

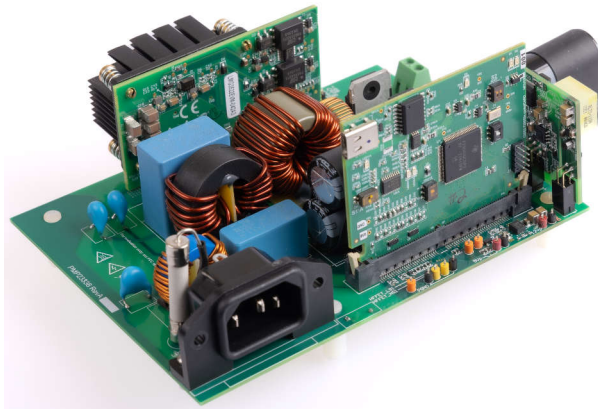
EVM User's Guide: PFC23338EVM-107

PFC23338EVM-107 评估主板



说明

此参考设计是一款基于氮化镓 (GaN) 的 3.6kW 单相持续导通模式 (CCM) 图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 转换器，面向 M-CRPS 服务器电源。此设计包含精度为 0.5% 的电子计量功能，使用 AMCx306 作为电流检测器件，无需使用外部电源计量 IC。此设计中还提供了一种使用 TMCS1133 的低成本电流检测替代方案。该电源旨在支持 16ARMS 的最大输入电流和 3.6kW 的峰值功率。此功率级之后是一个小型升压转换器，这有助于显著缩小大容量电容器的尺寸。本设计适用于 TI GaN 半桥子卡（例如 LMG3522EVM-042、LMG3422EVM-043、LMG3650EVM-113）。LMG3522R030、LMG3422R030、LMG3650R025 是 TI 的 25mΩ 至 30mΩ 高压 GaN FET，带有集成驱动器和保护功能，可实现高效率和高功率密度。F28003x C2000™ 实时微控制器可用于所有高级控制，包括重浪涌电流限制、交流压降事件期间的小幅升压运行、电子计量以及 PFC 和通用控制器之间的通信。此外，F28003x 微控制器内置 Δ - Σ 滤波器模块，可与 AMC1306 精密电流检测增强型隔离调制器连接，从而实现行业领先的低总谐波失真 (iTHD) 和高测量精度。PFC 在 65kHz 的开关频率下运行，可实现 98.93% 的峰值效率。



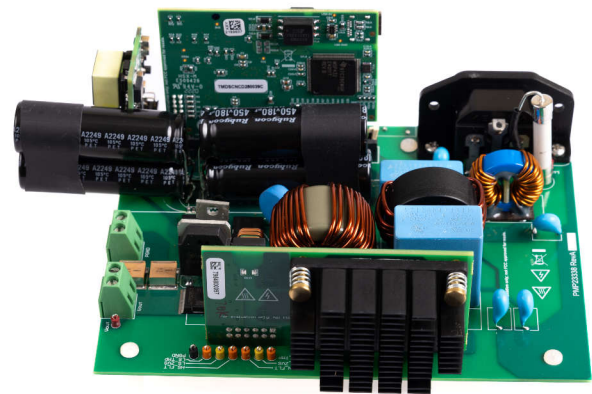
电路板侧视图

特性

- 精度为 0.5% 的集成电子计量功能
- 0 - 10% 负载时，<10% iTHD；10% - 20% 负载时，<5% iTHD；20% - 50% 负载时，<3% iTHD；50% - 100% 负载时，<2% iTHD
- 230Vac 时峰值效率为 98.93%
- 交流电从压降返回时可实现智能的重浪涌电流控制，符合 M-CRPS 重浪涌电流规范
- 包含小型升压转换器，可延长保持时间并仅允许 720μF 大容量电容
- 两个电流检测选项：隔离式 Δ - Σ 调制器（默认）或霍尔传感器
- 经驱动器集成优化的 GaN
- 适用于 73.5mm M-CRPS PSU 的 3.6kW 额定功率

