

## Design Guide: TIDA-010936

## 适用于电机集成式驱动器的 48V、850W 小型三相 GaN 逆变器参考设计



## 说明

此参考设计展示了采用三个 LMG2100R044 100V、35A GaN 半桥 (具有集成式 GaN FET、驱动器和自举二极管) 的高功率密度 12V 至 60V 三相功率级, 专门用于电机集成式伺服驱动器和机器人应用。该设计通过 INA241A 电流检测放大器实现精确的相电流检测, 还可测量直流链路电压和相电压, 从而能够验证 InstaSPIN-FOC™ 等高级无传感器设计。该设计提供与 TI BoosterPack™ 兼容的 3.3V I/O 接口, 用于连接到 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件或 C2000™ 微控制器, 以便快速轻松地评估 TI GaN 技术的表现。

## 资源

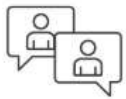
<a href="#">TIDA-010936</a>	设计文件夹
<a href="#">LMG2100、INA241A</a>	产品文件夹
<a href="#">INA310A、REF3333、LMR38010</a>	产品文件夹
<a href="#">TPSM82821、TXU0304</a>	产品文件夹
<a href="#">TMP61、LAUNCHXL-F28P65X</a>	产品文件夹

## 特性

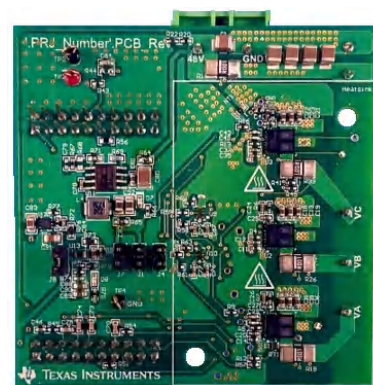
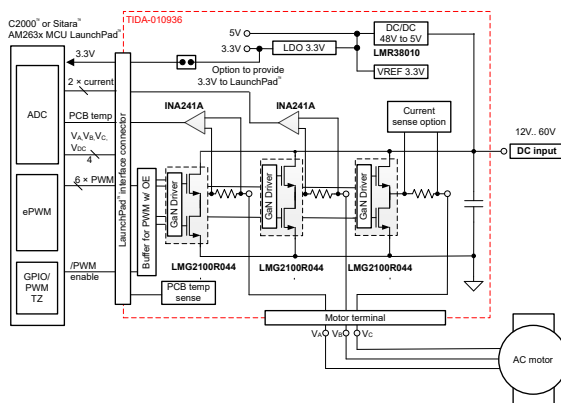
- 外形小巧的 LMG2100R044 GaN 半桥功率级可实现高功率密度和简单的 PCB 布局
- 在 40kHz PWM 下具有高效率 (峰值 99.3%), 可在 25°C 环境温度下运行, 提供高达 16A<sub>RMS</sub> 的连续电流, 无需散热器
- LMG2100R044 支持以更高的 PWM 频率运行, 有助于通过用陶瓷电容器替代电解电容器来减小直流总线电容器的尺寸和高度
- 零反向恢复损耗可减少开关节点振荡
- 较短的死区时间 (16.6ns) 可更大限度减少相电压失真
- 使用 1mΩ 分流器和具有高 PWM 抑制能力的 INA241A 放大器在 ±33A 范围内实现精密的相电流检测

## 应用

- 机器人伺服驱动器
- 伺服驱动器功率级模块
- 线性电机功率级
- 移动机器人电机控制
- 无人机配件



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



## 1 系统说明

功率范围为 1.5kW 的低压 12V 至 60V 直流馈电三相逆变器可用于许多应用，例如协作机器人、自动移动机器人、自动导航车 (AGV)、伺服和非军用无人机。

在其中的许多应用中，电力电子器件集成了电机，因此外形小巧。在构建尺寸更小、重量更轻且无散热器的协作机器人时，高电源效率和功率密度是关键参数。

高达 100kHz 的较高脉宽调制 (PWM) 开关频率有助于减少直流总线电容器数量；因此，可以通过使用陶瓷电容器代替电解电容器来减小尺寸和高度。此外，需要提高 PWM 开关频率来减小电流，进而降低电机的扭矩纹波，特别是在使用低电感无刷交流电机来实现更精确的控制时。

相反，逆变器损耗随开关频率提高而增大。对于传统的低压 48V 硅场效应晶体管 (Si-FET) 逆变器，40kHz PWM 下的开关损耗可能已经大大高于传导损耗，因此在总体功率损耗中占主导地位。为了耗散掉过多的热量，需要更大的散热器。但是，该散热器会增加系统成本、重量和空间。

这一问题的解决方案是使用 GaN FET，其与 Si-FET 相比具有多项优势。氮化镓 (GaN) 晶体管的开关速度可能比硅 MOSFET 快得多，因此可以实现更低的开关损耗。但是，在高压摆率下，某些封装类型会限制 GaN FET 的开关性能。将 GaN FET 和驱动器集成在同一封装内可以减少寄生电感并优化开关性能。

TIDA-010936 参考设计采用一个小型三相逆变器，而这个逆变器包含三个 100V、35A 半桥 GaN 电源模块 (LMG2100R044)。LMG2100R044 在 5.5mm × 4.5mm 的小型 QFN 封装内集成了驱动器和两个 80V GaN FET，并经优化具有极低的栅极环路阻抗和电源环路阻抗。PCB 为顶面冷却式 LMG2100R040 GaN-FET 电源模块及可选散热器提供了安装孔。集成的自举二极管有助于进一步减小高侧 GaN-FET 辅助电源的空间。

对于高线性度的精密和小尺寸相电流测量，该参考设计采用了低阻抗 1mΩ 相电流分流器和差分精密电流检测放大器 INA241。凭借 INA241 集成的 PWM 抑制功能，该参考设计具有高共模瞬态抗扰度和高交流共模瞬态抗扰度。测量范围为 ±33A，并会转换为 0V 至 3.3V 的单极输出电压，在偏置电压为 1.65V 时实现零电流。

该三相 GaN 逆变器使用高侧直流链路分流器和具有可配置过流阈值的高共模窗口比较器来提供基于硬件的短路保护，从而关闭 PWM 缓冲器。其他反馈包括直流总线电压以及经过 PWM 滤波的三相电压，支持对 InstaSPIN-FOC 等高级无传感器设计进行验证。

该三相逆变器可在 12V 至 60V 的宽输入电压范围内工作，并提供板载电源管理功能，可为 LMG2100 栅极驱动器和 3.3V 带隙基准提供 5V 电源轨，为 INA241 电流检测放大器和温度开关提供 3.3V 电源轨。

TIDA-010936 提供与 TI BoosterPack 兼容的 3.3V I/O 接口，用于连接到 C2000 MCU LaunchPad 开发套件，以便快速轻松评估性能。

## 1.1 主要系统规格

表 1-1 提供了 TIDA-010936 小型三相 GaN 逆变器参考设计的主要规格。该设计可直接连接到 C2000 MCU LaunchPad 开发 40 引脚实例 ( J1 - J3 和 J4 - J2 )。TIDA-010936 上有一个零欧姆电阻选项可为 LaunchPad 提供 3.3V 电源。表 1-2 和表 1-3 介绍了 TIDA-010936 引脚分配情况。

**表 1-1. 三相逆变器主要规格**

参数	典型值	注释
直流输入电压	48V (12V - 60V)	绝对最大值为 80V
最大三相持续输出电流	16A <sub>RMS</sub>	测试条件：在 25°C 环境温度下无散热器
最大输出功率	48VDC 时为 825W	功率因数为 0.9
功率 FET 类型	GaN 技术	具有集成高侧和低侧栅极驱动器的半桥电源模块 (LMG2100)
PWM 开关频率 (经测试)	20kHz 至 80kHz	支持高于 80kHz 的 PWM 频率
PWM 死区	16.66ns	-
相电流检测   放大器	1mΩ 分流器   INA241A	具有 50V/V 增益和增强型 PWM 抑制功能的差分非隔离式电流检测放大器 (INA241A)
相电流最大范围	±33A	调节至 0V 至 3.3V, 1.65V 偏置电压
PCB 层堆叠	4 层, 2 盎司铜	
GaN-FET PCB 面积大小	16mm × 51mm	三相 GaN + 分流器
PCB 大小	68.63mm × 70mm	以 mil 为单位的尺寸：2702mil × 2756mil
温度范围	-40°C 至 85°C	
用于连接主机处理器的接口	与 TI BoosterPack 兼容	参阅表 1-2 和表 1-3 中的引脚分配信息
适用于 LaunchPad 的 3.3V 或 5V 电源选项	总计 600mA (最大值)	通过 0Ω 电阻启用

**表 1-2. 接口规范接头 J2**

引脚	信号	I/O (3.3V)	引脚	信号	I/O (3.3V)
J2-1	3.3V 电源 (可选)	O 或 N/C (R48 未组装)	J2-2	5V 电源 (可选)	O 或 N/C (R47 未组装)
J-23	NC		J2-4	GND	GND
J2-5	NC		J2-6	VDC_Bus	O (0-3.3V) <sup>(1)</sup>
J2-7	NC		J2-8	VA	O (0-3.3V) <sup>(1)</sup>
J2-9	NC		J2-10	VB	O (0-3.3V) <sup>(1)</sup>
J2-11	NC		J2-12	VC	O (0-3.3V) <sup>(1)</sup>
J2-13	NC		J2-14	IA	O (0-3.3V)
J2-15	NC		J2-16	IB	O (0-3.3V)
J2-17	NC		J2-18	温度	O (0-3.3V)
J2-19	NC		J2-20	NC	

(1) 采用肖特基二极管的过压保护可提供始终低于 3.6V 的输出电压

表 1-3. 接口规范接头 J3

引脚	信号	I/O (3.3V)	引脚	信号	I/O (3.3V)
J3-1	PWM A (高侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-2	GND	GND
J3-3	PWM A (低侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-4	NC	
J3-5	PWM B (高侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-6	NC	
J3-7	PWM B (低侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-8	NC	
	PWM C (高侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-10	OC	O
J3-11	PWM C (低侧)	I (缓冲器中的 10k PD)	J3-12	NC	
J3-13	NC		J3-14	NC	
J3-15	NC		J3-16	NC	
J3-17	NC		J3-18	NC	
J3-19	NC		J3-20	NC	

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

图 2-1 展示了 TIDA-010936 三相 GaN 逆变器的系统方框图 (以红色虚线框标示)。

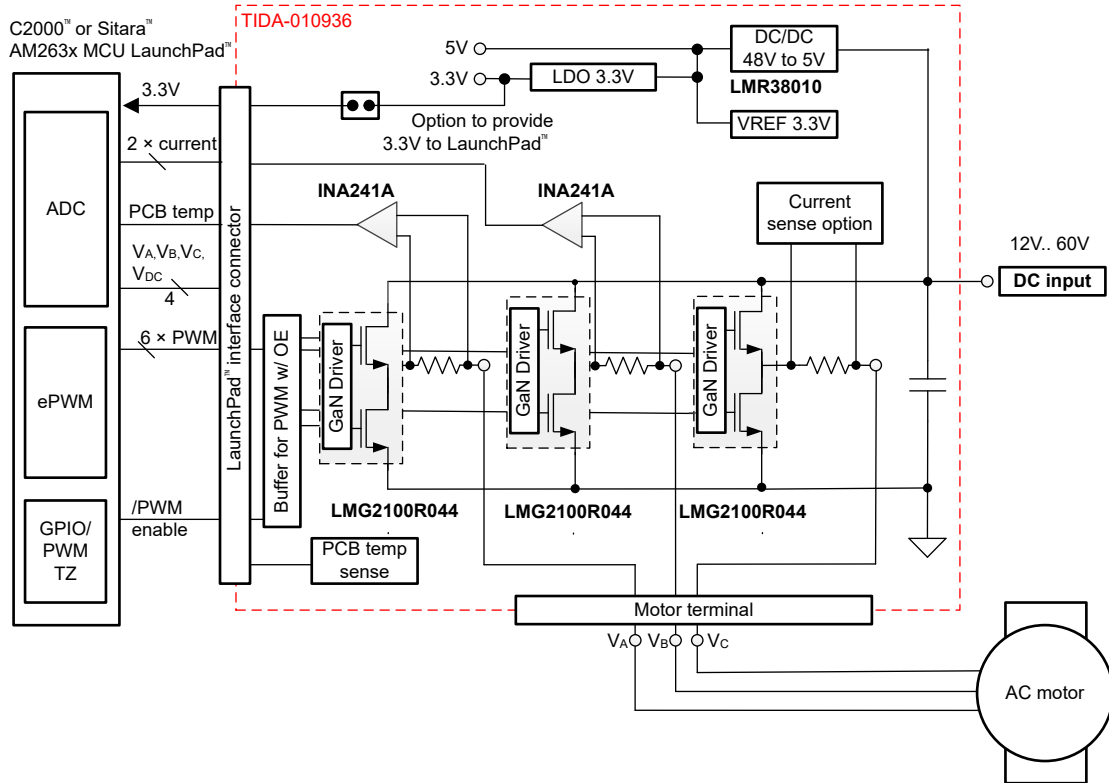


图 2-1. TIDA-010936 方框图

### 2.2 设计注意事项

设计目标是实现一个能够在 12V 至 60V 直流输入电压 (额定电压为 48V) 下运行的三相 GaN 逆变器参考设计。具有宽输入电压范围的直流/直流转换器 LMR38010 生成 5V 电源轨来为 GaN-FET 电源模块和 3.3V 带隙基准供电, 3.3V 电源模块为电流检测放大器、输入缓冲器和可选的 C2000 MCU LaunchPad 开发套件供电。

