

Application Note

采用 TPLD 器件的矩阵转换器的智能保护



Josh Wei, Christina Huang, Forest Fu

摘要

本应用手册将介绍单级车载充电器 (OBC) 的保护示例。由于单级 OBC 在提高功率密度方面越来越受欢迎，因此必须解决包括电压应力、快速故障响应和交流电压骤降在内的关键设计难题。为了克服这些限制，德州仪器 (TI) 的 TPLD 系列提供了丰富的内部硬件资源，例如 LUT、延迟块、内部振荡器和具有灵活在线编程功能的模拟比较器。最后，通过一个示例来演示 TPLD 如何取代庞大的分立式逻辑元件，从而优化 BOM 成本，简化系统设计，同时验证强大的保护功能。

内容

1 简介.....	2
2 过流保护挑战.....	3
2.1 阻断续流路径而产生的电压应力.....	3
2.2 对快速响应时间的要求.....	4
2.3 交流电网压降.....	4
3 TPLD 概述及配置.....	6
3.1 TPLD 概述.....	6
3.2 TPLD 产品资源.....	6
3.3 在线启动电路.....	8
4 TPLD 电路的系统示例.....	10
5 总结.....	10
6 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

车载充电器 (OBC) 是电动汽车 (EV) 和插电式混合动力汽车 (PHEV) 中的一个关键组件，它实现了直接通过标准交流电源为电池充电。随着 EV 的发展，OBC 架构已经发展了几代。最近的趋势是单级 OBC 拓扑，它减少了元件数量和成本，同时提供了更高的功率密度。该架构将 PFC 级和 DCDC 级合并成一个高频转换级。

矩阵转换器是目前所讨论的最出色的单级拓扑。图 1-1 示出了裕度调节电路的方框图。矩阵转换器消除了传统转换器所需的庞大直流链路电容器和交流输入电感器，因此可以在空间受限和成本敏感型 EV 应用中提高功率密度并降低成本。由于没有电解电容器（这在传统设计中通常是故障点），因此矩阵转换器具有更高的可靠性。

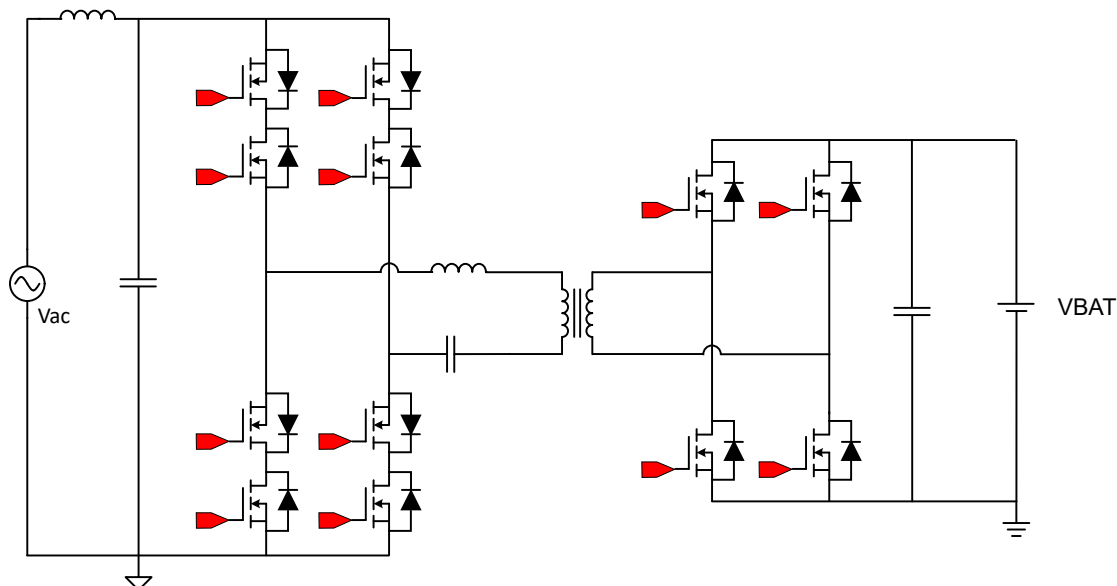


图 1-1. 矩阵转换器的方框图

尽管有这些优势，矩阵转换器的广泛采用也面临挑战。其中，过流保护是矩阵转换器面临的挑战之一，主要原因如下。

2 过流保护挑战

2.1 阻断续流路径而产生的电压应力

发生过流故障时，基本思路是关闭所有电源开关以保护其免受热故障的影响。这种保护方法广泛用于传统的两级 OBC。如图 2-1 所示，所有电源开关都关断后，变压器中的电流会通过体二极管续流。

