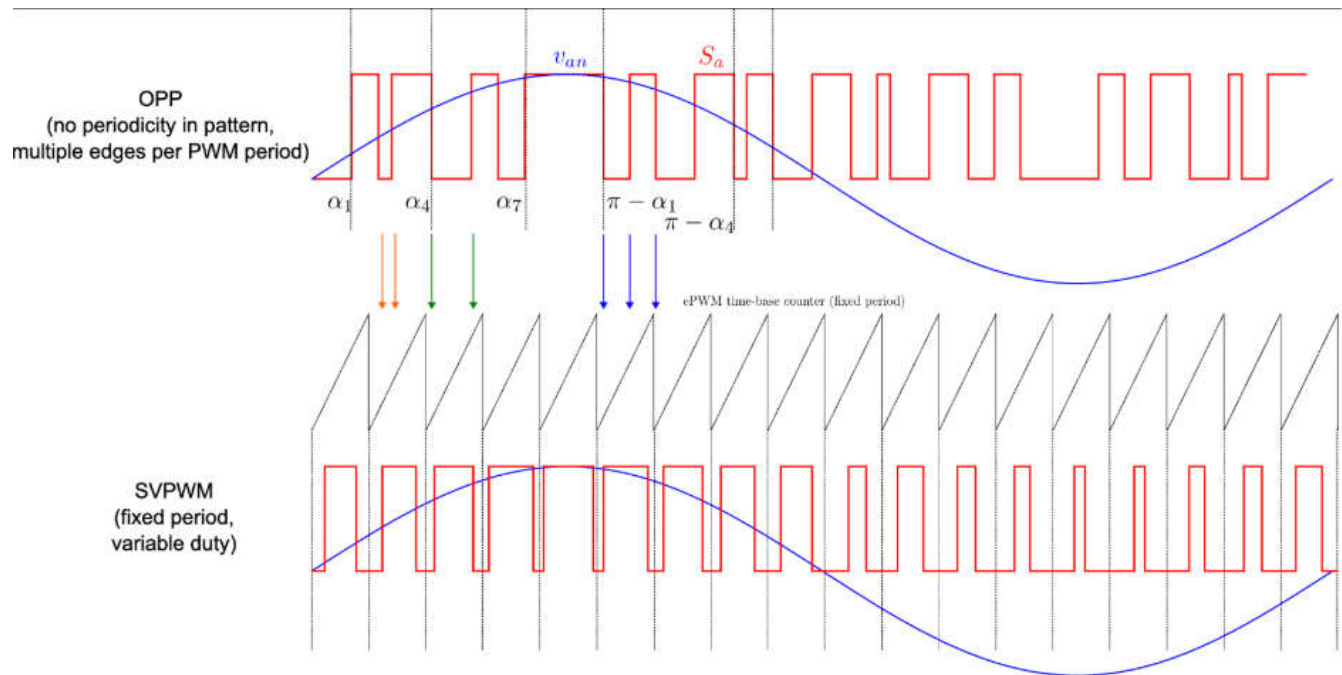


图 3-1. 最佳脉冲模式波形与空间矢量调制波形

OPP 支持在较低的开关频率下运行，同时更大限度地减少电机谐波。OPP 还可以更高效地利用 EV 电池，从而减少铜损耗（电机损耗的一部分）。两者都可以优化系统总损耗。下图反映了这点。