三个逆变器半桥均采用集成的 80V、10A GaN 半桥模块 (LMG2100R044) 来实现小尺寸和高效率。

1mΩ 相电流分流器和差分电流检测放大器 (INA241A) (增益为 50V/V, 中点电压为 1.65V) 由 3.3V 基准 (VREF3333) 进行设置, 支持 ±33A 的满量程电流范围。热敏电阻 (TP61) 用于监测靠近 GaN 电源模块的 PCB 温度。

高侧直流链路电流检测比较器可实现基于硬件的短路保护, 此外还会测量直流链路电压和相电压, 并允许验证 InstaSPIN-FOC™ 等高级无传感器设计。

该设计提供与 TI BoosterPack 兼容的 3.3V I/O 接口, 用于连接到 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件或 Sitara™ 微控制器, 以便快速轻松地评估我们 GaN 技术的表现。

## 2.3 主要产品

### 2.3.1 LMG2100

LMG2100 100V GaN 半桥功率级采用增强模式氮化镓 (GaN) FET 提供一种集成式功率级设计。该器件包含两个 GaN FET，它们由采用半桥配置的另一高频 GaN FET 驱动器驱动，如图 2-2 所示。表 2-1 总结了此设计的主要特性。

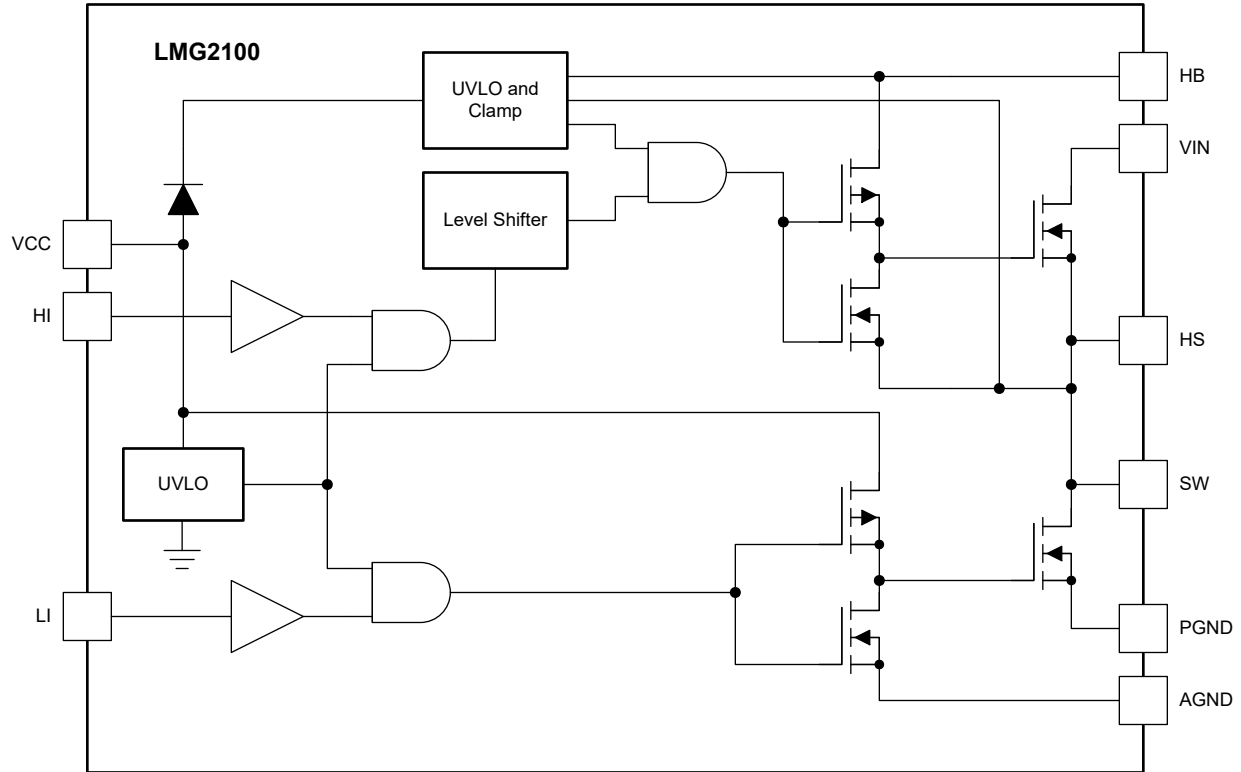


图 2-2. LMG2100 功能方框图

表 2-1. LMG2100 的特性与优势

特性	优势
集成高侧和低侧 GaN 驱动器和 80V GaN FET、4.4mΩ 器件可支持 35A 直流工作电流。	支持高达 60V <sub>DC</sub> 的三相逆变器，在 80kHz 高开关频率下具有 16A <sub>RMS</sub> 相电流，适用于低电感和高速驱动器。
集成 80V、4.4mΩ、GaN FET 和 GaN 驱动器采用完全无键合线封装。	最小化封装寄生元件可实现超快速开关，从而降低开关损耗，减少或消除散热器。
GaN FET 具有零反向恢复特性（第三象限运行模式）和极小的输入电容 C <sub>iss</sub> 。	减少或消除硬开关中的振铃，例如在逆变器中减少 EMI。极低的过冲和下冲意味着在相同的最大额定电压下具有比 Si-FET 更高的额定直流链路电压。
出色的传播延迟匹配 (2ns FET)。	每个半桥均可实现超低死区，从而大幅降低三相逆变器应用中的开关损耗并消除相电压中的死区时间失真。
独立的高侧和低侧晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 输入。	通过 PWM 接口直接连接到 3.3V MCU。
单个 5V 栅极驱动器电源具有自举电压钳位和欠压锁定功能。	轻松进行电源管理。UVLO 可在栅极驱动器欠压的情况下同时关断高侧和低侧 GaN FET。
LMG2100 具有优化的引脚排列。	使用最小电感简化 PCB 布局，从而降低开关损耗。
顶面有两个外露 GaN 裸片 (SW 和 PGND)。底面有大型 PGND 焊盘。	降低顶面热阻。 接受双面冷却。

### 2.3.2 INA241A

INA241A 是一款超精密双向电流检测放大器，可在 -5V 至 110V 的宽共模电压范围内测量分流电阻上的压降，不受电源电压的影响。

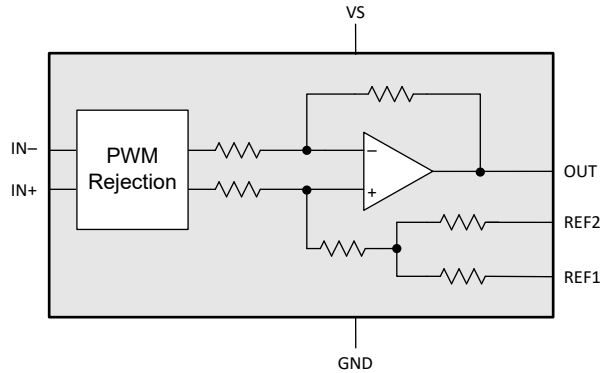


图 2-3. INA241A 功能方框图

表 2-2. INA241A 的特性与优势

特性	优势
快速瞬态共模电压输入滤波（增强型 PWM 抑制）和高交流共模抑制比（CMRR）：100kHz 时为 104dB，直流 CMRR 为 166dB	在 40kHz 及以上的高开关频率下通过三相逆变器实现基于分流器的非隔离式精密相电流测量。
宽共模输入电压范围：-5V 至 110V	为具有 48V 至 80V 直流链路电压的三相逆变器中的瞬态过压和欠压提供足够的余量。
低失调电压 ( $V_{OS} = \pm 10\mu V$ ) 和低增益误差 (0.01%)	低失调电压和低增益误差意味着无需校准即可实现精确的电流检测。
低失调电压漂移 ( $0.25\mu V/^{\circ}C$ ) 和低增益误差漂移 ( $1ppm/^{\circ}C$ )	超低失调电压漂移和增益误差漂移意味着无需进行依赖于温度的校准即可在整个温度范围内进行高精度电流检测。
1.1MHz 信号带宽	高信号带宽支持高速电机的低延迟相电流测量以及高电流瞬态的低延迟检测（例如在短路事件期间）。
集成式输出 $1/2 V_s$ 基准分压器	允许使用外部 ADC 基准将 INA241 中点电压设置为 ADC 基准电压的一半。这样可以消除 ADC 基准电压漂移产生的任何失调电压。

### 2.3.3 LMR38010

LMR38010 同步降压转换器用于在宽输入电压范围内进行调节，从而更大幅度地减少对外部浪涌抑制元件的需求。

表 2-3. LMR38010 的特性与优势

特性	优势
4.2V 至 80V 输入电压	宽输入电压范围，适用于 12V、24V、48V 或 60V 直流馈电驱动器
逐周期电流限制、断续模式短路保护和热关断	内置保护
提供扩展频谱选项	轻松降低 EMI
-40°C 至 150°C $T_J$ 最大值	宽温度运行范围
HSOIC-8 易用型封装	符合引脚间距要求

### 3 系统设计原理

#### 3.1 三相 GaN 逆变器功率级

48V 直流输入额定电压由六个 10F 陶瓷电容器进行缓冲以获得总计 60  $\mu$ F 的直流总线电容。通过一个串联添加的 1m $\Omega$  3W 分流电阻可选择使用高共模输入电压比较器 INA310A 来监测直流总线电流，从而实现过流保护。PCB 采用两个单独的接地平面：电源地 (PGND) 和逻辑或模拟地 (GND)。两个接地平面都通过网带和两个可选 0  $\Omega$  电阻以星型配置进行连接，旨在更大限度减少电源接地平面中的高开关频率电流流入逻辑平面的串扰。

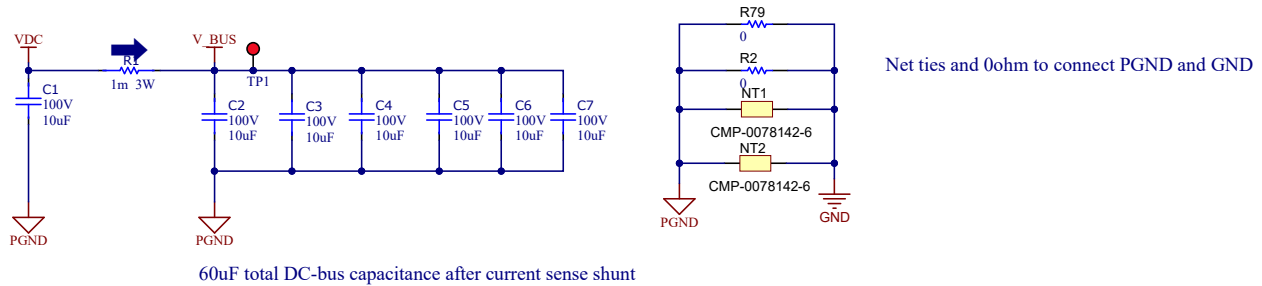


图 3-1. 直流总线去耦和 GND 方案

#### 3.1.1 LMG2100 GaN 半桥功率级

LMG2100 100V GaN 半桥功率级采用增强模式氮化镓 (GaN) FET 提供一种易于使用的集成式功率级设计。该器件包含两个 GaN FET，它们由采用半桥配置的同一高频 GaN FET 驱动器驱动。由于高集成度以及仅需要少量额外的无源元件，PCB 空间进一步减小。图 3-2 显示了一个半桥的原理图。

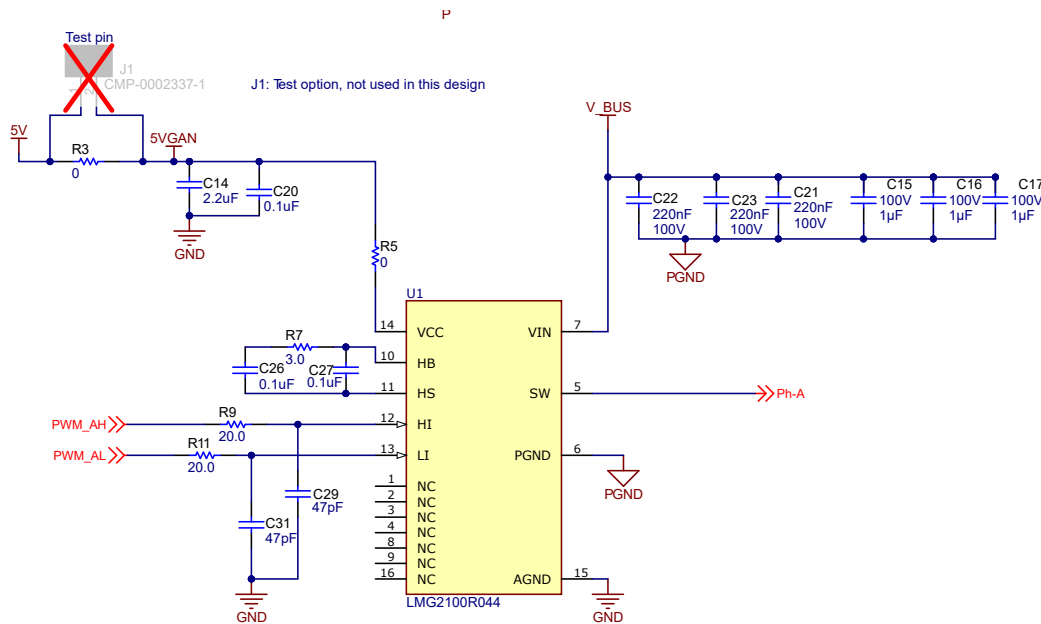


图 3-2. A 相的半桥功率级原理图

48V 直流链路电压连接到 LMG2100 VIN 引脚并以电源地 (PGND) 引脚为基准。为更大限度降低环路电感，本地陶瓷旁路电容器 C21、C22、C23 (100nF) 和 C15、C16、C17 (1  $\mu$ F) 并联放置在 VIN 和 PGND 引脚之间。