然而，由于没有续流路径，矩阵转换器中无法使用这种控制方案。如果所有开关都完全关闭，变压器电流会给寄生电容充电，从而导致大电压尖峰，从而损坏设备，如图 2-2 所示。

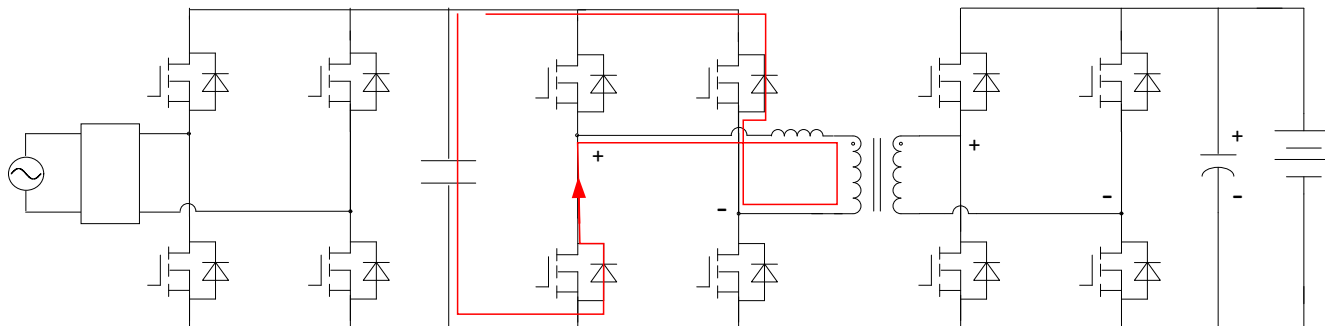


图 2-1. 所有 FET 都关闭后传统 OBC 中的电流路径

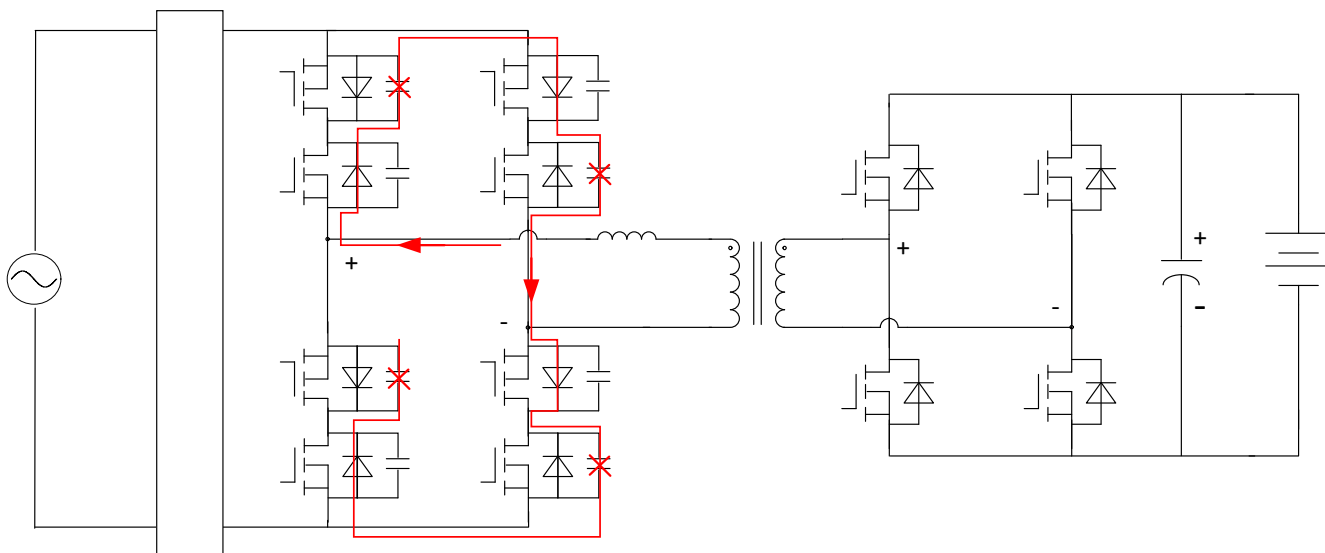


图 2-2. 所有 FET 均关断后矩阵转换器中的电流路径

因此，触发 OC 标志后，有必要为续流保持连续的电流路径。这意味着需要按照复杂的顺序关闭电源开关。

2.2 对快速响应时间的要求

在传统 OBC 中，PFC 开关频率通常不超过 100kHz，而在矩阵转换器中，客户追求 200kHz 至 500kHz 的频率来提高功率密度。在更高开关频率的应用中，SiC 或 GaN 用于替代基于 Si 的电源开关。对于传统的基于 Si 的电源开关，短路耐受时间可以超过 10 μ s。但是，对于基于 SiC 的电源开关，该值降至不到 2 μ s，而基于 GaN 的电源开关则进一步降至小于 1 μ s。

影响短路耐受时间的关键因素是热引起的灾难性故障。在短路情况下，电源开关会受到高压和大电流的影响，从而导致巨大的瞬时功率耗散和快速的温度升高。通常，基于 GaN 的电源开关具有更高的电流密度，导致高功率密度，并且在短路情况下温度会快速升高。

因此，对于矩阵转换器，由于电源开关的特性，OC 响应必须比传统的 OBC 更快。