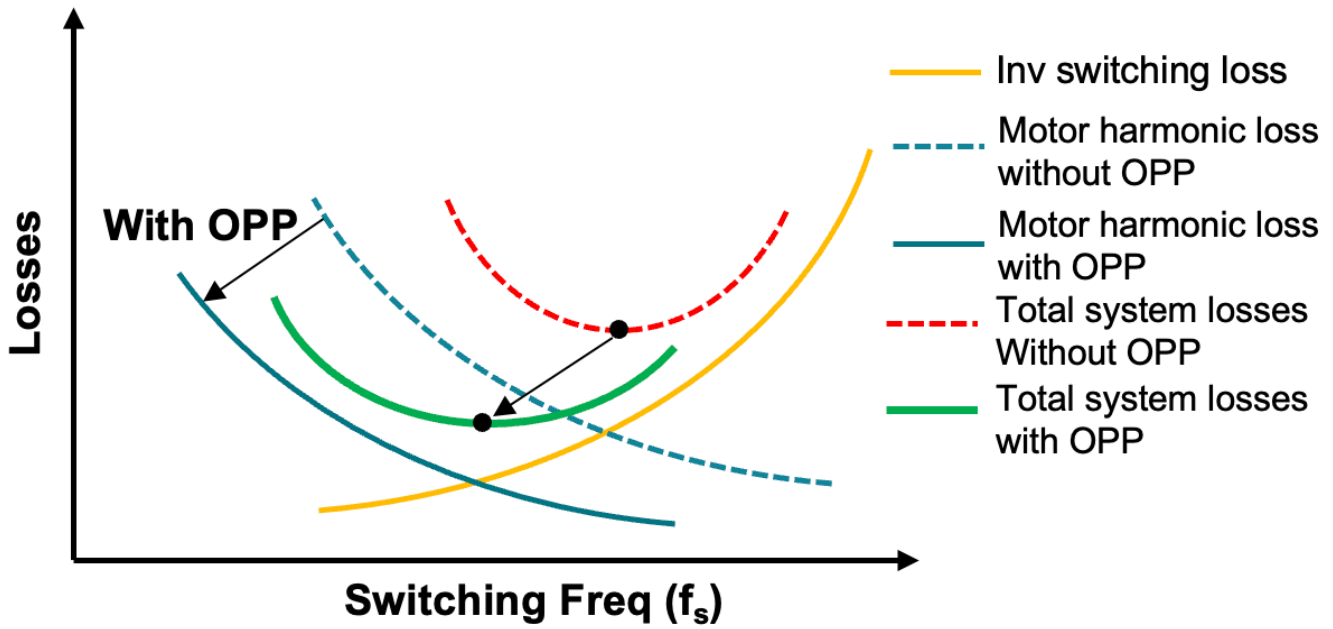


图 3-2. 使用 OPP 时减少的系统总损耗

4 实施 OPP 的关键挑战以及 TI 如何解决这些挑战

实施强大的 OPP 解决方案会面临三个复杂挑战：

1. 同步 PWM 脉冲生成
2. SVPWM 至 OPP 转换
3. 动态响应及稳健的闭环控制

这些挑战要求差异化 MCU 支持卓越的实时控制性能及独特功能。TI 的 OPP 设计利用 F29x 实时微控制器解决了这些挑战。实现此功能的关键 F29x MCU 特性包括：

- 针对实时电机控制进行了优化的高性能 C29 CPU 内核
- 5 类 ePWM 支持精确的边沿放置，一个 PWM 周期内多个边沿以及活动和影子寄存器功能
- 紧密耦合的 CPU-PWM 可最大限度地减少 CPU 开销

5 同步 PWM 脉冲生成

如前所述，OPP 波形可能需要在 PWM 周期内具有更高的比较事件或边沿。F29 MCU 的 5 类 ePWM 模块与其 XCMP 功能通过在每个 PWM 周期支持多个比较事件来启用 OPP。图 5-1 展示了单个 PWM 周期内的 4 个 XCMP 事件或 4 个边沿。如果没有该特性，竞争对手的 MCU 在 PWM 周期内会限制较少的独立边沿，从而限制了它们运行 OPP 的能力，尤其是在较低速度下的能力，因而增加了效率。