LMG2100 集成栅极驱动器的电源电压为 5V。按照数据表中的建议，2.2  $\mu$ F 和 0.1  $\mu$ F 陶瓷旁路电容器 (C14、C20) 靠近 VCC 引脚和 AGND 引脚放置。

在输入直流电压上电和断电期间，VCC 处的 5V 和 VIN 处的 48V 都不需要时序控制。



100nF 陶瓷自举电容器 C26 和 C27 靠近 HB (高侧栅极驱动器自举电源轨) 和 HS (高侧 GaN-FET 源极连接) 引脚放置。R5 和 R7 用于配置开关节点上升沿的压摆率和相关开通时间。VCC 路径中的 R5 可限制低侧 GaN-FET 的导通压摆率, 而自举路径中的 R7 适用于高侧 GaN-FET。针对 R5 和 R7, 本设计使用的是 3Ω 电阻进行测试。

来自 PWM 缓冲器的高侧和低侧开关互补 PWM 信号通过 R9、C29 和 R11、C31 进行低通滤波, 以便抑制高频脉冲噪声, 并通过大约 160MHz 的截止频率和大约 1ns 的传播时间避免误开关。SW (开关节点) 引脚通过串联的内嵌式分流器连接到电机 A 相端子以进行相电流检测; 其他 LMG2100R044 半桥分别连接到 B 相和 C 相端子。

### 3.2 使用 INA241A 的内嵌式分流器精密相电流检测

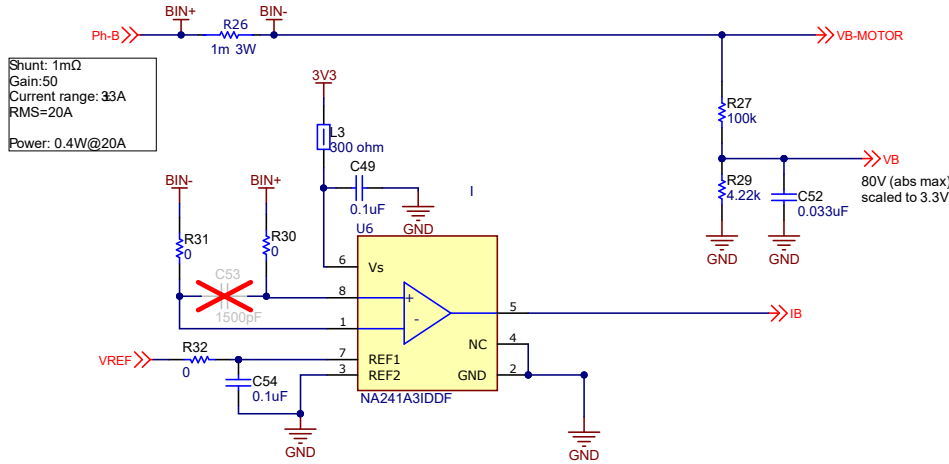


图 3-3. B 相内嵌式相电流检测原理图

A 相和 B 相的相电流通过 1mΩ 分流器 (例如 B 相的 R26) 进行内嵌式测量, 如图 3-3 所示。R26 直接连接到 LMG2100 器件的开关节点输出 (SW 引脚)。该分流器通过开尔文连接和可选的差分 RC 低通滤波器 (R30、R31 和 C53) 连接到 INA241A3 器件的差分输入 IN+ 和 IN-。本设计不需要低通滤波器, 选择了两个 0Ω 串联电阻, 并且在所有三个相位上均未组装电容器 C53。INA241A3 器件具有 50V/V 的固定增益。为了将分流器上的双极输入电压转换为单极输出电压 (适用于输入电压范围为 3.3V 的 ADC), INA241A3 (U6) 的中压设置为 1.65V。为了实现此转换, 精密的低漂移 3.3V 基准 REF3333 通过可选的 RC 低通滤波器 (R32 和 C54) 连接到 REF1 引脚。REF2 引脚连接到 GND。本设计的默认设置未使用低通滤波器, R32 设置为 0Ω, 与 A 相的设置相同。INA241 器件中的内部精密“除以 2”功能可在 INA241 输出引脚上产生超低漂移的精密 1.65V 偏置电压。传递函数可以按照方程式 1 进行计算。

$$I_A[V] = (I_A[A] \times 1m\Omega) \times 50 \left[ \frac{V}{V} \right] + 1.65V \quad (1)$$

最大相电流范围为 ±33A。相应的输出电压范围为 0V 至 3.3V, 1.65V 代表 0A 相电流。

### 3.3 相电压和直流输入电压检测



图 3-4. A 相电压检测电路

每个相位的相电压和等于输入电压的直流链路电压通过电阻分压器进行检测。图 3-4 显示了与此相关的示例, 此示例用于检测直流链路电压 (通过 R19、R21), 其中使用低通滤波器 (C44) 来衰减 PWM 载波频率。假设绝对最大电压为 80V, 根据方程式 2, 相电压调节为 3.3V。

$$V_A[V] = V_{A\_MOTOR} \times \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{19}} = V_{A\_MOTOR} \times \frac{1}{24.7} \quad (2)$$

低通滤波器的截止频率 ( $f - 3\text{dB}$ ) 设置为 1kHz, 此频率可提供大约 32dB 的衰减来抑制 40kHz PWM 载波频率, 并提供大约 40dB 的衰减来抑制 100kHz PWM 载波频率。直流链路电压通过同一电阻分压器进行检测 (请参阅图 3-4), 并经过低通滤波处理以确保所有电压具有相同的瞬态响应和延迟。

### 3.4 功率级 PCB 温度监测

为了检测 PCB 功率级的温度, 此设计选择 TMP61 系列热敏电阻, 因为这些器件采用 0402 和 0603 封装选项, 能够在 0°C 至 +70°C 温度范围内提供  $\pm 1\%$  的精度。TMP6131 器件靠近 LMG2100 半桥模块放置。根据设计工具, 选择一个 10k $\Omega$  电阻作为上拉电阻。TMP6131 的模拟输出信号通过 R57 (20 $\Omega$ ) 和 C68 (2.2nF) 进行低通滤波, 并路由到连接器 J1-18 以进入 C2000 MCU 集成式 ADC。该信号可通过 C2000 MCU 用于实时 PCB 温度检测和过热保护。

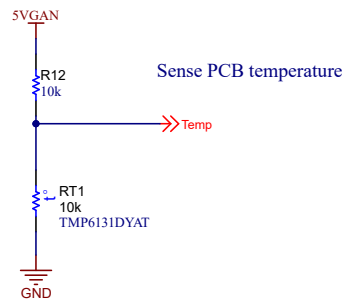


图 3-5. 通过热敏电阻进行 PCB 温度检测

### 3.5 电源管理

图 3-6 展示了电源树。一个宽输入电压直流/直流降压转换器会生成 5V 电源轨。然后, 一个电源模块从 5V 电压生成 3.3V 电压以提供 3.3V 信号链 (如 INA241A 等)。此外, 3.3V 电源轨也可以为 MCU LaunchPad 供电。

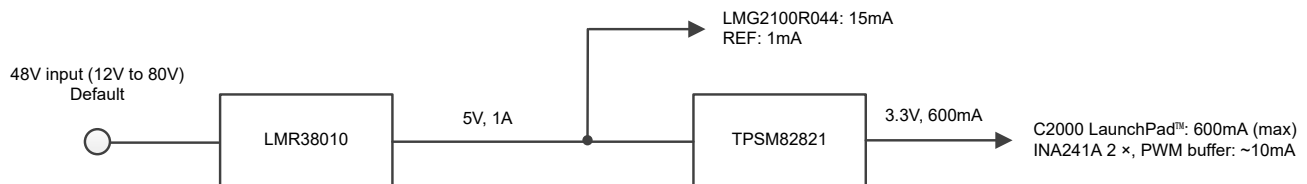


图 3-6. 电源树

#### 3.5.1 48V 至 5V 直流/直流转换器

该直流/直流降压转换器专为 12V 至 60V 的输入电压范围而设计, 具有至少 80V 的输入电压能力。输出电压设置为 5V。直流/直流降压转换器反馈电路旨在实现最小的输出电压纹波和至少 1A 的输出电流。

电源完全是使用 WEBENCH® 电路设计和选择仿真服务设计的, 使用以下参数规格:

表 3-1. 参数规格

参数	典型值	最小值、最大值
直流链路电压	48V	10V、80V
输出电压	5V	$\pm 5\%$
输出电压纹波	< 50mV <sub>pp</sub>	尽可能低
输出电流	500mA	1A
温度范围	-40°C 至 85°C (125°C)	

基于这些参数，选择了 LMR38010 器件来满足设计规格。图 3-7 显示了 WEBENCH 建议。

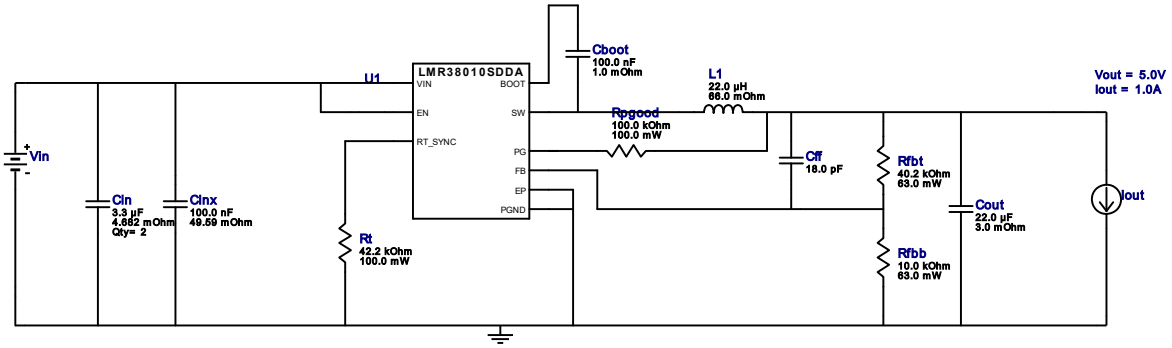


图 3-7. LMR38010 WEBENCH 仿真电路

为了尽可能减小尺寸，开关频率设置为 617kHz ( $R_t = 42.2\text{kHz}$ )，因此仅需  $22\ \mu\text{H}$  电感器。图 3-8 中显示了 43.5V 输入的电压纹波。当电流  $>0.1\text{A}$  时，输出纹波小于 15mV。

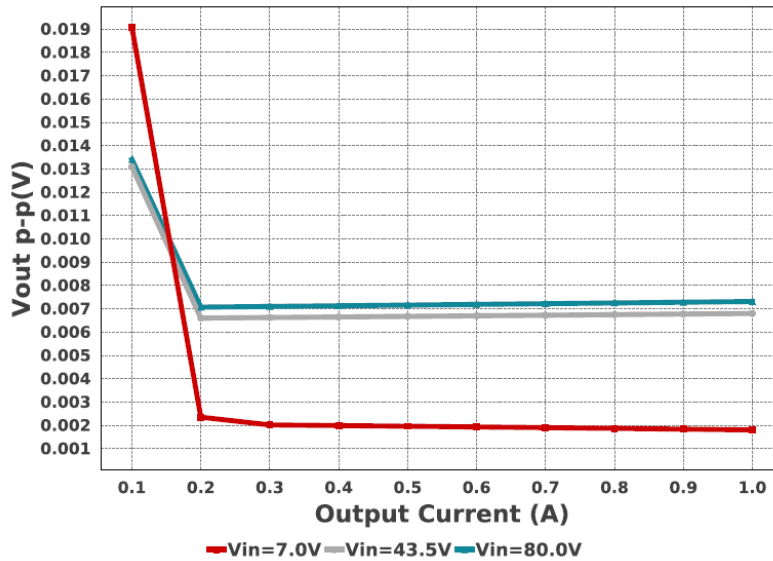


图 3-8. 5V 输出电压纹波

基于这一仿真情况，对此设计进行了一些小改动以完善最终原理图。添加一个与 R71 并联的可选电阻 R68，即可保持 LDO 5.5V 输出的灵活性，从而生成较低的 5V 纹波。5.5V 电压也可以通过 J7 从外部输入。