应用

- 具有 48V 输出的机架和服务器 PSU
- 具有 12V 输出的服务器 PSU
- 商用通信电源整流器
- 工业交流/直流
- 单相在线式 UPS



评估板顶视图

1 系统说明

1.1 系统方框图

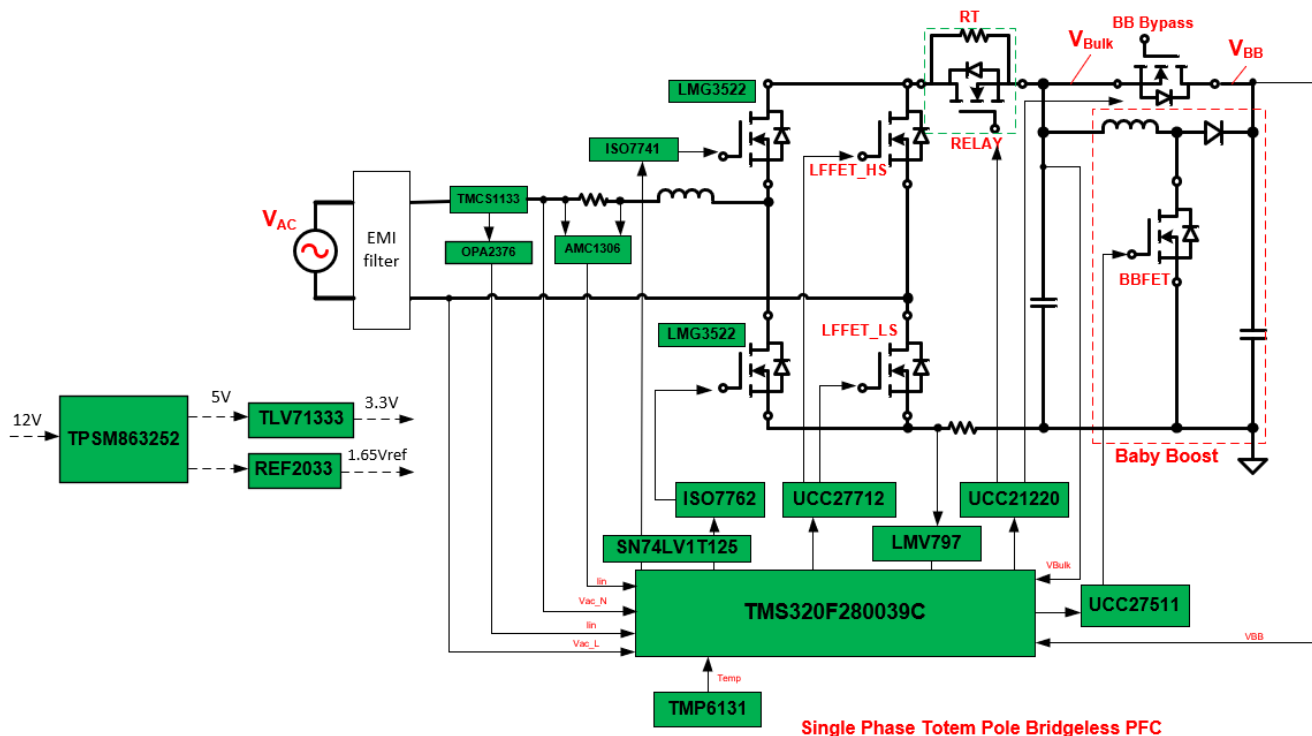


图 1-1. PMP23338 方框图

1.2 套件内容

此 EVM 包含一个图腾柱 PFC 主板和一个 PMP20306 辅助电源子卡。GaN 半桥子卡与 C2000 控制卡需要单独订购。

EVM 需要 C2000 控制卡。请订购并使用 [TMDSCNCD280039C](#)。

PFC23338EVM-107 使用标准 TI GaN 子卡引脚接口。采用该引脚的任何 TI GaN 子卡均可与 PFC23338EVM-107 (例如 [LMG3522EVM-042](#)、[LMG3422EVM-043](#)、[LMG3650EVM-113](#)) 配合使用。

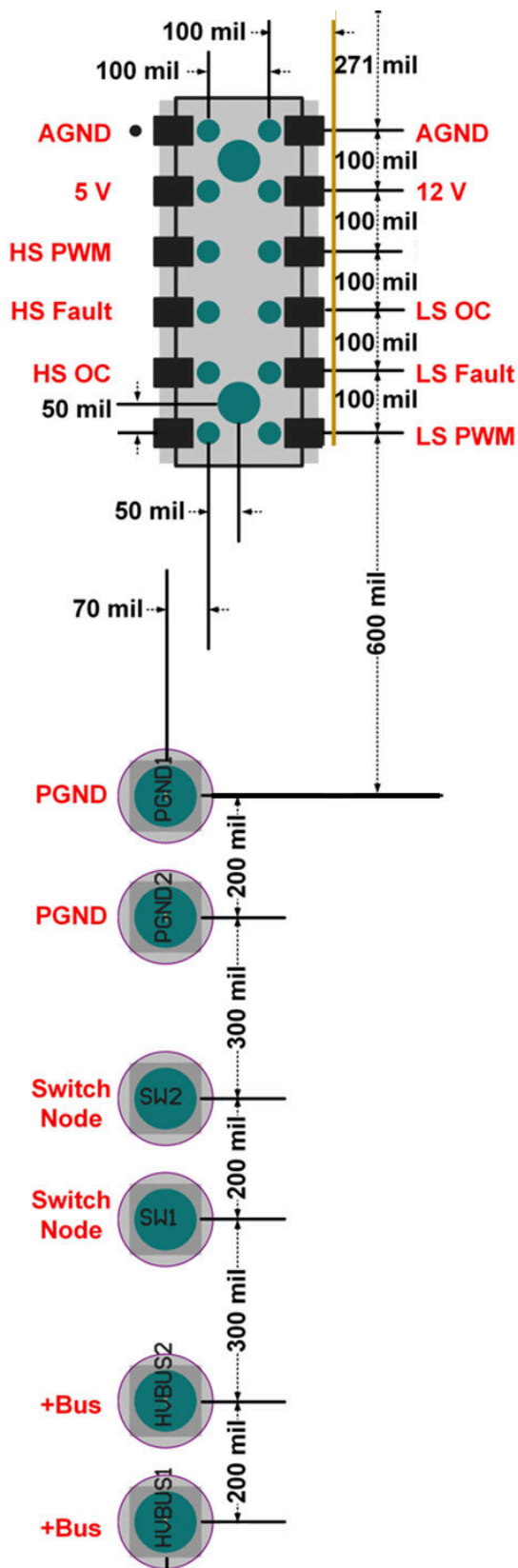


图 1-2. TI GaN 子卡引脚排列

1.3 电压和电流要求

表 1-1. 电压和电流规格

参数	规格	单位
输入电压	90 - 265	VAC
线路频率	47 - 63	Hz
输入电流 (最大值)	16	A
输出电压	385	V
高压线路输出功率	3	kW
低压线路输出功率	1.5	kW

1.4 设计注意事项

1.4.1 升压电感器设计

本设计选择了单相连续导通模式 (CCM) 图腾柱无桥 PFC。由于本设计意图在电感器高度低于 32mm 的情况下实现高功率密度，故选择了 65kHz 的开关频率，因此 EMI 滤波器无需处理 PFC 开关频率所产生噪声的一次和二次谐波 (目标 CISPR 32 传导 EMI 限制从 150kHz 开始)。为了更大程度地减小电感器尺寸，选择了低电感，以允许施加低电感器绕组匝数。铁粉磁芯材料具有软饱和特性，适用于使用高直流偏置电流的高功率 CCM 转换器。由于电感器电流增加时电感器电感会下降，因此必须谨慎选择磁芯材料，以防电感器在高负载或峰值负载下饱和。

设计目标是在 3600W 满载和 230Vrms 输入电压下实现小于 40% 的电感器电流纹波。

通过使用以下 [方程式 1](#)：

$$L_{PFC} = \frac{1}{I_{L,ripple} \%} \cdot \frac{V_{IN,RMS}^2}{P_{IN}} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{2} \cdot V_{IN,RMS}}{V_o}\right) \cdot \frac{1}{F_{SW}} \quad (1)$$