2.3 交流电网压降

OBC 产品测试要求，当交流输入电压突然下降时，OBC 将进入故障保护状态，然后在异常输入结束后恢复。在这种情况下，交流电压可以在几微秒内从 311V 下降到 -311V，反向电压可以持续长达 $t_1 = 1\text{ms}$ ，如图 2-3 所示。

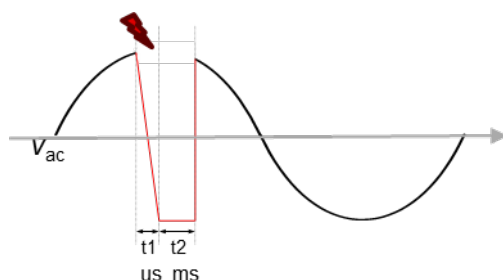


图 2-3. 突然的交流电压降触发 OCP

当交流电压突然下降时，OBC 必须快速触发 OCP。如果转换器在原始模式下继续运行，则会导致交流侧短路。图 2-4 是正常运行期间的电流路径，图 2-5 是发生交流电压降时的电流路径。当交流电压反向时，电流会流经电源开关的体二极管并导致电流尖峰。如果短路电流的大小和持续时间（以微秒为单位）超过器件限制，电源开关可能会损坏。

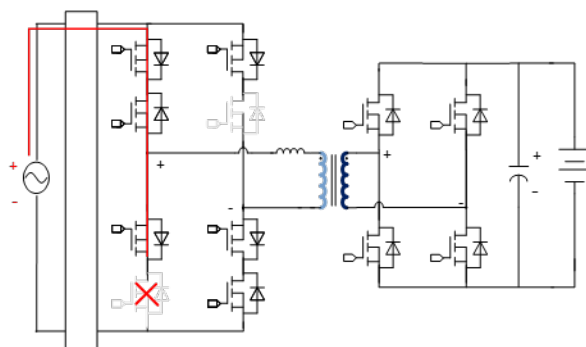


图 2-4. $V_{ac} > 0$ 运行条件

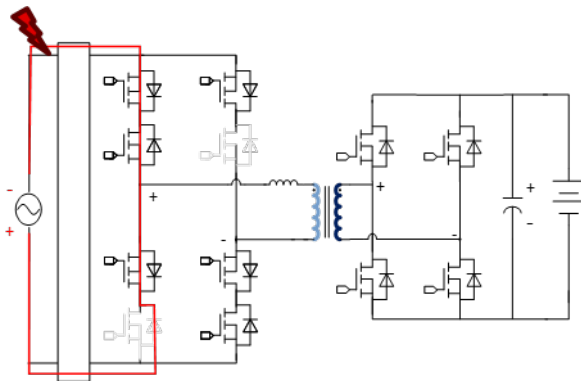


图 2-5. 交流电压降中的电流路径

因此，还必须考虑交流电网压降。这意味着关断序列需要有关交流电压方向的信息。

通常，关断序列可以由 DSP 的 CLB 模块实现。但是，在某些需要较高的功能安全级别的情况下，即使 DSP 功能丧失，系统也必须安全关断。在这些情况下，必须提出纯模拟设计作为备用保护路径，以满足功能安全要求。