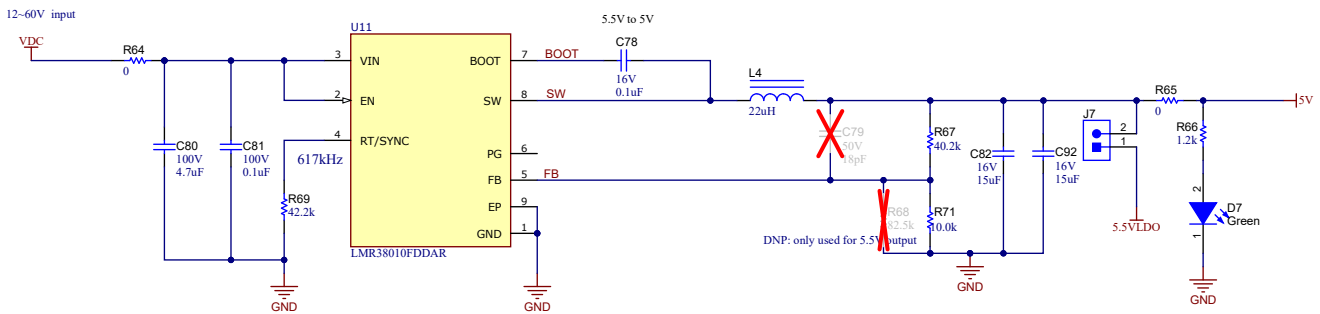


图 3-9. 48V 至 5V 直流/直流降压转换器

### 3.5.2 5V 至 3.3V 电源轨

对于 3.3V 电源轨，采用 2mm × 2.5mm 超小型封装的电源模块 TPSM82821 可满足 600mA 输出电流要求。该电源模块集成了同步降压转换器和电感器，可简化设计、减少外部元件并节省印刷电路板 (PCB) 面积。

电路板通过跳线 J8 保留了连接外部 3.3V 电源的灵活性。组装 R48 后，该电阻从 GaN 板向 C2000 MCU LaunchPad 开发套件提供 3.3V 电源轨。

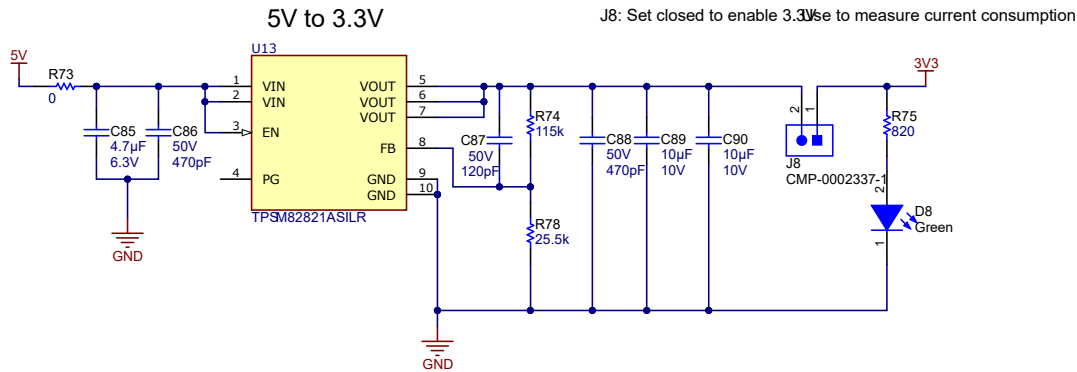


图 3-10. 5V - 3.3V 电源模块

### 3.6 用于连接主机 MCU 的接口

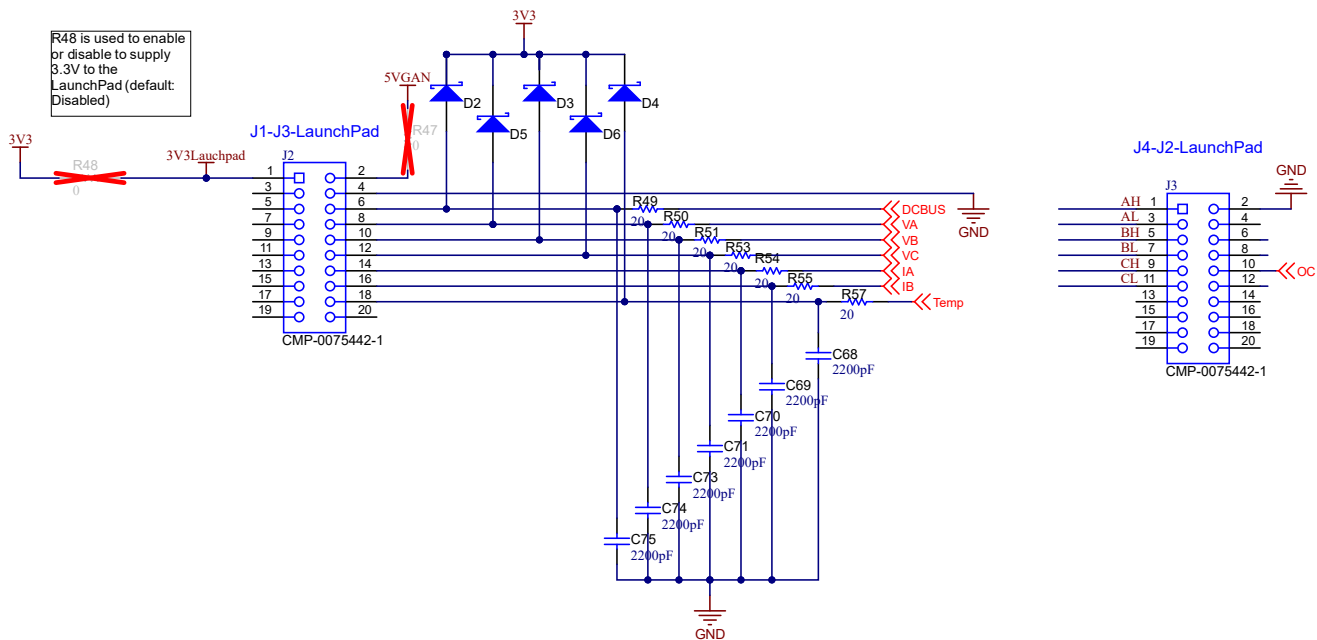


图 3-11. 主机接口连接器 J1 和 J2 的原理图

用于连接 C2000 MCU 等主机处理器的接口符合 3.3V I/O 标准，可提供所有必需信号，例如 A 相、B 相和 C 相的互补 PWM 信号；PWM 跳闸和禁用信号；以及精确的相电流、相电压和直流链路电压反馈，旨在控制三相 GaN 逆变器。模拟 PCB 温度反馈 (Temp) 有助于进一步保护三相 GaN 功率级并调整安全工作区 (SOA)。

在连接到 MCU 集成的 ADC 之前，每个模拟反馈信号都通过 RC 滤波器进行低通滤波，例如使用 R57 (20 Ω) 和 C58 (2.2nF)。2.2nF 电容器用于驱动 ADC 的开关输入电容器 (通常在 5pF 至 15pF 范围内)。肖特基二极管 D2 至 D6 在直流总线电压超过 80V (绝对最大值) 的情况下将最大相电压钳位至大约 3.6V。

TIDA-010936 仅可连接到 80 引脚 C2000 MCU LaunchPad ( 例如 LAUNCHXL-F28P65X ) 的上部接头。此外，TIDA-010936 主机接口可用于提供 3.3V 电源轨，为 C2000 LaunchPad 供电。此功能可为整个系统提供正确的上电序列。节 1.1 的表 1-2 和表 1-3 分别列出了详细的引脚分配信息。

## 4 硬件、软件、测试要求和测试结果

### 4.1 硬件要求

#### 4.1.1 TIDA-010936 PCB 概览

图 4-1 和图 4-2 显示了 PCB 顶面和底面的标注照片。

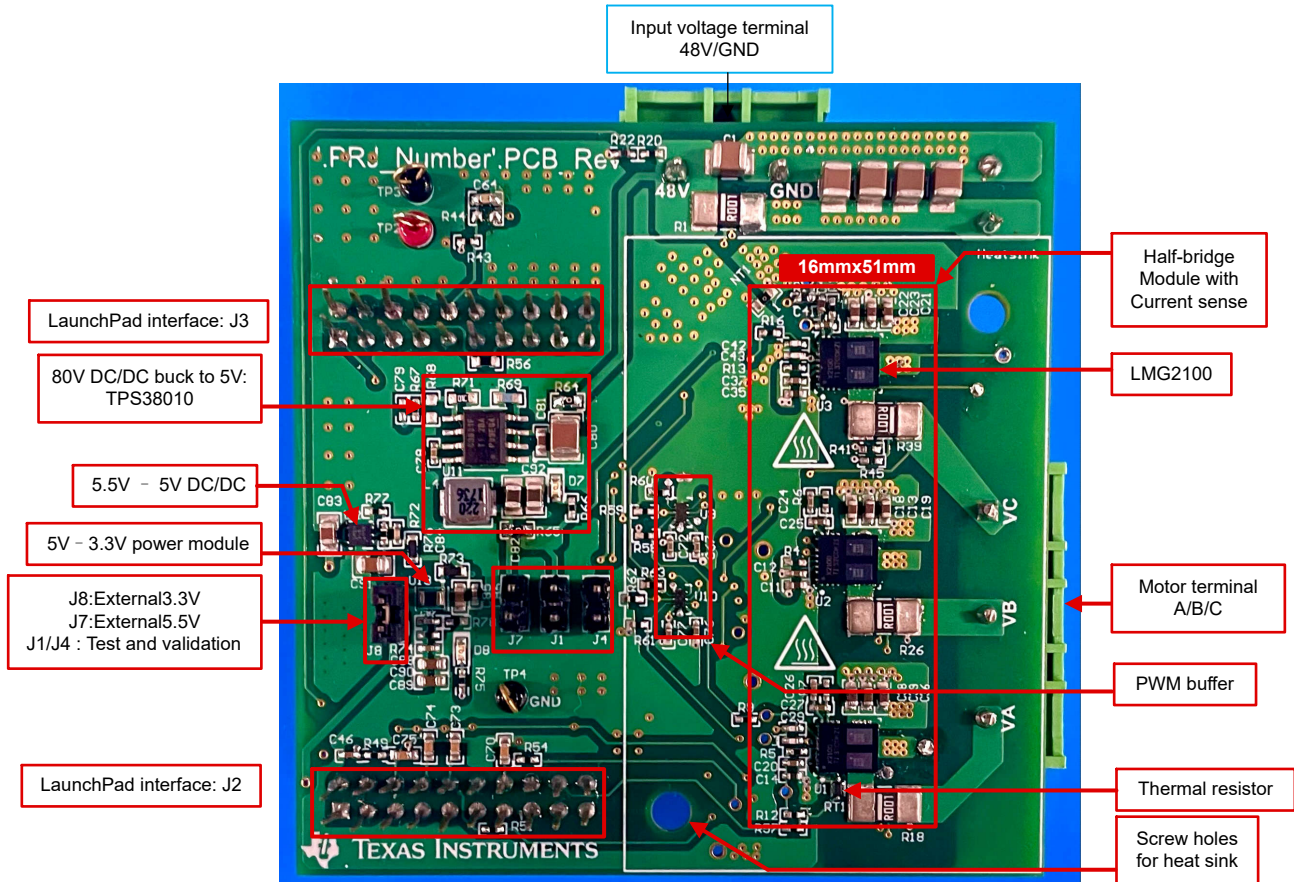


图 4-1. TIDA-010936 PCB 顶视图

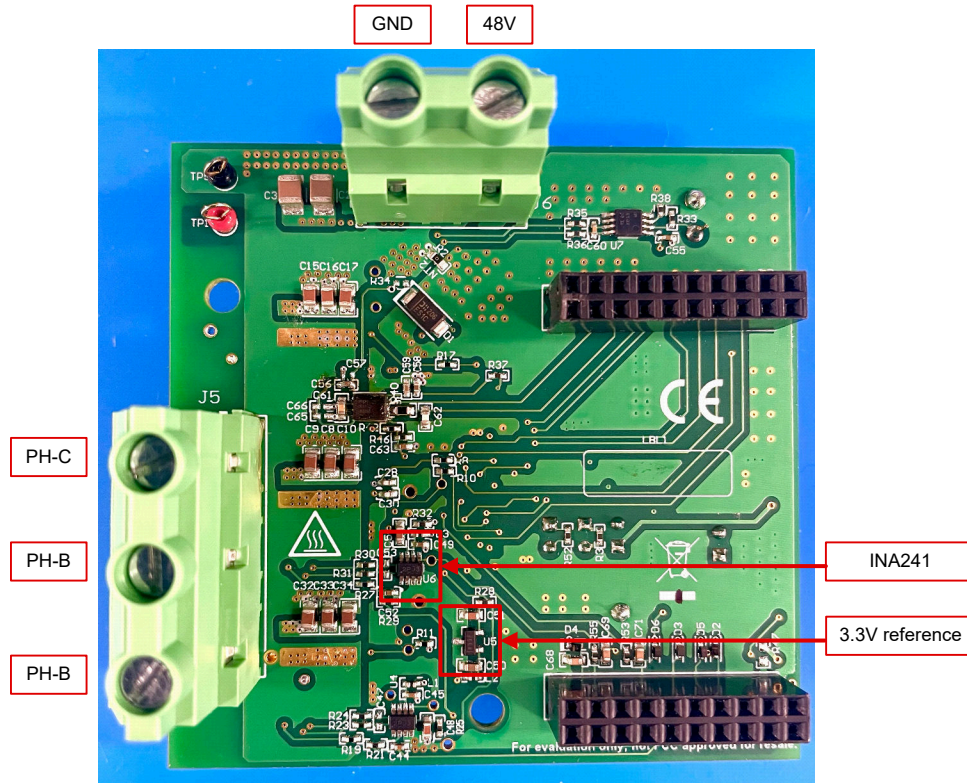


图 4-2. TIDA-010936 PCB 底视图

#### 4.1.2 TIDA-010936 跳线设置

TIDA-010936 采用四根跳线，详见表 4-1。

表 4-1. TIDA-010936 跳线设置

跳线	功能	已组装	未组装
J1、J4	测试和验证	不适用	默认值
J7	5V 电源	为 LDO 提供 5.5V 以实现 5V <sup>(1)</sup>	板载电源 (默认) <sup>(2)</sup>
J8	3.3V 电源	板载 (默认)	外部 3.3V
R48、R47	为 LaunchPad 提供 3.3V 或 5V	为 LaunchPad 供电	未组装 (默认)，LaunchPad 使用自己的 USB 电源