可以计算出 PFC 电感器电感为 92.21 μ H，即在最大电感器电流下，电感器电感需要高于 92.21 μ H。通过使用以下 [方程式 2](#)：

$$I_{L,max} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{IN}}{V_{IN,RMS}} \cdot \left(1 + \frac{I_{L,ripple} \%}{2}\right) \quad (2)$$

可以计算出最大电感器电流为 26.64A。

选择了带有 Kool M μ Max 磁芯 (Mag-inc P/N: 0079894A7HT19) 和高磁通磁芯 (Mag-inc P/N: C058894A2HT19) 的环形线圈电感器，并采用相同的绕组匝数 (44)，以便在 0A 电流下获得 240 μ H 的电感，同时满足 33mm 的高度要求。然后，将两个电感器逐个应用到 PFC 升压级，以便通过施加电流来测试其电感。[图 1-3](#) 显示，相比于使用 Kool M μ Max 磁芯的电感器，使用高磁通磁芯的电感器能够以更少的绕组匝数实现我们的电感目标。因此，此设计中选择了使用高磁通磁芯的电感器。

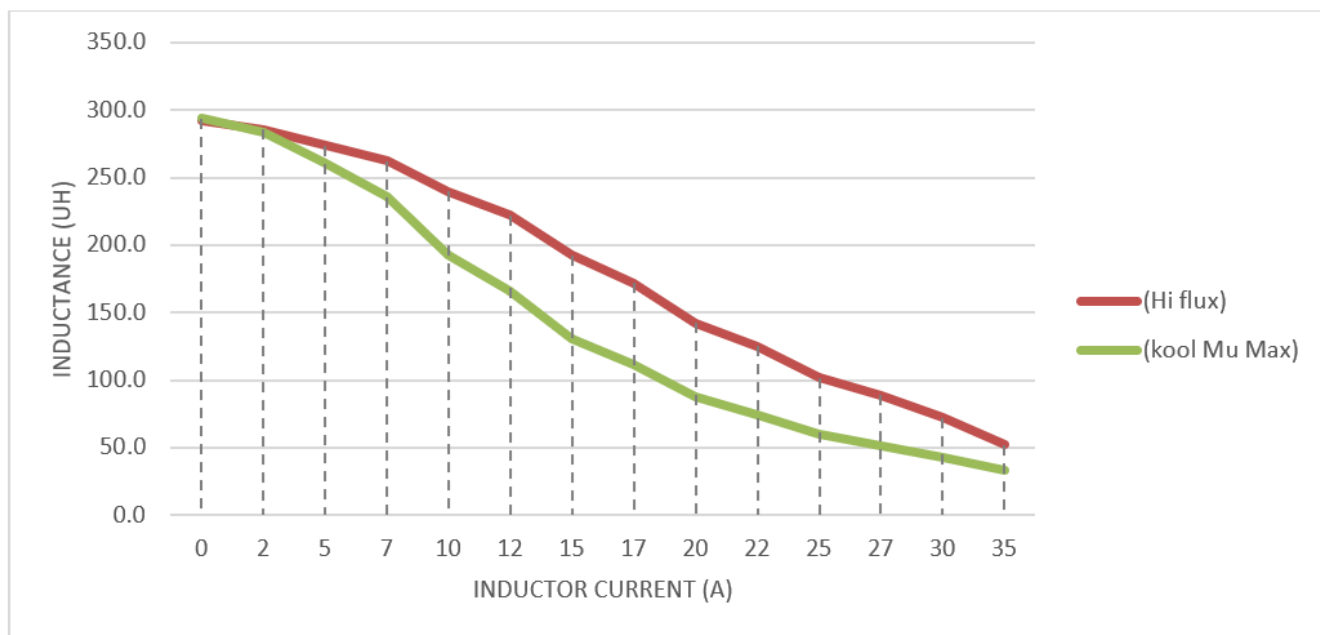
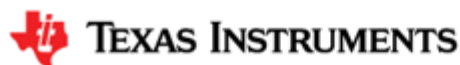


图 1-3. 电感和电流

1.4.2 高频电源开关选择

由于宽带隙器件是 CCM 图腾柱无桥 PFC 升压整流器所需的高频电源开关，因此需使用 TI 的“[GaN CCM 图腾柱 PFC 功率损耗计算 Excel 表](#)”估算电源开关上的损耗并选择适用的 GaN 器件。计算器结果的屏幕截图如 [图 1-4](#) 所示。最终，本设计选择了 30mΩ GaN 器件 (LMG3522R030 或 LMG3422R030)。



Constant
Input
Output

	Configuration 1	Configuration 2	
Configuration	CCM Totem Pole	CCM Totem Pole	
Select FET	LMG3422R030	LMG3522R030	
Select # of phase legs	1	1	
$R_{DS,ON}$	35	35	mΩ
$R_{th, \text{ junction to case}}$	0.33	0.13	C/W
E_{on}	69	73	μJ
E_{off}	0.05	0.00	μJ
AC $V_{IN, RMS}$	230	230	V
DC V_{OUT}	390	390	V
Switching Frequency	65	65	kHz
Deadtime	100	100	ns
Ambient Temperature	50	50	C
Junction Temperature (T_j)	125	125	C
Slew Rate	100	100	V/ns
Max Output Power	3600	3600	W
$R_{th, \text{ case to ambient}}$	6.474	6.588	C/W
$R_{th, \text{ junction to ambient}}$	6.804	6.718	C/W
R_{DS,ON_temp}	0.063	0.063	Ω
Device Conduction Power Loss	8.035	8.035	W
Device Coss Power Loss	2.335	2.367	W
Overlap Power Loss	0.311	0.421	W
Deadtime Loss	0.277	0.277	W
Driver Loss	0.065	0.065	W
Total Loss per Device	11.023	11.165	W
Input RMS Current	15.972	15.972	A
Device Average Current	7.190	7.190	A