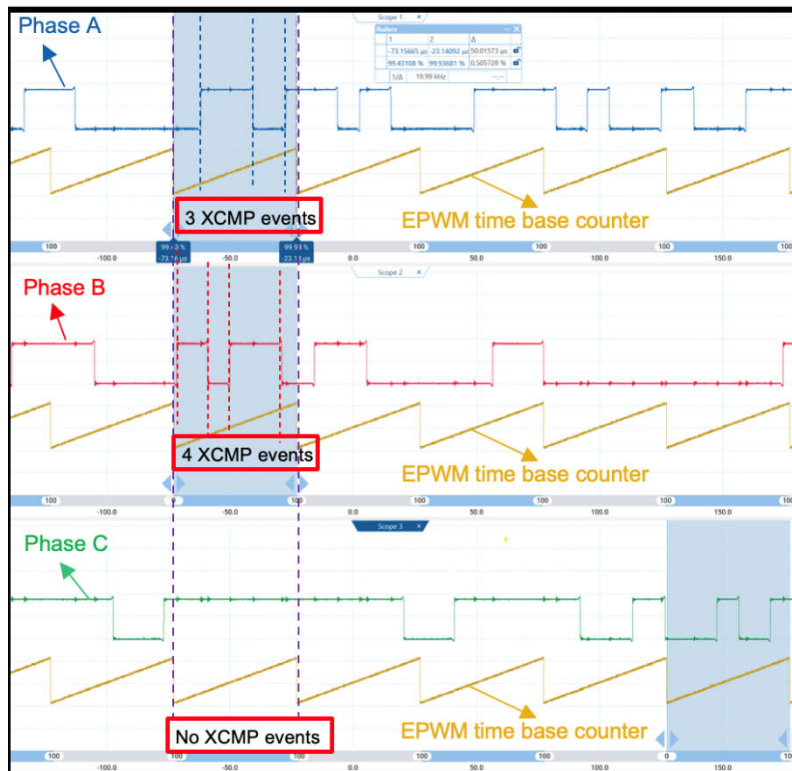


图 5-1. 单个 PWM 周期内多个 XCMP 事件或边沿

准确的边沿放置也是生成同步 PWM 脉冲的关键因素。PWM 边沿位置的细微误差会导致电机谐波损耗。F29 MCU 上解决该问题的主要优势有两个：

- C29 性能，满足了对需要放置多少个边沿以及有关何时放置的计算的高要求。
- 紧密的 CPU 至 PWM 互连：更新 PWM 所需的最小 CPU 周期

由于 CPU 必须在每个比较事件时写入 PWM 寄存器，因此如果单个 PWM 周期中有多个边沿，则可能需要相当大的 CPU 带宽。但是，由于 C29 CPU 与 PWM 互连之间具有超低延迟，因此满足 PWM 比较事件的需求所需的 CPU 周期极少。这有效地解决了因为多次 PWM 寄存器写入而导致 CPU 带宽损失的问题。

6 SVPWM 至 OPP 转换

从空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 到 OPP 的转换非常复杂。首先需要进行这种转换，因为在低速 (启动) 下，系统必须在 SVPWM 模式下运行，以尽可能提高效率。但是，随着电机转速的增加，需要转换到 OPP，来保持效率。F29 上的另一个 5 类 ePWM 功能 (影子寄存器和活动寄存器) 可实现从一种模式 (SVPWM) 至另一种模式 (OPP) 的平滑无缝转换。影子寄存器和活动寄存器允许 SVPWM 和 OPP 配置同时共存，并支持动态 PWM 重新配置。下图突出显示了 TI 实现的 5 类 ePWM，用于解决 SVPWM 到 OPP 转换问题。

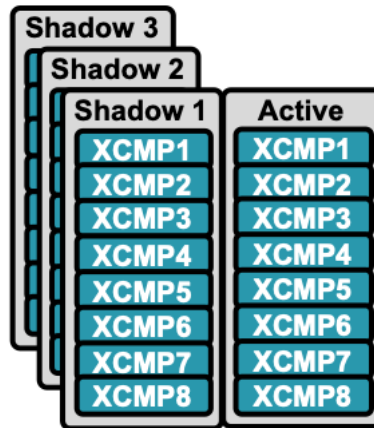


图 6-1. 影子寄存器及活动寄存器可视化

7 动态响应及稳健的闭环控制

虽然人们希望良好的条件，但现实世界的系统总是会引入周期性的异常或干扰。电机电流可能受到以下任一项的干扰：

- SVPWM 至 OPP 转换
- 更改 OPP 脉冲数
- 扭矩请求更改 (驱动器输入)

可解决每种情况的闭环及有源控制对于实现完整且强大的 OPP 设计至关重要。

由于主动控制不能单独通过传统 FOC (磁场定向控制) 来完成，因此需要磁通控制。磁通控制非常复杂，并带来了三个子挑战：

- 磁通基准：磁通必须为多大。
- 磁通观测器：实际磁通。这很困难，因为无法测量磁通。
- 磁通控制器：纠正措施和计算，以更大限度地减少磁通误差

TI 设计了一个磁通控制器来实现稳健的闭环控制，这种控制非常耗时且复杂。C29 CPU 凭借出色的实时性能解决了这一问题，其性能比牵引逆变器市场中其他同类 MCU (通过先进的汽车 TIER1 标准进行基准测试) 提升至 2.5 倍以上。基于硬件的 TMU (三角函数加速器) 特性可显著减轻 C29 CPU 的特定数学函数负担，有助于进一步提高性能。下图展示了经过验证可以实现稳定闭环控制的 TI OPP 设计。