- (1) 如果组装了 J7，则会为 LDO (U12) 提供 5.5V，需要组装 R68 并需要移除 R65。  
 (2) 未组装 J7 (默认) 时，电路板上具有 5V 电压。如果使用外部 5.5V 连接到 LDO (U12)，请移除 R65 并组装与 U12 相关的元件。

#### 小心

不要同时组装 R48 和 R47。组装 R48 或 R47 后，确保 C2000 LaunchPad 不会通过 USB 供电。要完成此设置，请移除 F28P65X LaunchPad 上的跳线 JP1 和 J16。

#### 4.1.3 用于连接 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件的接口

TIDA-010936 接口规范符合 TI BoosterPack 插件模块标准。引脚分配如节 1.1 中的表 1-2 和表 1-3 所示。TIDA-010936 板只能连接到 C2000 LaunchPad 接头 J1 - J4。

图 4-3 显示了 TIDA-010936 已连接到 F28P65X LaunchPad 接头 J1 - J4。TIDA-010936 不为 LaunchPad 供电；因此，组装了 TIDA-010936 J8 和 LaunchPad 上的跳线 JP1 和 JP2。

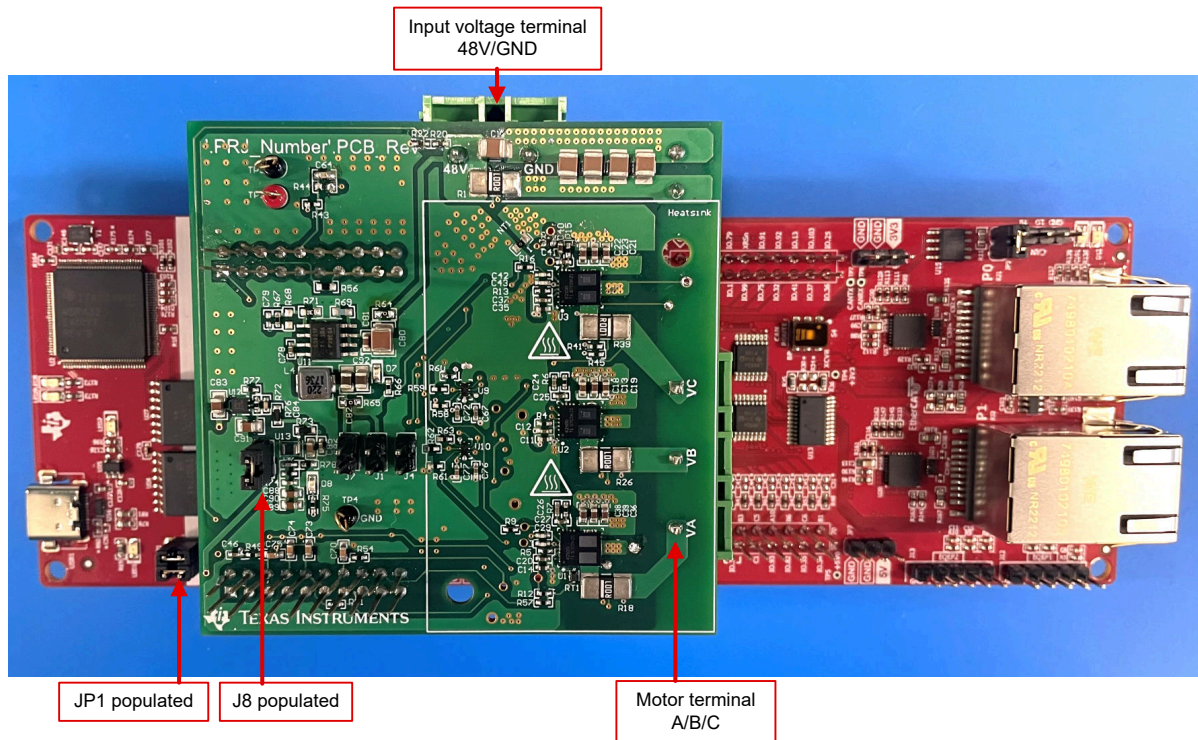


图 4-3. TIDA-010936 连接到 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件

将直流电源 (12V 至 60V, 额定电压为 48V) 连接到直流输入电压连接器 (J6), 并将三相电机连接到三相输出电压连接器 (J5)。验证三相电机可以在 PWM 开关期间处理相电压的高压摆率。

#### 4.2 软件要求

为了验证 TIDA-010936, TI 为 TMS320F28P65X 开发了内部测试软件, 并使用了相应的 LaunchPad 开发套件。该软件不可供公众使用。如需 C2000 软件支持, 请参阅适用于 C2000™ 的 MotorControl 软件开发套件 (SDK) 和适用于 C2000™ 微控制器的 TI E2E™ 设计支持论坛。

#### 4.3 测试设置

表 4-2 列出了主要测试设备。具体测试的测试设置的相关说明和图片在相应测试结果的部分中提供。

表 4-2. 主要测试设备

说明	器件型号
高速示波器	Tektronix MSO4104B
单端探头	Tektronix P6139B
功率分析仪	HIOKI PW6001
隔离式电流探针	CYBERTEK CP8030H、HIOKI CT6872
测力计	MAGTROL DSP6000
万用表	Fluke 17B+
热像仪	TESTO 865
可调节电源 (10A)	ITECH IT6724H
可调节电源 (20A)	ITECH M3902C
C2000 MCU LaunchPad 开发套件	德州仪器 (TI) LAUNCHXL-F28P65X
低压伺服电机 (48V、7A)	Teknic M-2310P-LN-04K
低压伺服电机 (72V、21A)	7H2207124422



## 4.4 测试结果

### 4.4.1 电源管理和系统上电和断电

此测试的重点是验证板载 5V 和 3.3V 电源并测量 3.3V 和 5V 电源轨的典型电流消耗。对于这些测试，C2000 MCU LaunchPad 开发套件均不是由 TIDA-010936 供电。由于 48:5 的高降压比（48V 输入到 5V 输出），5V 电源轨上的电压纹波也得到了验证。

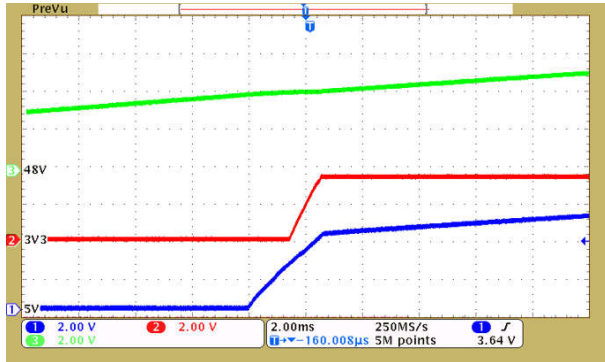


图 4-4. TIDA-010936 系统上电（48V<sub>IN</sub>、5V 电源轨和 3.3V 电源轨）

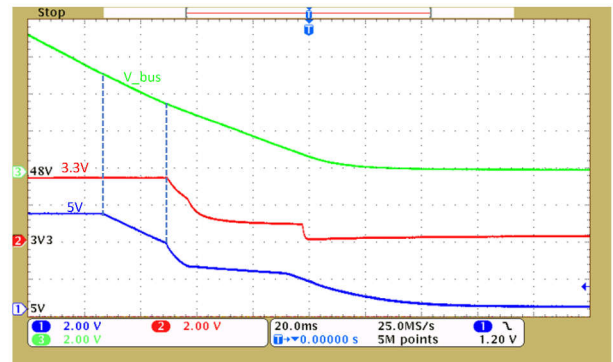


图 4-5. TIDA-010936 系统断电（48V<sub>IN</sub>、5V 电源轨和 3.3V 电源轨）

在断电阶段，当总线电压降至约 5V 时，LMR38010 的输出随总线电压一起下降。当总线电压低于 3.3V 时，3.3V 电源轨也开始下降。

在轻负载条件下，5V 电源轨的交流纹波远低于 20mV<sub>PP</sub>。纹波频率为 617kHz，与降压转换器的开关频率相匹配。5V 电源轨的偏移量大约为 5.07V。

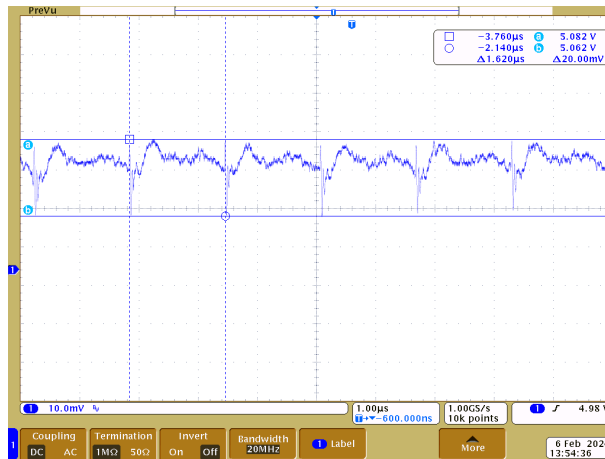


图 4-6. 额定负载 (20mA) 下的输出纹波为 5V

#### 4.5 GaN 逆变器半桥模块开关节点电压

此测试的重点是验证 GaN 逆变器开关节点电压在 48V 且相电流较低和最大值条件下的瞬态响应。此测试的另一个目的是验证每个 LMG2100 GaN 电源模块上本地旁路电容器的容量。

C2000 MCU 已配置为使用具有 40kHz 开关频率和 16.6ns 死区的互补 PWM 生成三相空间矢量。每相的 PWM 占空比配置为使用  $I_B = I_C = -0.5 I_A$  驱动相应的相电流  $I_A$ 。

LMG2100 开关节点电压是在 LMG2100 SW 引脚 ( 引脚 8 ) 上以靠近 LMG2100 PGND 引脚 ( 引脚 9 ) 的 PGND 过孔为基准进行测量获得的, 如图 4-7 所示。