3 TPLD 概述及配置

3.1 TPLD 概述

计算、编码和处理数字信号构建了各种数字控制器的基础知识。控制器内部具有更宽的位和更快的时钟，使用户能够实现更复杂、集成度更高的设计。然而，出于安全考虑，还有另一个因素要求开发人员从控制器中提取简单逻辑过程的某些部分。例如，当 MCU 失控时，必须有一只脚踩下制动器。开发人员可在系统中添加多个 AND/OR/D 触发器，以构建正确的断点。这是稳定的，但也可能更好：通过 TPLD 实现更小的尺寸和更灵活的配置。

表 3-1. 标题

	分立式逻辑电路	TPLD	CPLD/FPGA
太空	相当大	经优化的尺寸	中
成本	\$	\$	\$\$\$\$
灵活性	否	中	高

展示 TPLD 优势的简短示例：

$Y=AB/C+/ABC$ 需要 2 个 NOT 门、4 个 2 输入 AND 门以及 1 个 2 输入 OR 门。分立式逻辑电路的成本大于 30mm²，而 TPLD801 仅为 3.36mm²。

使用 TPLD 系列是通过 InterConnect Studio 实现的 TPLD 支持 OTP (一次性可编程) 这意味着用户可以在每个开发阶段以相同的引脚排列来优化设计。设计修复后，OTP 被锁定以防止内容回读。

3.2 TPLD 产品资源

不同的 TPLD 具有不同数量的门资源。TPLD 中的所有逻辑门都设置为 LUT (查询表)。例如，一个 3 输入 AND 门可以被描述为 LUT=111。这意味着只有当 LUT 的所有输入为逻辑高电平时，输出才为逻辑高电平。

除了 LUT 之外，TPLD 内有许多块可用于简化和优化设计：

1. 模拟比较器：集成基准，采用 32mV 分压。根据阈值直接将系统中的模拟信号转换为可操作的逻辑电平，而无需添加额外的电压基准和比较器。
2. 计数器和延迟发生器：以低成本实现准确延迟始终是系统中一个具有挑战性的问题。但是，通过 TPLD 内部的振荡器和延迟模块，这一目标现在可以实现。
3. 状态机：当正在设计的逻辑电路高度依赖于时序时，或者必须根据当前状态和特定的触发条件确定下一个状态，请尝试此操作。