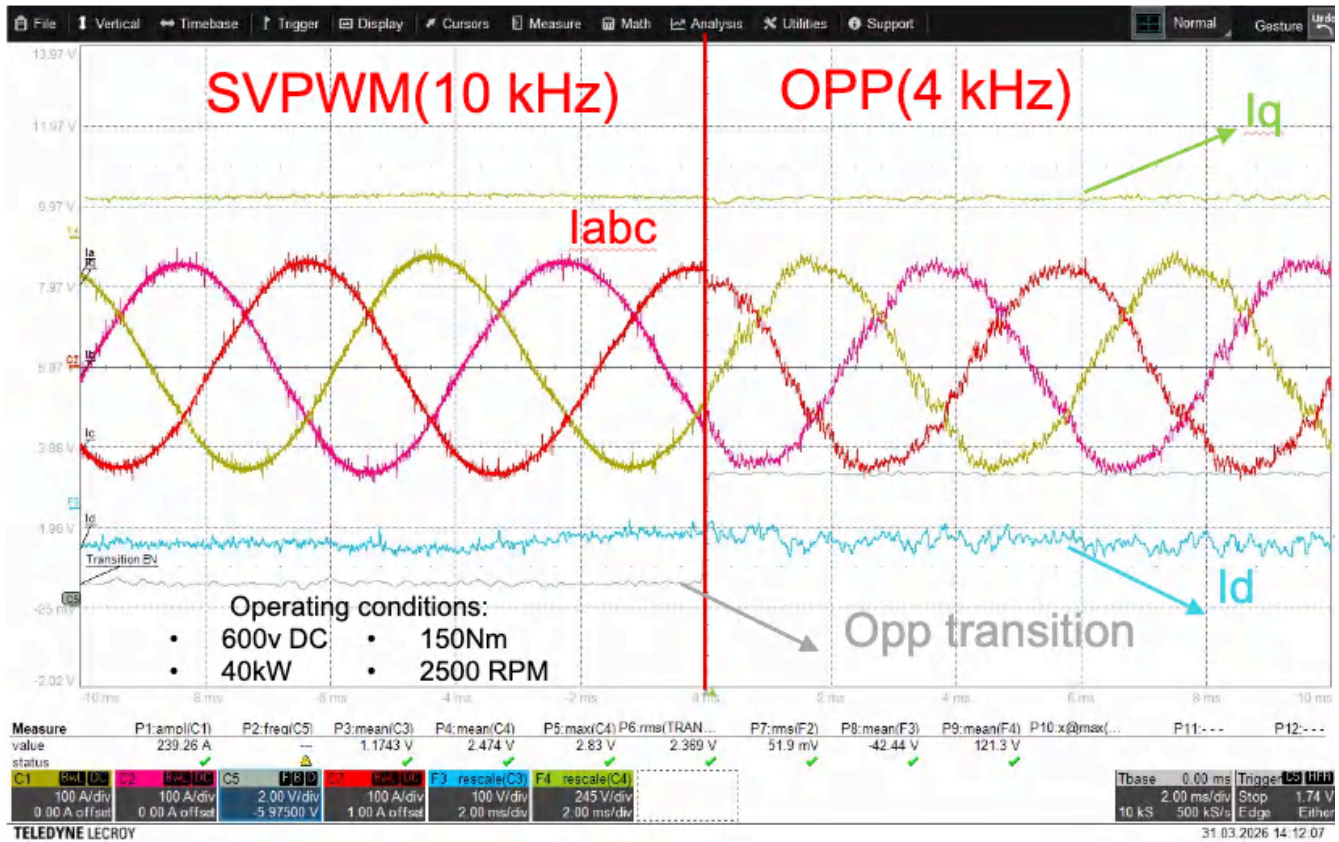


图 7-1. 稳定闭环控制

8 结语

随着 EV/HEV 采用率的持续增长，通过优化 EV 效率来降低车辆成本仍然是汽车制造商的一项关键优先事项。牵引逆变器是进行优化的最有效区域。

TI 的最佳脉冲定位 (OPP) 设计引入了一种新的调制技术，可动态地更大限度地减少逆变器开关和电机谐波损耗。虽然初始测试结果很有前景，但 TI 的 OPP 解决方案能够实现单个电池组节省 100 多美元，并不断改进更多的特性和功能，提高易用性和效率。得益于高性能 F29x MCU 及其差异化特性，OPP 可提供有意义的系统级优势，包括更小的电池尺寸和/或更长的驱动距离。对于希望更大限度地提高 EV 效率的汽车 OEM 和 1 级供应商而言，TI 的 OPP 解决方案代表了牵引逆变器创新中引人注目的下一重要方向

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