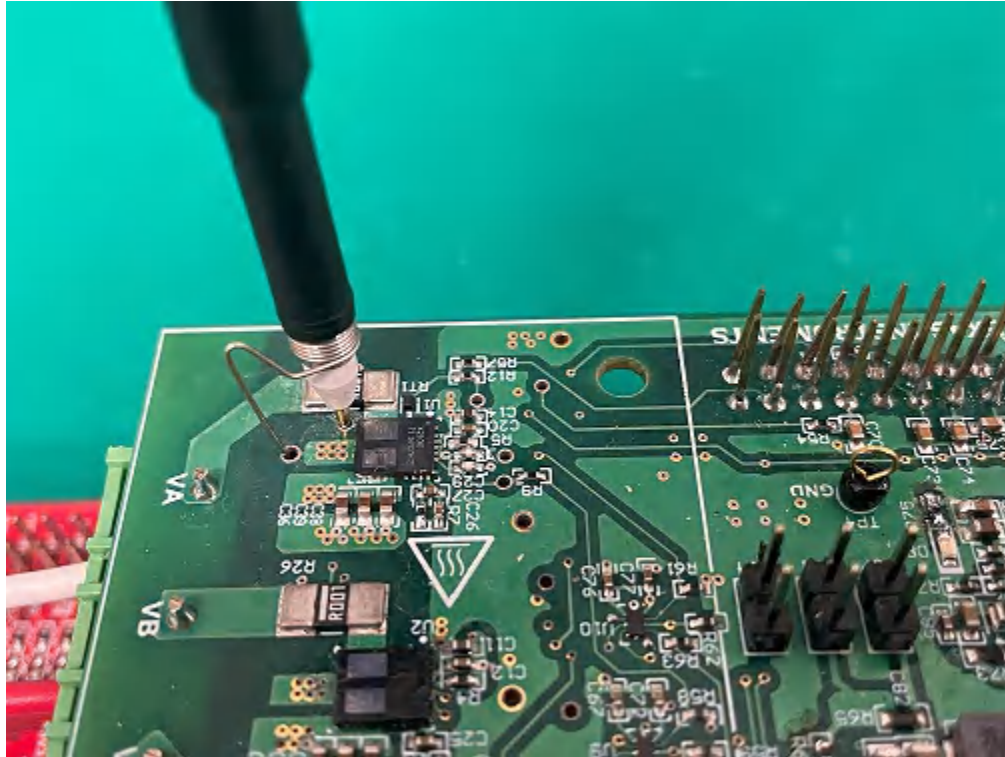


图 4-7. 使用单端探头进行 LMG2100 开关节点测量 ( 引脚 SW 至 PGND ) 的测试设置

以下各图显示了 PWM 输入在上下桥臂之间的死区时间为 16.6ns。

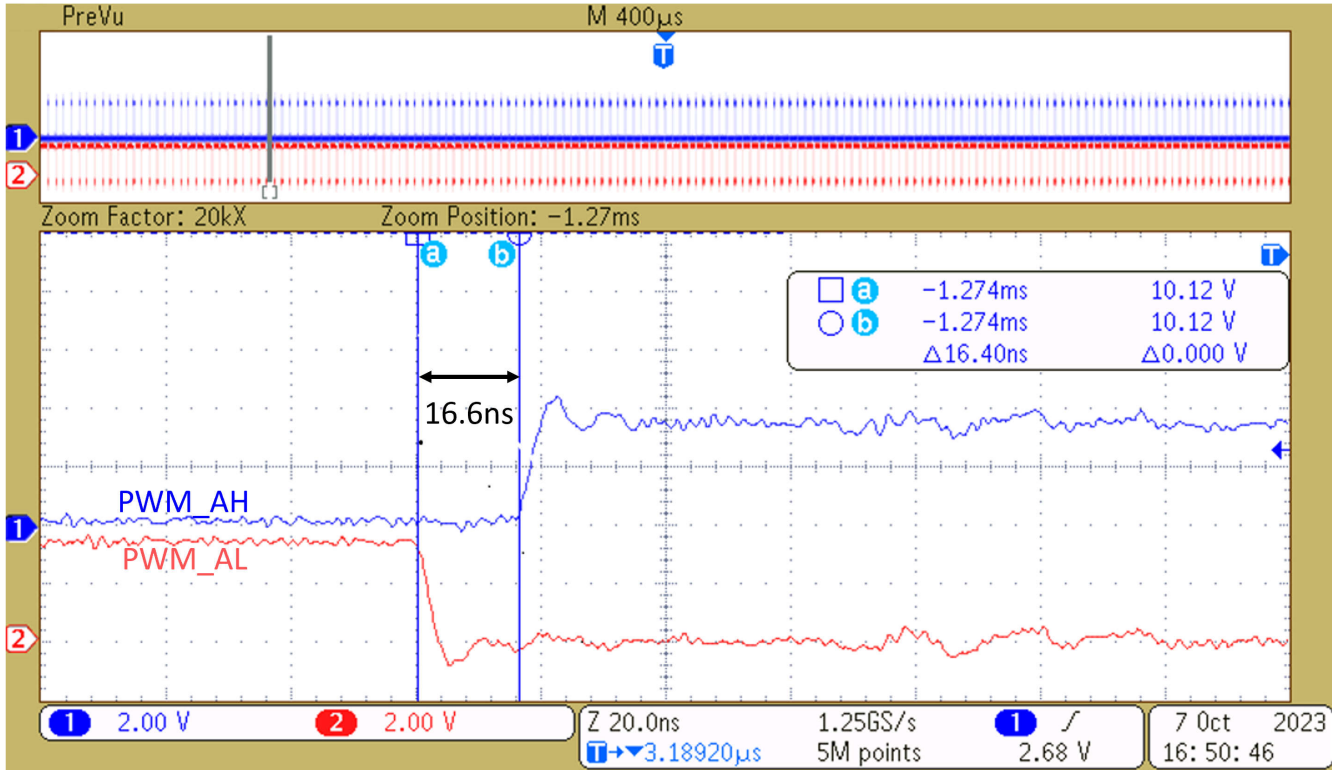


图 4-8. J2 处的上升沿 PWM A (H 和 L)

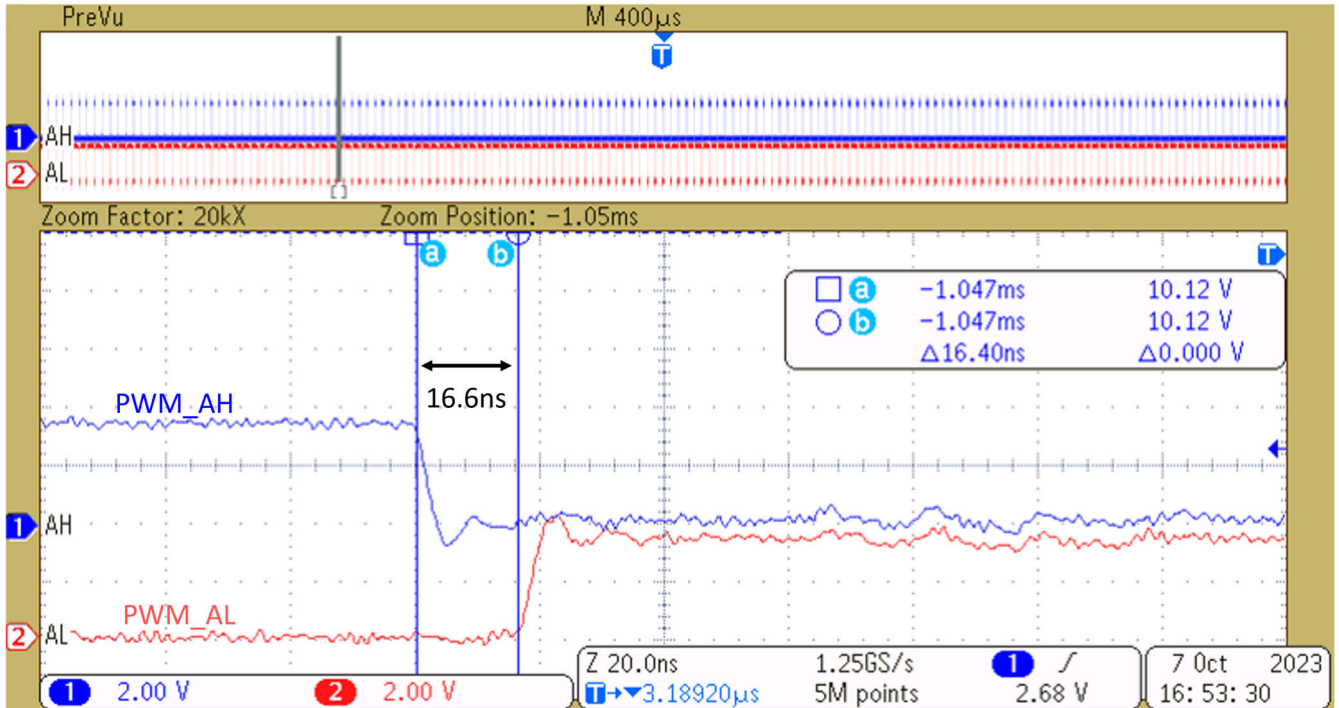


图 4-9. TIDA-010936-4-11 J2 处的下降沿 PWM A (H/L)

### 4.5.1 直流总线电压为 48V 时的开关节点电压瞬态响应

以下各图显示了硬开关和软开关时的 SW 瞬态电压。在图中可以轻松识别出 PWM 频率 (40kHz)、LMG2100 传播延迟以及 16.6ns PWM 死区。由于相电流较低, 因此存在硬开关以及软开关和硬开关的组合, 如以下各图所示。GaN-FET 的导通和关断压摆率 (20% 至 80%) 配置为大约 10V/ns 至 15V/ns。

#### 4.5.1.1 输出电流为 ±1A

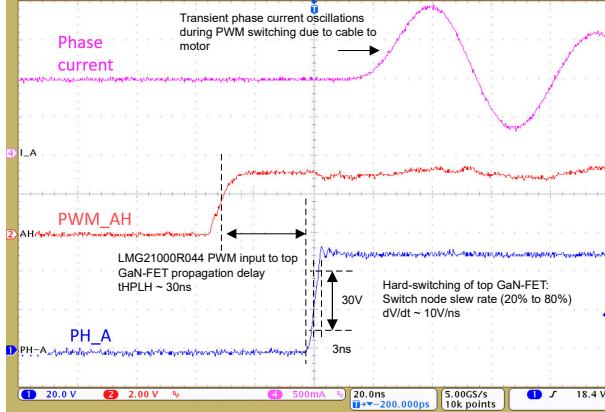


图 4-10. 48V、1A 时的 A 相上升 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

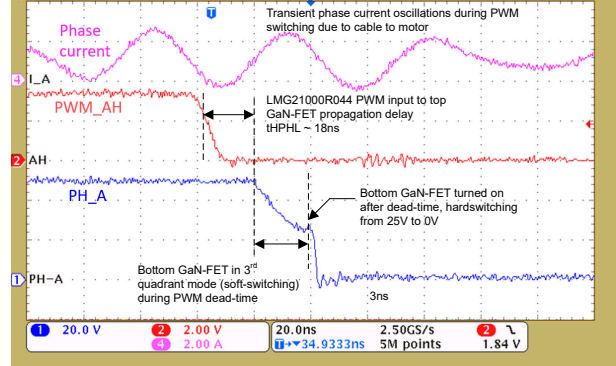


图 4-11. 48V、1A 时的 A 相下降 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

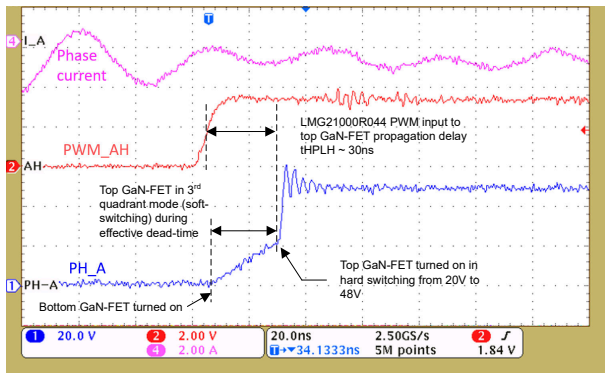


图 4-12. 48V、-1A 时的 A 相上升 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

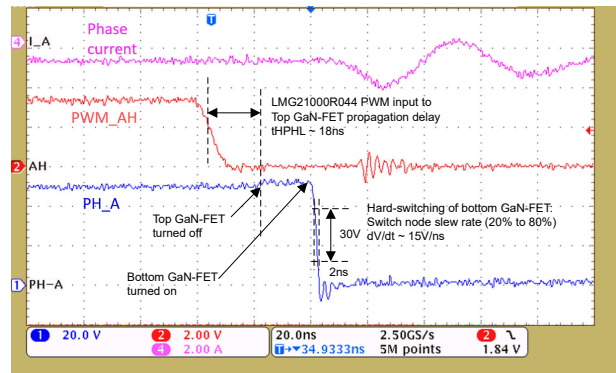


图 4-13. 48V、-1A 时的 A 相下降 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

### 4.5.1.2 输出电流为±10A

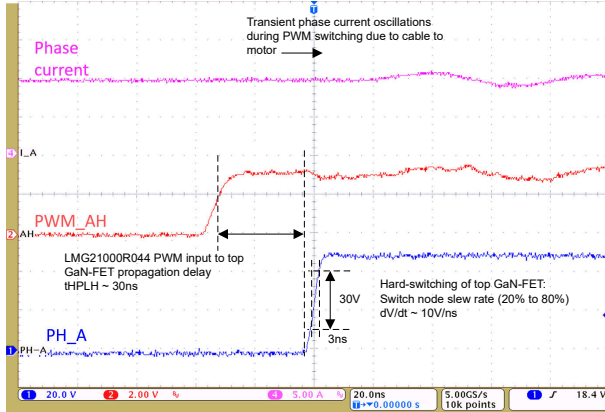


图 4-14. 48V、10A 时的 A 相上升 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

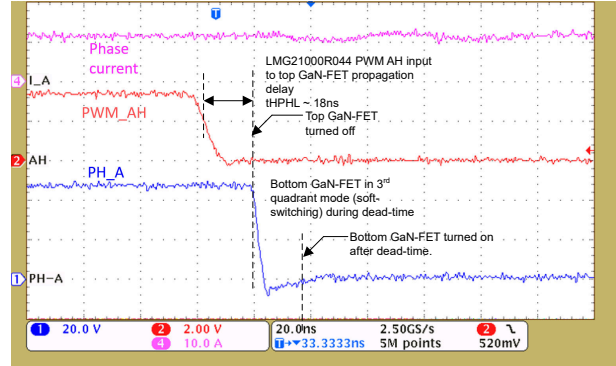


图 4-15. 48V、10A 时的 A 相下降 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

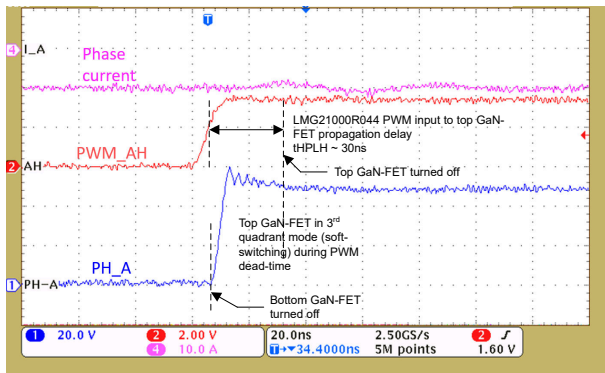


图 4-16. 48V、-10A 时的 A 相上升 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

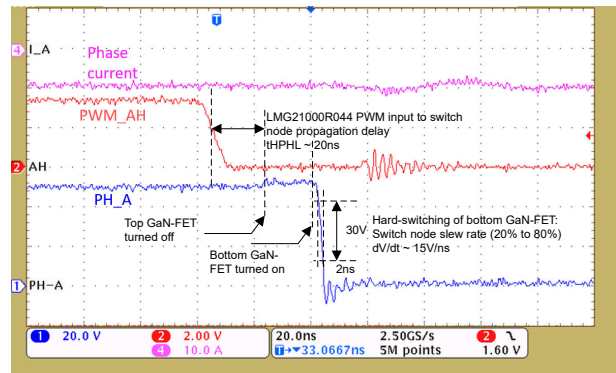


图 4-17. 48V、-10A 时的 A 相下降 SW、相电流和 LMG2100 PWM (HI)