图 1-4. CCM 图腾柱无桥 PFC 的 GaN FET 损耗计算

1.4.3 输入交流电压感测

线电压和中性点电压由连接电路板地的电阻分压器检测，如图 1-5 所示。在控制器上减去这两个读数可得到 Vac 感测结果。

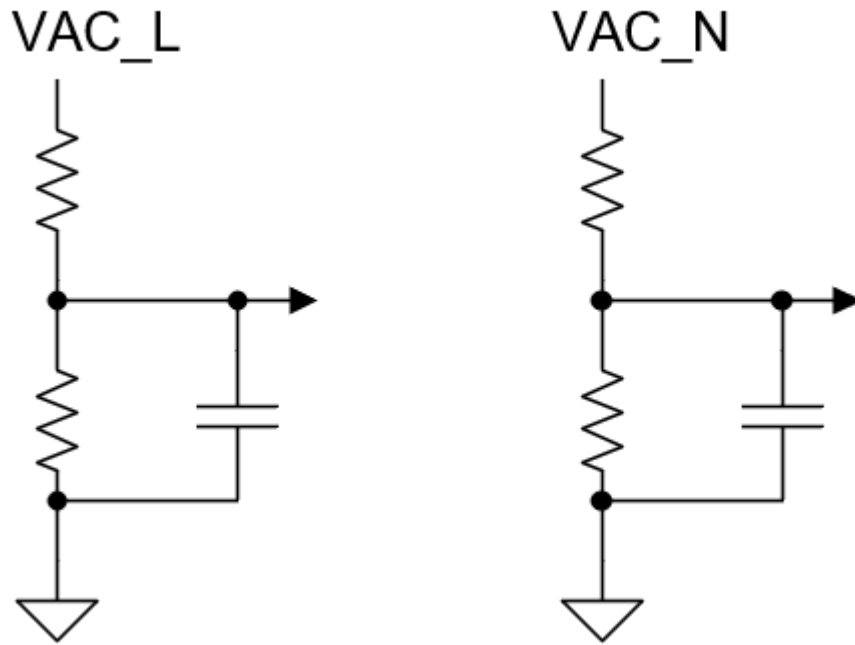


图 1-5. 输入交流电压感测

1.4.4 体电压感测

同样，体电压通过电阻分压器进行感测，如 图 1-6 所示。

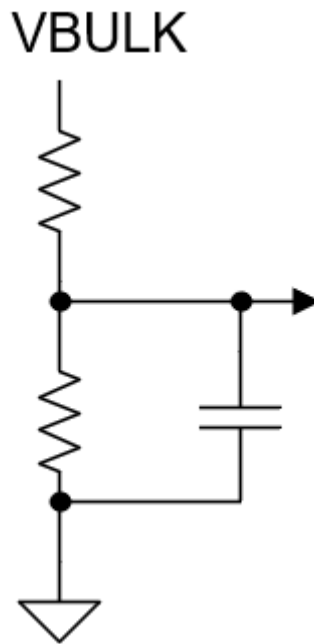


图 1-6. 体电压感测

1.4.5 输入电流检测

此设计包含两个电流传感器，但 PFC 运行时只需要 1 个传感器。该代码可支持两个电流传感器。两个传感通过编译标志隔开，用户可以通过更改编译标志来选择要使用的传感器，然后重新下载代码。

选项 1：使用隔离式 Δ - Σ 调制器 AMC1306 检测输入电流 (图 1-7)。这是代码中的默认配置。AMC1306 的输出为 1 位流，如 图 1-8 所示。这个 1 位流会被发送到 C2000，并由内置的 Δ - Σ 数字滤波器解码。需使用两个 Δ - Σ 数字滤波器。一个配置为高速，但分辨率相对较低，用于控制 PFC 电流环路；另一个配置为高分辨率，但速度相对较低，用于电子计量 (图 1-9)。有关 AMC1306 和电表的信息，请参阅 [2]。