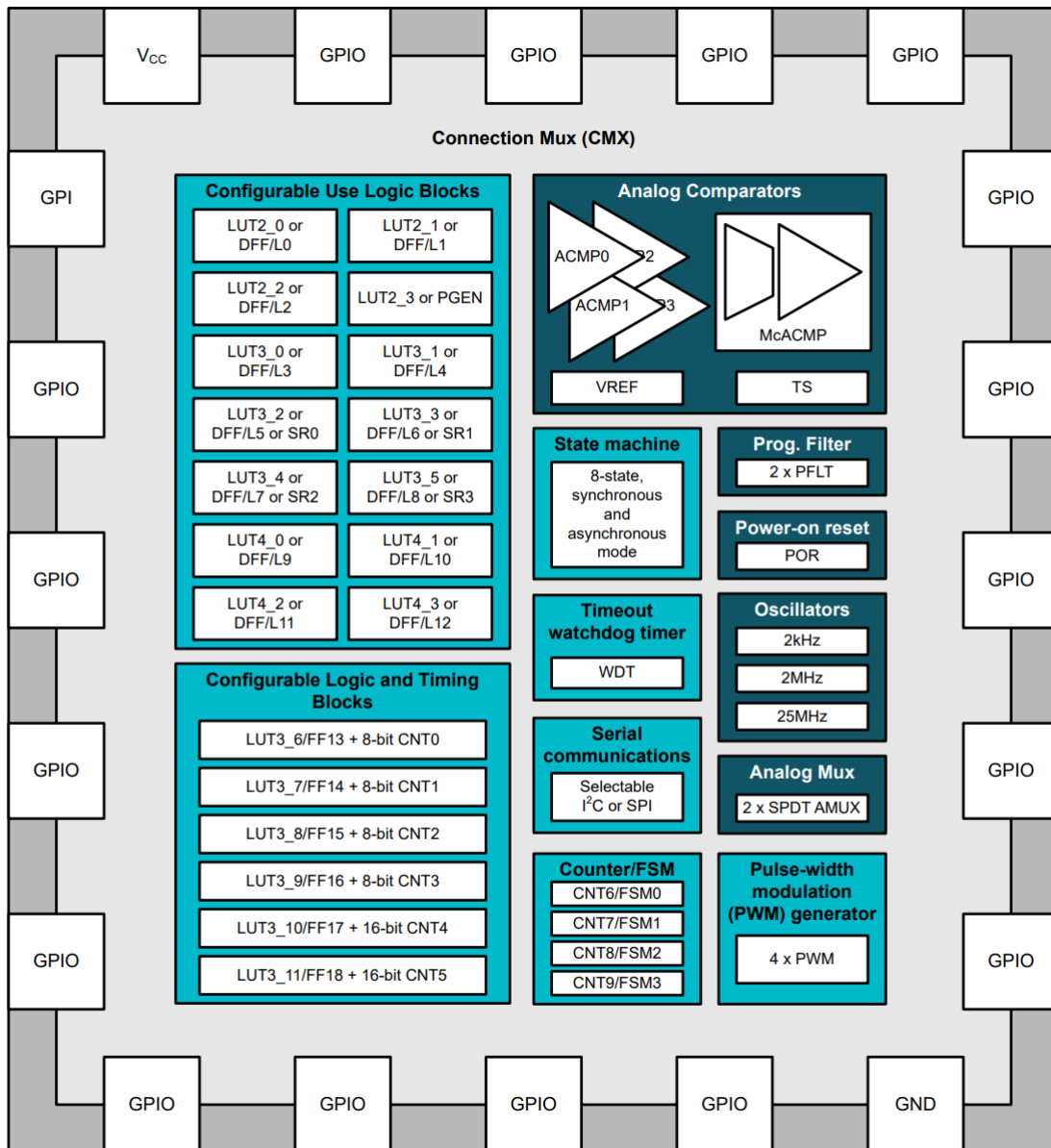


图 3-1. TPLD2001-Q1 方框图

实际上，可以使用 TPLD 来实现许多其他有趣的功能，例如模拟通道 MUX、PWM 生成、频率捕获等。除了从数据表中了解如何使用该器件之外，还有一个有用的工具可帮助用户了解和设计 TPLD。