### 4.5.2 PWM 频率对直流总线电压纹波的影响

总线电容器的一个主要功能是使总线电压变得平滑，并在开关时刻提供瞬态电流，从而使总线电压的纹波足够小。

当 PWM 开关频率增加时，对总线电容的要求会降低。由于 FET 的开关时间变短，电容器所需的电荷量变小，因此使用更高的 PWM 开关频率可以降低所需的总线电容值。

通常使用电解电容器作为总线电容器。电解电容器可以提供足够的电容，但也存在体积大、寿命短、高频特性差等缺点。相比之下，陶瓷电容器更稳定且尺寸更小，但陶瓷电容器可提供的电容有限。以下测试尝试通过增大 PWM 频率来用陶瓷电容器代替电解电容器。

通过在不同频率下测试电解电容器和陶瓷电容器的总线纹波，确定是否可以使用较小的陶瓷电容器。该测试使用了 60 μF 和 100 μF 陶瓷电容器 (PN : C3225X7R2A106K250AC × 6 或 10) 和 100 μF 电解电容器 (PN : ECA2AM101)。

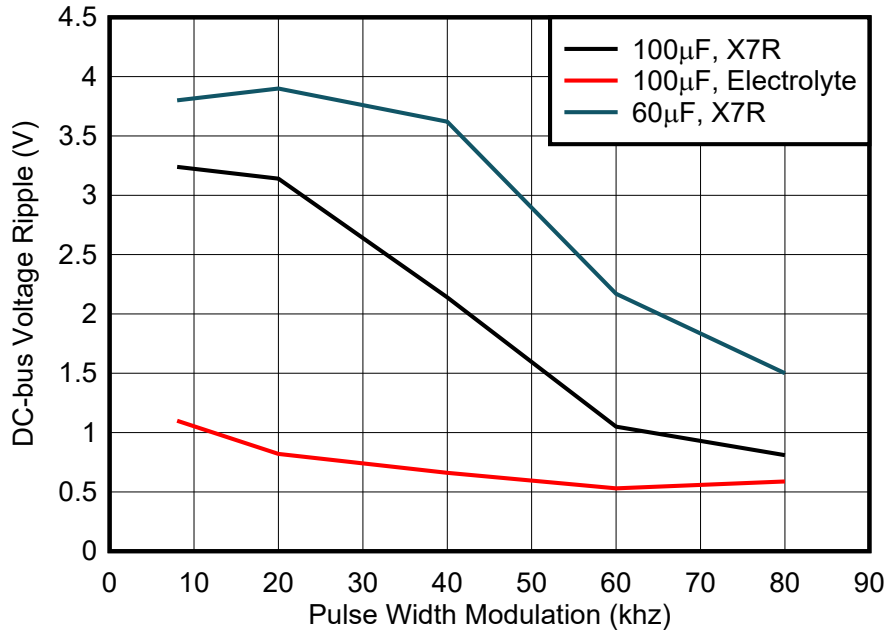


图 4-18. 48VDC、8kHz - 80kHz PWM、 $PH\_I = 5A_{RMS}$  时的直流链路电压交流纹波

如图 4-18 所示，随着频率增加，总线上的纹波逐渐降低，因此可以使用电容较小的电容器。但陶瓷电容器在低频 (< 80kHz) 下的电压纹波要大得多。该 10  $\mu F$  陶瓷电容器在 50V 电压下的实际电容仅为 2.2  $\mu F$ ，因此图 4-18 中对应于 60  $\mu F$  和 100  $\mu F$  陶瓷电容器的实际有效电容为 13.2  $\mu F$  和 22  $\mu F$ 。所以，其纹波大于 100  $\mu F$  电解电容器的纹波。

当 PWM 频率增加到 80kHz 时，100  $\mu F$  陶瓷电容器和电解电容器的电压纹波是类似的。因此，GaN 的超低开关损耗可用于将 PWM 频率提高到 80kHz。同时，为了减小尺寸，可以将电解电容器替换为容量相同的陶瓷电容器。

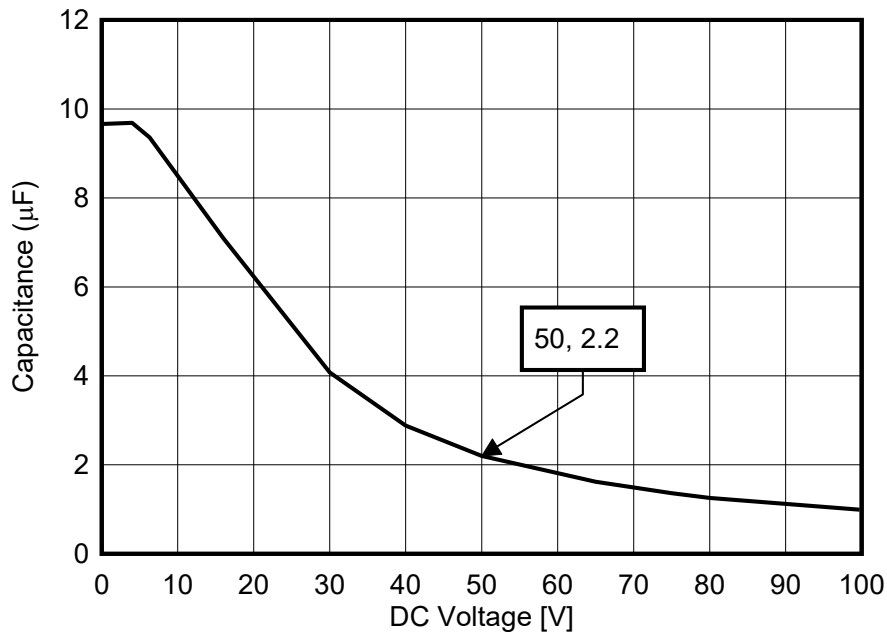


图 4-19. 陶瓷电容器电容与电压间的关系曲线

### 4.5.3 效率测量

效率测试是在 27°C 实验室温度下使用 HIOKI PW6001 电源分析仪和 HIOKI CT6872 电流互感器完成的。TIDA-010936 由 48V 直流电源供电，并使用大功率伺服电机作为负载（72V、21A）。一个测力计在电机内提供高负载。PWM 载波频率设置在 40Hz 至 80kHz 之间。电机转速为 600RPM。图 4-20 所示为测试设置和布线方框图。

在所有这些测试中，均未使用散热器和风扇，因此仅运用 TIDA-010936 PCB 的自然对流。

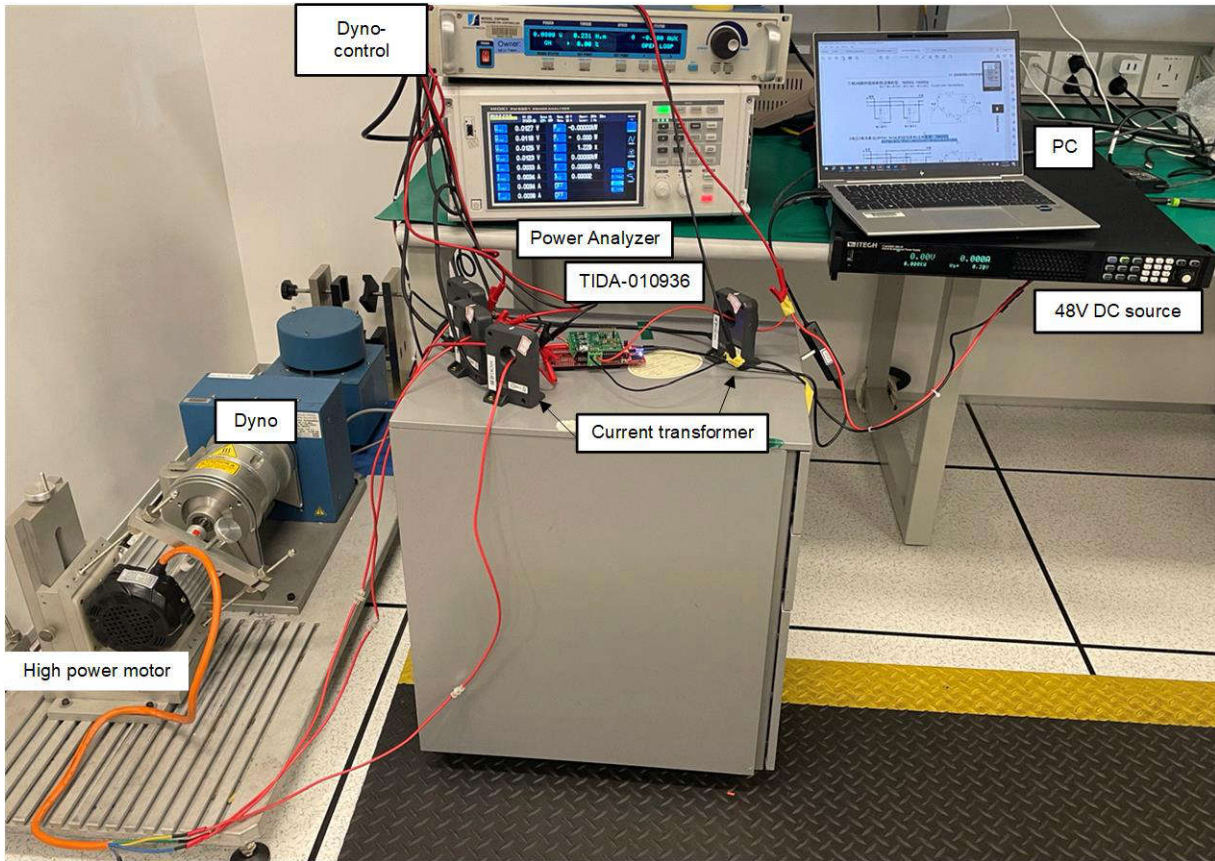


图 4-20. 用于逆变器效率分析的 TIDA-010936 测试设置

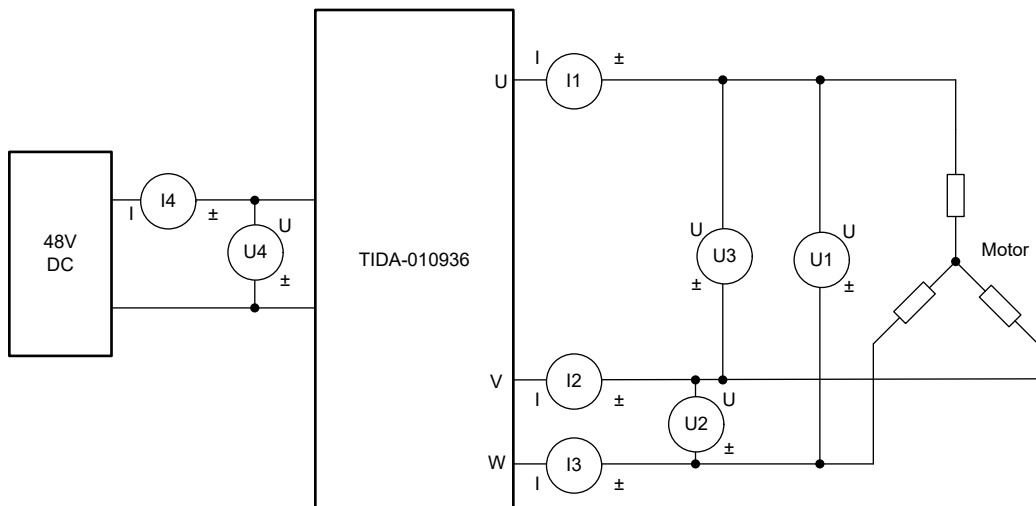


图 4-21. 用于逆变器效率分析的 TIDA-010936 布线方框图

图 4-22 显示了 TIDA-010936 功率损耗与三相电机负载电流 (以  $A_{RMS}$  为单位) 间的关系。这些数字不包括 C2000 MCU LaunchPad 开发套件的功率损耗。

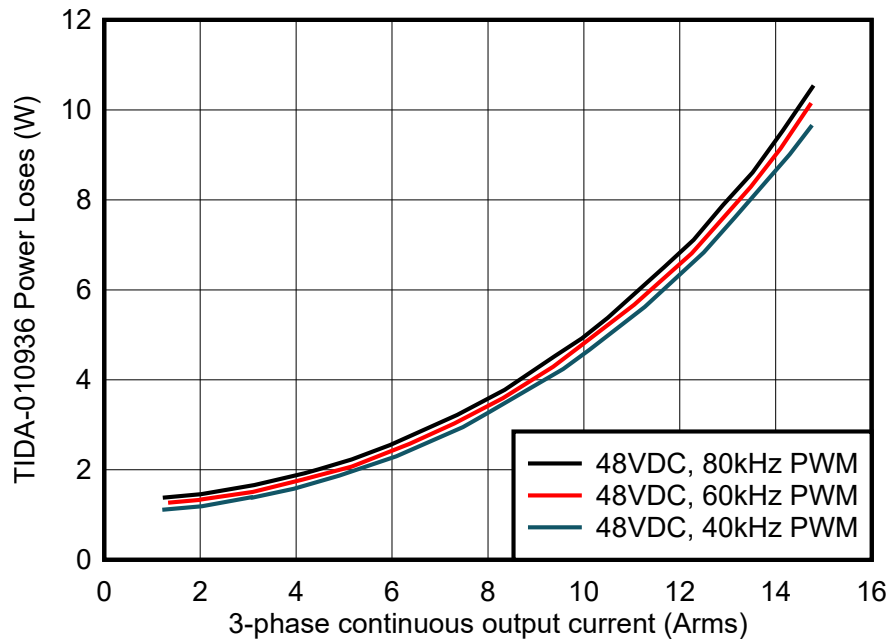


图 4-22. TIDA-010936 电路板在 48V 输入电压下的损耗与三相输出电流间的关系

TIDA-010936 电路板在最大负载电流为  $14.8A_{RMS}$  时的功率损耗在 40kHz PWM 下为 9.66W，在 80kHz PWM 下为 10.5W。TIDA-010936 功率损耗主要由 GaN FET (LMG2100) 中的损耗和  $1m\Omega$  分流电阻中的损耗决定。