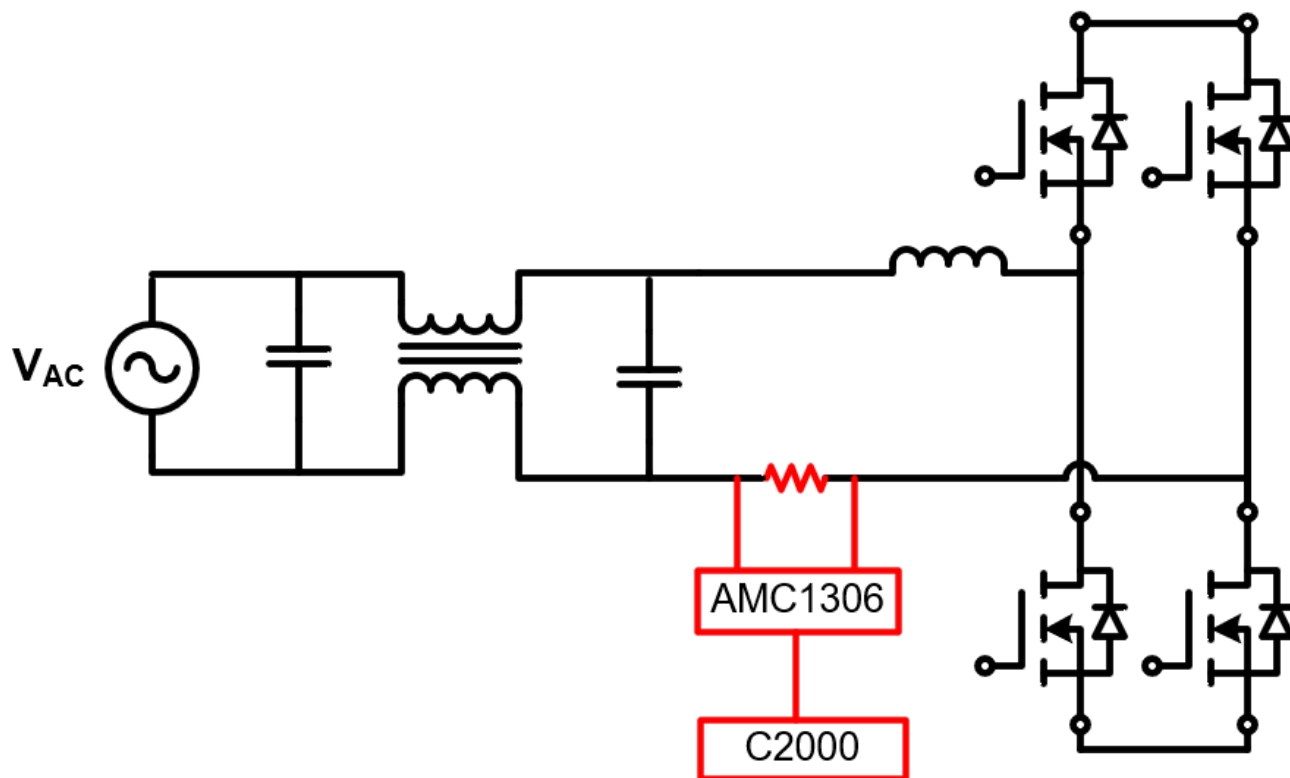


图 1-7. 使用 AMC1306 进行电流检测



图 1-8. AMC1306 输出

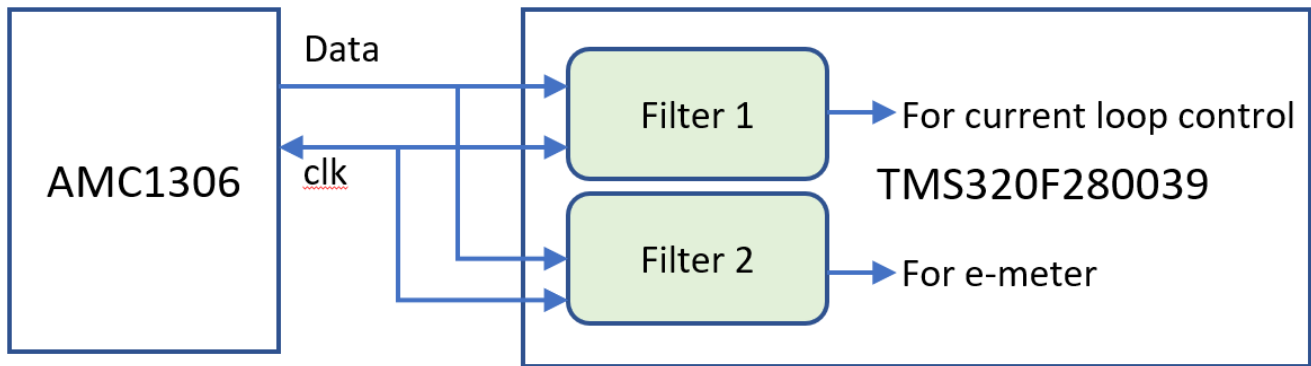


图 1-9. Δ - Σ 滤波器配置

选项 2：使用霍尔效应传感器 TMCS1133 来检测输入电流。这是一种传统的电流检测方法。霍尔传感器的输出由运算放大器电路放大 (图 1-10)。对于正弦波交流输入，霍尔传感器的输出是具有直流失调电压的正弦波。该信号由 C2000 测量，然后减去直流失调电压以获得实际的交流输入电流信号。

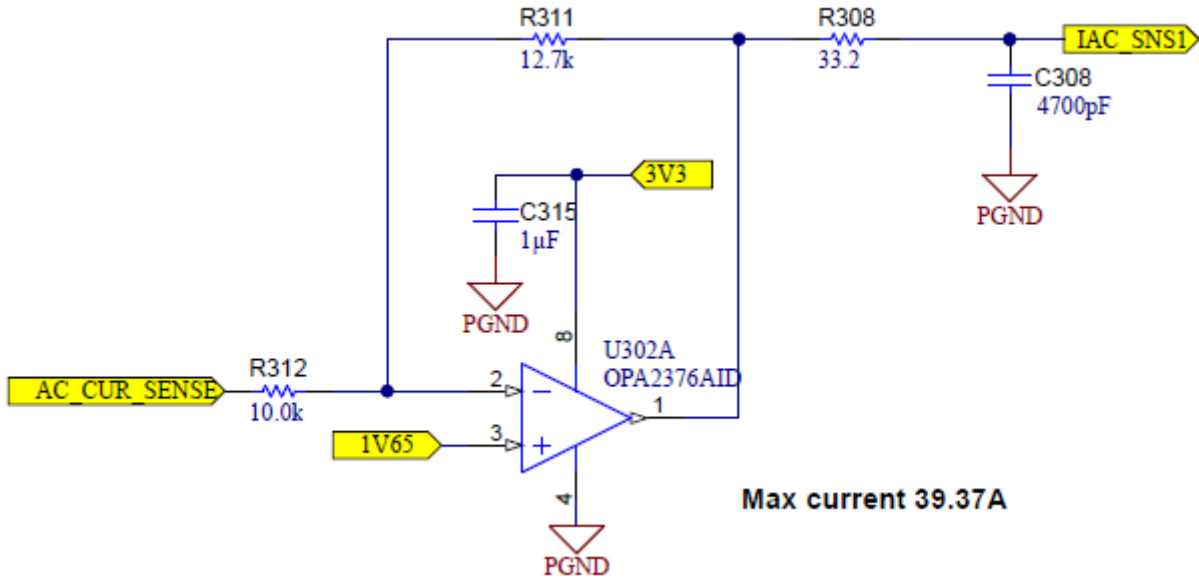


图 1-10. 电流检测放大器

1.4.6 小型升压设计

在 PFC 和直流/直流之间添加了一个小型升压转换器 (如图 2-1 所示)，以便维持保持时间并减少大容量电容。小型升压转换器是一款紧凑型升压转换器，仅在交流压降事件期间工作。在正常运行期间，小型升压转换器会关闭，并通过 MOSFET 绕过。发生交流线路压降时，旁路 FET 会关闭，小型升压转换器会开启，以确保隔离式直流/直流转换器的 VBB 保持在 UVLO 电平以上。为了更最大限度地减小磁体尺寸，小型升压的开关频率设置为 500kHz。

1.4.7 继电器

如图 2-1 所示，MOSFET 在本设计中被用作固态继电器 (SSR)。相比于传统机械继电器，SSR 的响应速度更快，工作温度范围更大，可靠性更高。此外，在输入欠压/断电事件之后，在输入电压返回几毫秒后，必须限制 M-CRPS 的输入电流 (重浪涌电流)。由于 SSR 响应速度快，可控制 SSR 执行快速开/关操作，以限制重浪涌电流。有关重浪涌控制的详细信息，请参阅 [1] 和 [2]。