3.3 在线启动电路

INTERCONNECT-STUDIO 为开发人员提供设计电路所需的图形界面。

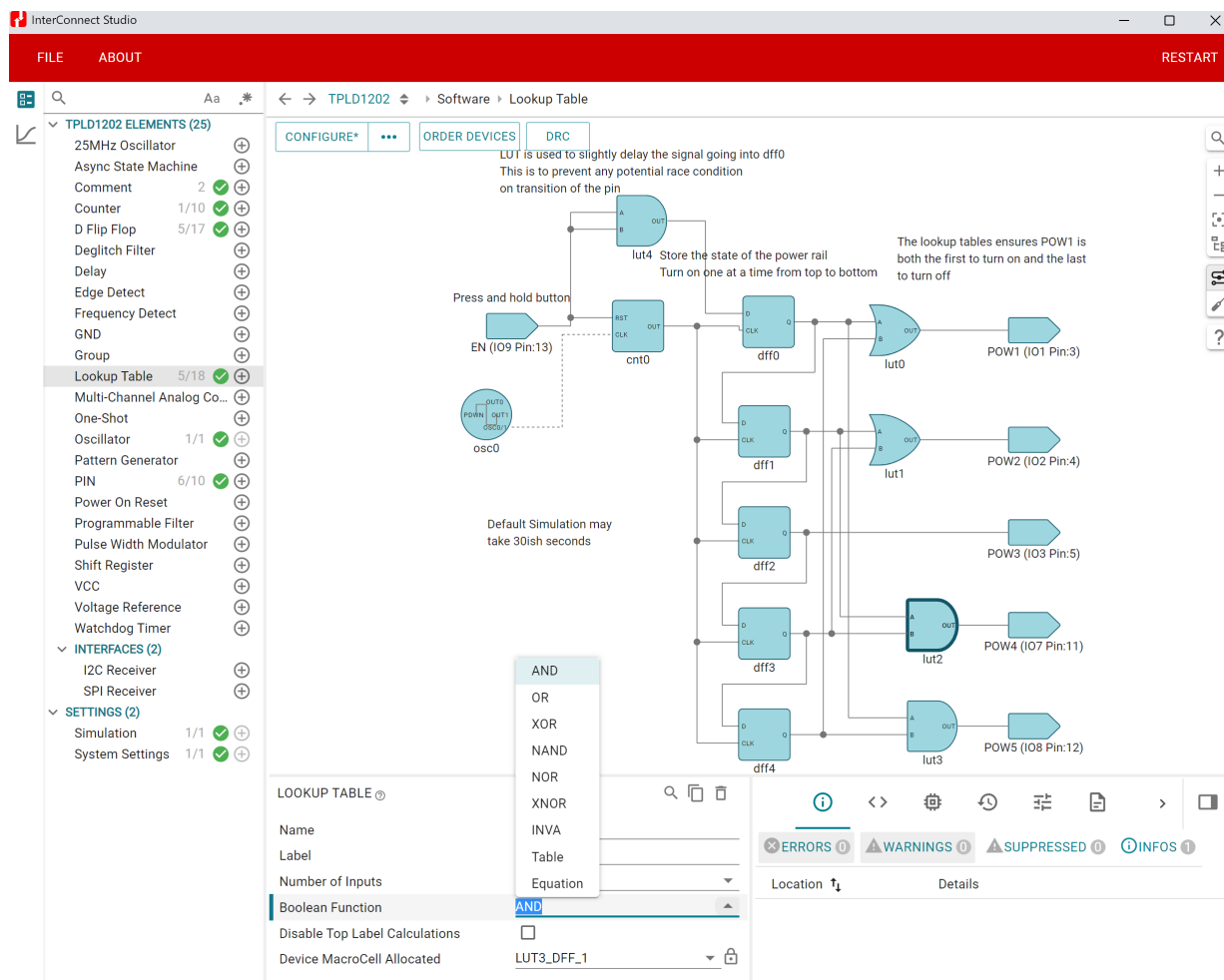


图 3-2. TPLD InterConnect Studio

在 InterConnect Studio 中，选择器件型号和相关封装后，用户可以开始设计和仿真电路。以下是通过参考演示实现电源序列的示例。左侧的所有块都可以添加至右侧区域。每个块的数量都是有限的。如果存在红色警告，请选择较高端的 TPLD。对于所选的 LUT，可以根据开发人员要求设置成具有九种使用方式。使用表和公式优化逻辑电路，以节省资源。