最大线电压为  $19.5V_{RMS}$  (具有三次谐波的空间矢量 PWM) 且功率因数为 0.9 时, 理论最大峰值效率在 48VDC、40kHz PWM 下为 99.3%，在 48VDC、80kHz PWM 下为 99.2%，如图 4-23 所示。

可以发现, 随着 PWM 开关频率增加, 电路板的功率损耗不会显著增加。这也反映了 LMG2100R044 GaN-FET 具有极低的开关损耗, 即使在更高的 PWM 开关频率下也能实现极高的效率。

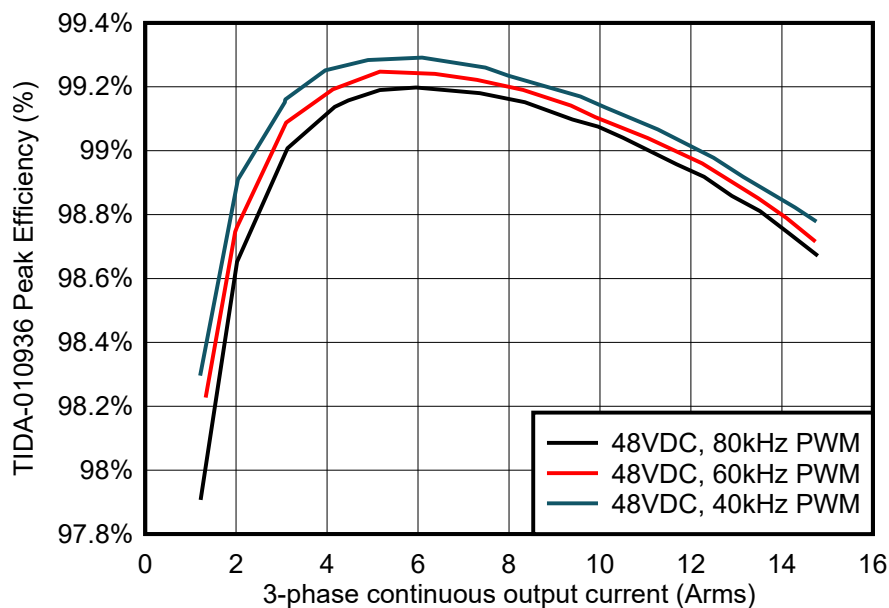


图 4-23. 在 48VDC 以及 40kHz、60kHz 和 80kHz PWM 条件下计算出的最大峰值效率



#### 4.5.4 热分析

本设计的热分析是在 27°C 实验室温度、48V 直流输入、40kHz 频率以及驱动大功率电机的条件下完成的。此测试未使用散热器或风扇。

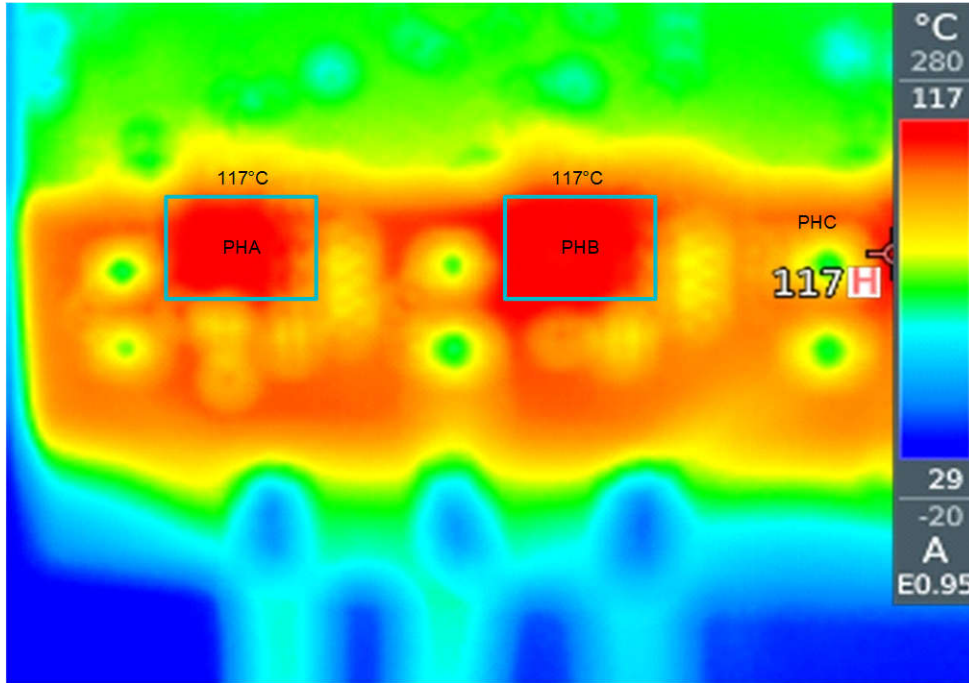


图 4-24. TIDA-010936 在 15.6A<sub>RMS</sub>、40kHz PWM 下的热像图

由于 LMG2100 将裸片暴露在顶部，因此 LMG2100 的管壳温度非常接近裸片温度。建议结温最高为 125°C。在此测试中，GaN 器件在 15.6A<sub>RMS</sub> 相电流下达到了 117°C。

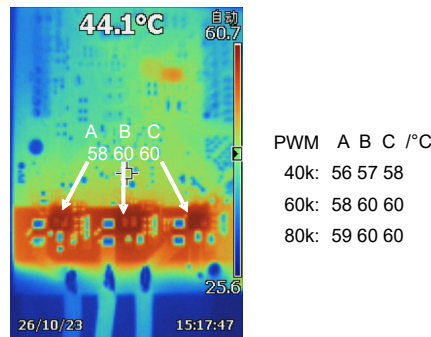


图 4-25. TIDA-010936 在 10A<sub>RMS</sub>、40kHz、60kHz 和 80kHz PWM 下的热像图

在 60kHz PWM 和 10A<sub>RMS</sub> 输出电流下，全部三相 GaN 均具有 60°C 的管壳温度。在 40kHz 和 80kHz 以及 10A 输出电流下，管壳温度几乎没有的差异。

#### 4.5.5 无负载损耗测试 (C<sub>OSS</sub> 损耗)

为了查看有效寄生电容损耗，在零负载电流、50% PWM 占空比和 8kHz 至 80kHz 的 PWM 开关频率条件下测量了 TIDA-010936 PCB 功率损耗，如方程式 3 所示。

$$P_{\text{COSS}_{\text{loss}}} = C_{\text{OSS}_{\text{FET}}} \times V_{\text{DC}}^2 \times f_{\text{PWM}} \times 2 \quad (3)$$

执行仿真时使用了 LMG2100R044 数据表中的 C<sub>OSS(TR)</sub> = 501pF，同时由于 PCB 和布线寄生电容而添加了额外的 80pF 等效电路板电容。

为了在零 PWM 开关时减去 TIDA-010936 上的电源电流偏移，第一次测量时没有 PWM 开关，因此在 48V 电源、无 PWM 开关的情况下产生了 0.765W 的功率损耗。然后，根据仿真的 C<sub>OSS</sub> 功率损耗，印证了从 8kHz 到 80kHz PWM 的功耗递增。此外，还从测量结果中减去了用于检测三相电压的相电压电阻分压器损耗（在开关时），以免将这些损耗计入 C<sub>OSS</sub> 功率损耗。仿真结果与测量的 C<sub>OSS</sub> 功率损耗很匹配。

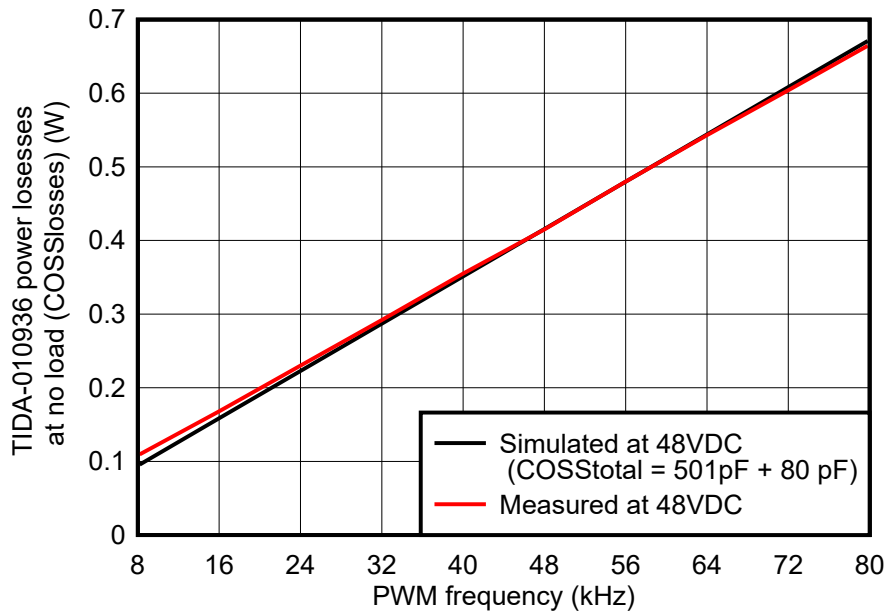


图 4-26. 48V<sub>DC</sub> 时的无负载 (C<sub>OSS</sub>) 功率损耗与 PWM 频率间的关系

## 5 设计和文档支持

### 5.1 设计文件 {必填主题}

#### 5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010936](#) 中的设计文件。

#### 5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010936](#) 的设计文件。

#### 5.1.3 PCB 布局建议

在 TIDA-010936 PCB 上，LMG2100 的布局遵循 [LMG2100R044 100V、35A GaN 半桥功率级](#) 数据表中的布局示例。

##### 5.1.3.1 布局图

要下载布局图，请参阅 [TIDA-010936](#) 的设计文件。

#### 5.1.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-010936](#) 中的设计文件。

#### 5.1.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参阅 [TIDA-010936](#) 的设计文件。

#### 5.1.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010936](#) 的设计文件。

## 5.2 工具与软件

### 工具

#### [LAUNCHXL-F28P65X C2000™ 实时 MCU F28P65x LaunchPad™ 开发套件](#)

LAUNCHXL-F28P65X 是一款适用于 TI C2000™ 实时微控制器系列 F28P65x 器件的低成本开发板。该电路板提供标准化且易于使用的平台来开发应用，因此是初始评估和原型设计的理想选择。该扩展版本 LaunchPad™ 开发套件可提供额外引脚用于开发，并支持连接两个 BoosterPack™ 插件模块。作为庞大的 TI MCU LaunchPad 生态系统的一部分，该电路板还与各种插件模块交叉兼容。

### 软件

#### [适用于 C2000™ MCU 的 MotorControl 软件开发套件 \(SDK\)](#)

适用于 C2000™ 微控制器 (MCU) 的 MotorControl SDK 包含一套全面的软件基础架构、工具和文档，旨在尽可能缩短基于 C2000 实时控制器的电机控制系统开发时间，可适用于各种三相电机控制应用。该软件包括在 C2000 电机控制评估模块 (EVM) 和针对工业驱动器、机器人、电器和汽车应用的 TI 参考设计上运行的固件。

MotorControl SDK 包含高性能电机控制应用在开发和评估等各阶段所需的所有资源。

### 5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [“使用集成式驱动器优化 GaN 性能”白皮书](#)
2. 德州仪器 (TI), [“GaN FET 模块相对于硅 FET 模块的性能优势”白皮书](#)
3. 德州仪器 (TI), [“LMG2100R044 100V、35A GaN 半桥功率级”数据表](#)
4. 德州仪器 (TI), [氮化镓 \(GaN\) 解决方案](#)
5. 德州仪器 (TI), [WEBENCH® 设计中心](#)
6. 德州仪器 (TI), [MotorWare™ 软件](#)
7. 德州仪器 (TI), [低压伺服电机](#)

### 5.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#)是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

### 5.5 商标

BoosterPack™, C2000™, LaunchPad™, TI E2E™, and InstaSPIN-FOC™ are trademarks of Texas Instruments. WEBENCH® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 6 作者简介

**EASON TIAN** 是负责机器人电机驱动系统设计的德州仪器 (TI) 系统工程师。

**MARTIN STAEBLER** 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的高级技术人员，负责规划和开发工业驱动器的参考设计。

## 7 致谢

作者感谢 **Jiaxin Teng**、**Jim Chen**、**Kristen Mogensen**、**Chen Gao** 和 **Jerome Shan** 在 TIDA-010936 原理图和布局创建、TIDA-010936 测试软件开发以及 TIDA-010936 设计测试和验证方面做出的卓越贡献。

## 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