1.4.8 保护

1.4.8.1 过压保护

Vbus 电压由 ADC 测量。如果 Vbus 超过 450V，固件会关闭 PFC。

1.4.8.2 过流保护

通过片上比较器实现过流保护。它可以配置为关断和门锁（默认）或逐周期电流限制。用户可以通过更改编译标志来选择使用哪种保护，然后重新下载代码。

2 软件

2.1 快速入门指南

如需快速入门，以便开始使用交流输入闭环电压和电流控制环路进行测试，请开始阅读下方的 [下载固件](#) 中的内容，并按照该指南进行操作。

要探索此电路板的完整选项和相关实验，请查看软件指南，获取相关代码。软件指南储存在为 DigitalPower_SDK 下载的文件夹中。如需找到软件指南，请找到 DigitalPower_SDK 文件夹，然后按照以下步骤操作：

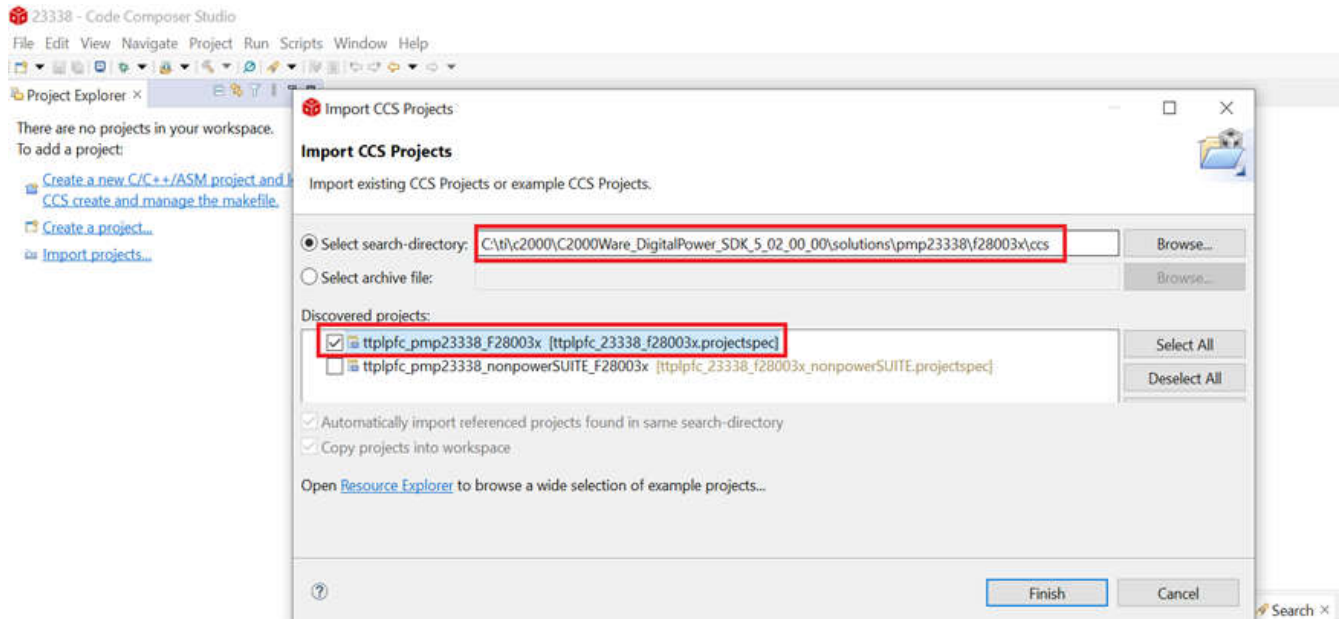
C2000Ware_DigitalPower_SDK_x_xx_xx_xx → solutions → pmp23338 → docs →

pmp23338_software_guide.pdf. 该指南介绍了使用 PFC23338EVM-107 进行测试的步骤，以及该 EVM 的软件中包含的不同实验。该指南还包含有关系统控制设计的有用信息。

2.2 下载固件

PFC23338EVM-107 需要与 C2000 控制卡 TMDSCNCD280039C 配合使用。如果您的控制卡尚未下载 PFC23338EVM-107 代码，请按照以下步骤下载代码：

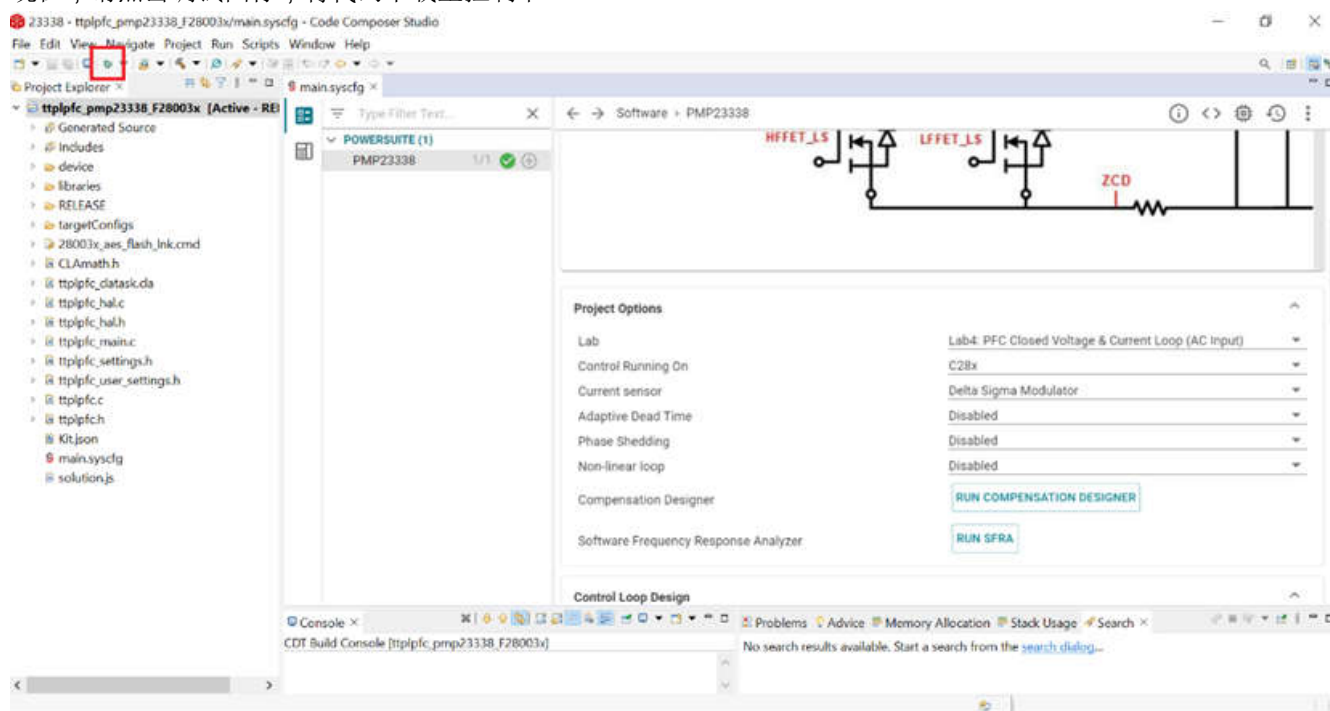
1. 前往以下页面下载最新的数字电源 SDK：<https://www.ti.com/tool/C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK#downloads>
2. 安装数字电源 SDK 并在解决方案文件夹中找到 pmp23338 固件。
3. 打开 Code Composer Studio (CCS) 并导入代码，具体方法如下图所示：