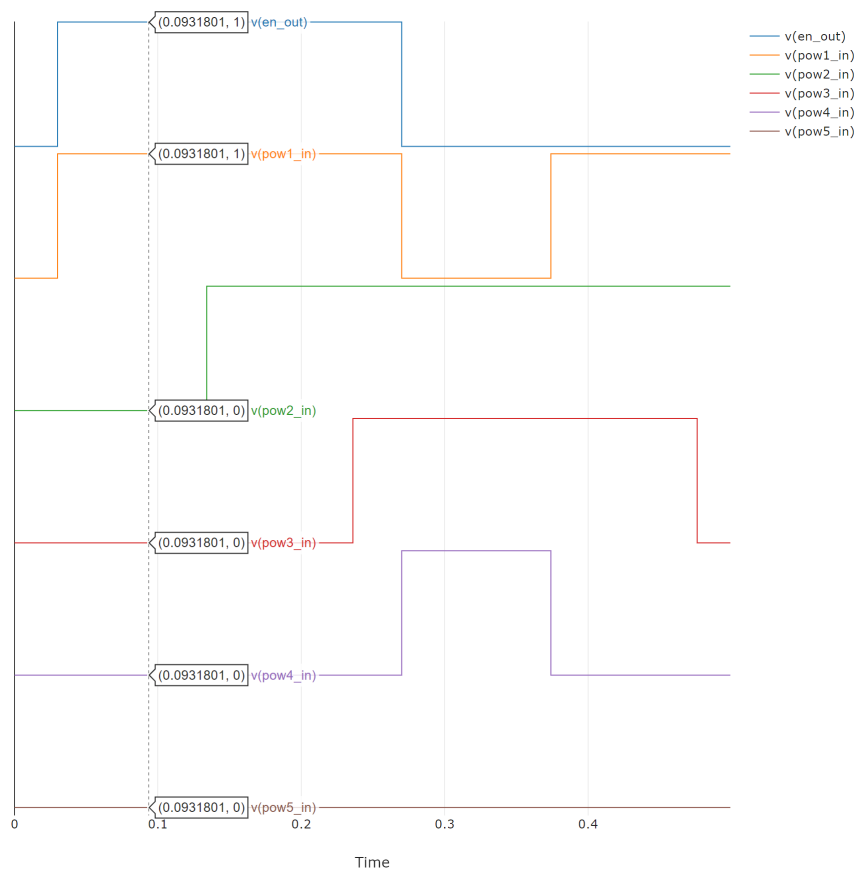


图 3-3. TPLD 仿真波形

仿真提供及时的设计检查。通过设计、仿真和重新设计，用户可以逐渐实现最佳定制 TPLD。按下 CONFIGURE* 按钮，如果需要永久配置，请三思后再行动。

4 TPLD 电路的系统示例

为了实现图 4-1 中所述的可配置保护和特定关断序列，TPLD2001-Q1 提供了灵活的内部逻辑矩阵。工程师无需添加外部硬件元件，即可配置复杂的时序、互锁逻辑和信号延迟。

图 4-1 展示了在车载充电器 (OBC) 系统中使用 TPLD2001-Q1 的示例设计和架构的系统级连接。

- 正常运行：在标准工作条件下，MCU 生成的 PWM 信号 (PWM_IN) 直接通过 TPLD2001-Q1 (直通模式) 传递到四个独立的栅极驱动器单元：GDU1 (驱动 G11、G12)、GDU2 (驱动 G21、G22)、GDU3 (驱动 G31、G32) 和 GDU4 (驱动 G41、G42)。
- 故障保护和关断逻辑：如果发生 MCU 故障或系统级故障，TPLD2001-Q1 将用作基于硬件的安全机制。在接收到故障触发 (例如来自外部电路的数字故障信号 (FLT) 或通过 VAC_SNS 输入的异常交流电压条件) 后，TPLD2001-Q1 会覆盖 MCU 控制。
- 灵活监控及可配置操作：VAC_SNS 引脚允许通过 TPLD 的内部模拟比较器或通过解读外部交流电压检测信号来进行系统监控。触发保护事件后，TPLD2001-Q1 会执行一个用户可配置的预编程关断序列，以安全地关断所有栅极驱动器，从而防止热损坏或功率级损坏。

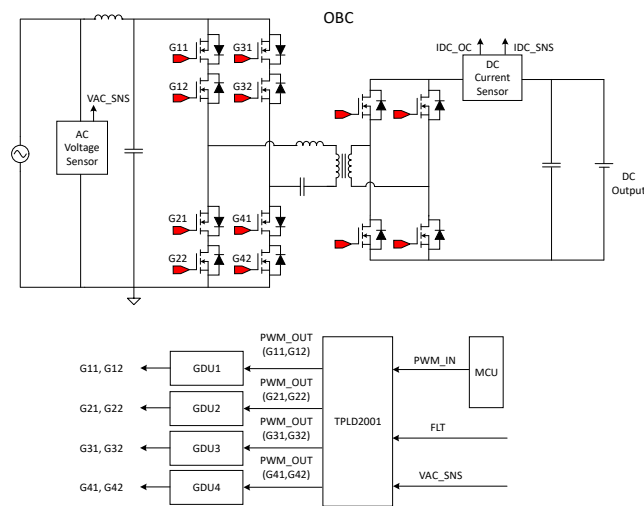


图 4-1. TPLD2001-Q1 系统方框图

通过在 TPLD2001-Q1 内对这些功能块进行全面编程，整个保护和驱动计时电路被整合到一个高度集成的 IC 中。这显著降低了物料清单 (BOM) 总成本，简化了 PCB 布局复杂性并提高了整体系统可靠性。

5 总结

本应用手册介绍了一种基于 TPLD 的保护实现方案，适用于车载充电器 (OBC) 或其他需要时序保护的应用。TPLD2001-Q1 作为基于硬件的安全机制来监控系统状态并在故障条件下安全地覆盖 PWM，以执行可编程的 PWM 关断序列。使用 TPLD2001-Q1 替代大型分立式逻辑门可显著降低物料清单 (BOM) 成本，更大幅度地减小 PCB 尺寸，简化布局复杂性并提高整体系统可靠性。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[TPLD2001-Q1 可编程逻辑器件数据表](#)，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[面向车载充电器中的功能安全：设计方法和元件概述](#)，应用手册。

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