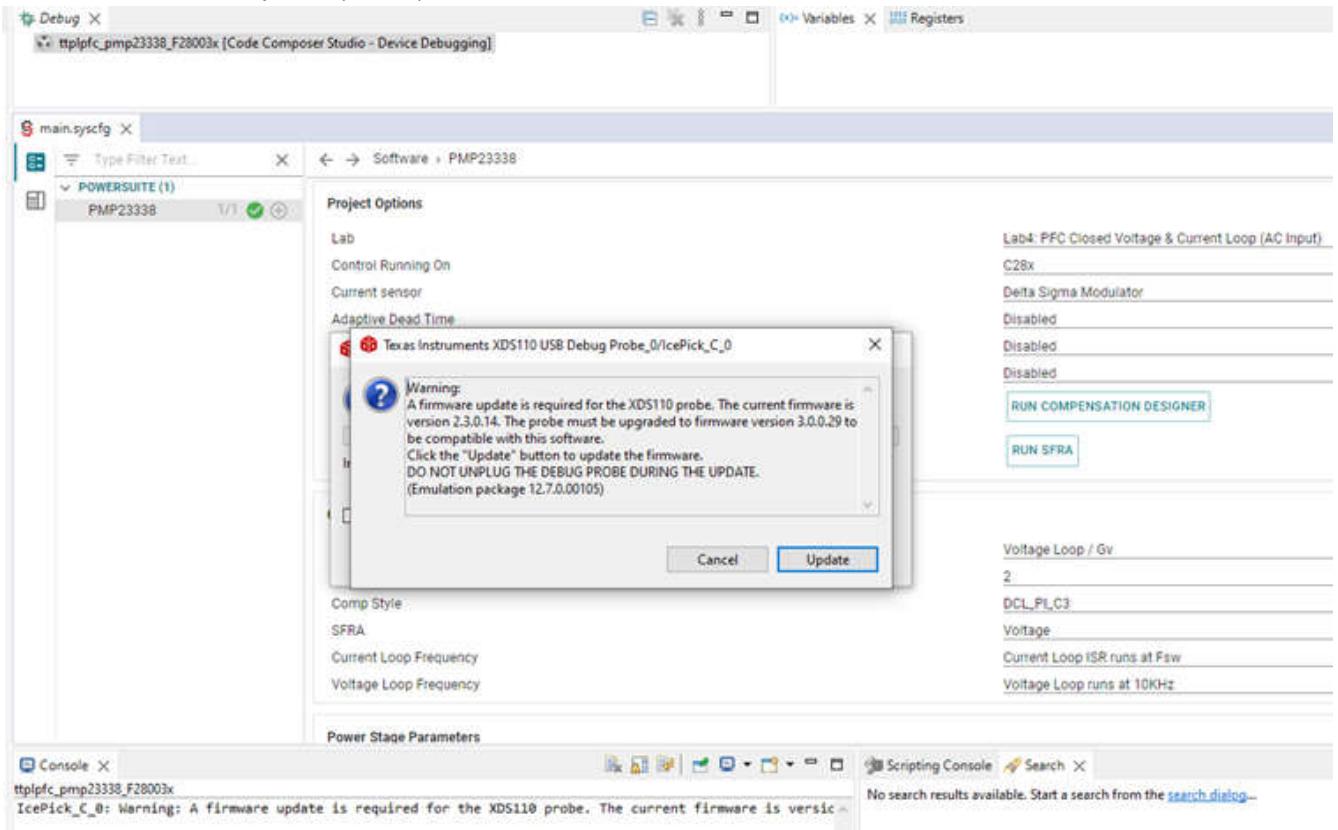
4. 将 Boot 引脚开关移动到 TMDSCNCD280039C 控制卡的位置 1：



5. 如需下载和刷写代码，请使用 USB 线缆将控制卡连接至 PC。
6. 现在，请点击调试图标，将代码下载至控制卡。



7. 出现提示时，点击“Update (更新)”。



8. 下载/刷写代码后，断开控制卡与 PC 的连接。
9. 将控制卡安装至 PFC23338EVM-107 电路板

3 上电

3.1 所需设备

- 交流电源：300V，20A
- 电子负载
- 数字功率计
- 隔离式电压探头
- 电流探针

3.2 注意事项

1. 该 PFC 需要与 C2000 控制卡 TMDSCNCD280039C、PMP20306 隔离式辅助电源参考设计和 LMG3522EVM-042/LMG3422EVM-043 参考设计配合使用。
2. 由于采用了图腾柱拓扑，PFC 接地 (PGND) 线路是悬空的。如果测试设备设置不正确，这可能会导致共模电流问题。在测量信号时，请使用差分电压探头。

3.3 启动序列

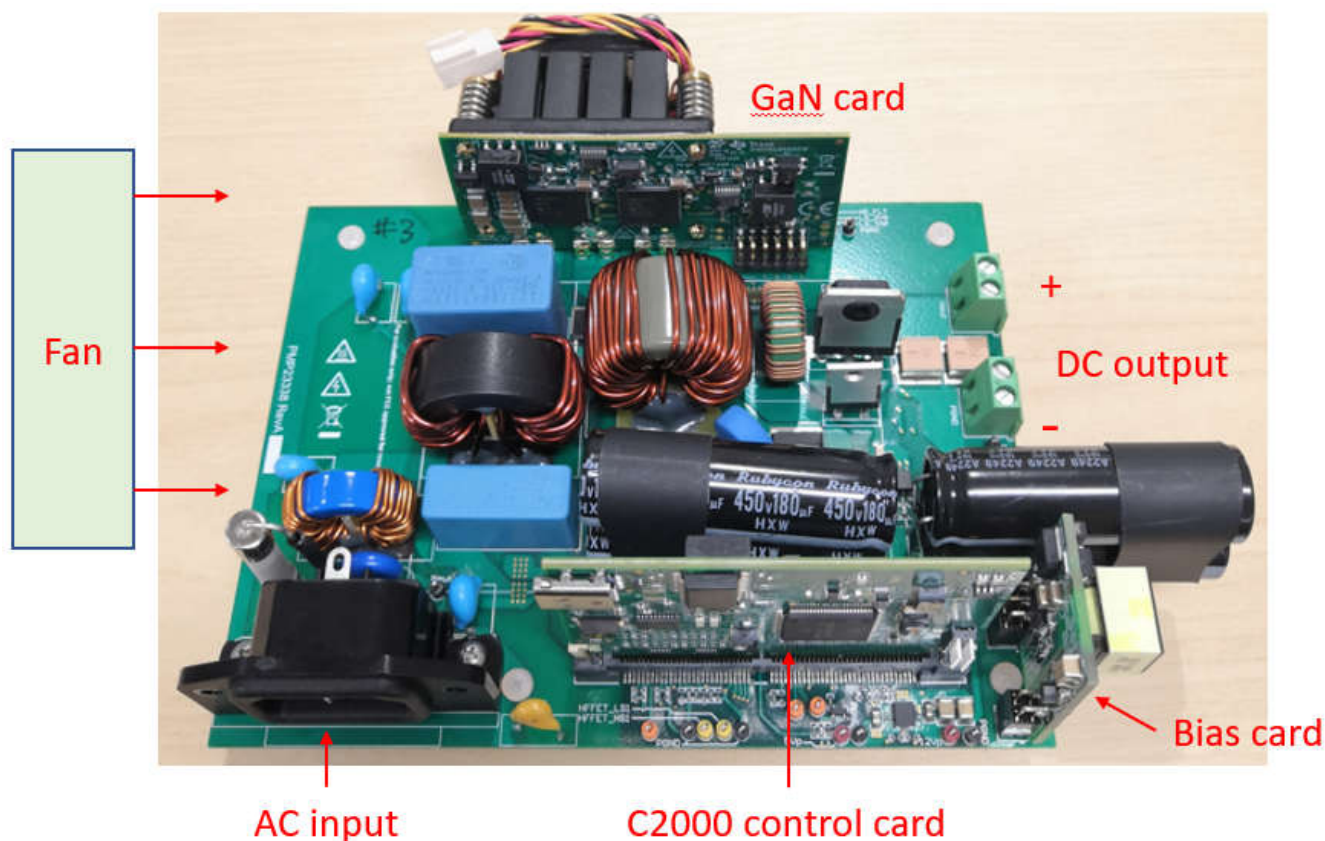


图 3-1. 测试设置

启动序列：

1. 检查 GaN 卡、C2000 控制卡和偏置卡是否已正确且牢固地插入插槽
2. 测试期间使用风扇进行冷却
3. 将高电压负载连接至直流输出，将负载设置为 0.1A
4. 将交流电源连接至交流输入
5. 使用电流探头监测交流输入电流，使用电压表测量直流输出电压
6. 将交流电输出设置为 115V/60Hz，打开交流电源，您会看到直流输出电压被调节为 385V 左右
7. 逐步增加负载。满负载时：1800W @ 115VAC，3600W @ 230VAC

4 实现结果

4.1 启动波形

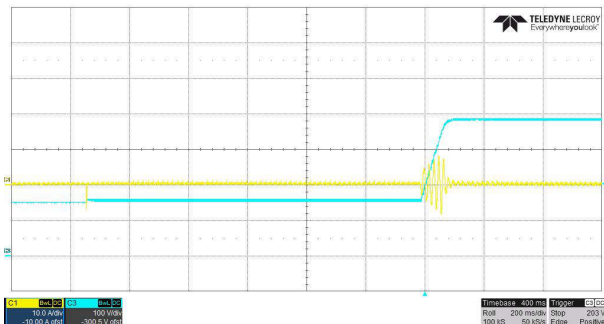


图 4-1. PFC 在 115VAC 且无负载时启动

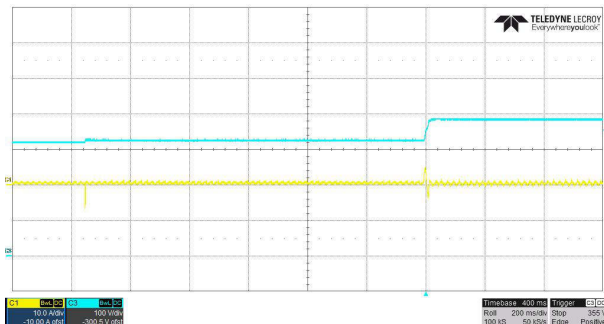


图 4-2. PFC 在 230VAC 且无负载时启动

备注

蓝色：Vout，黄色：Iin

4.2 THD 性能

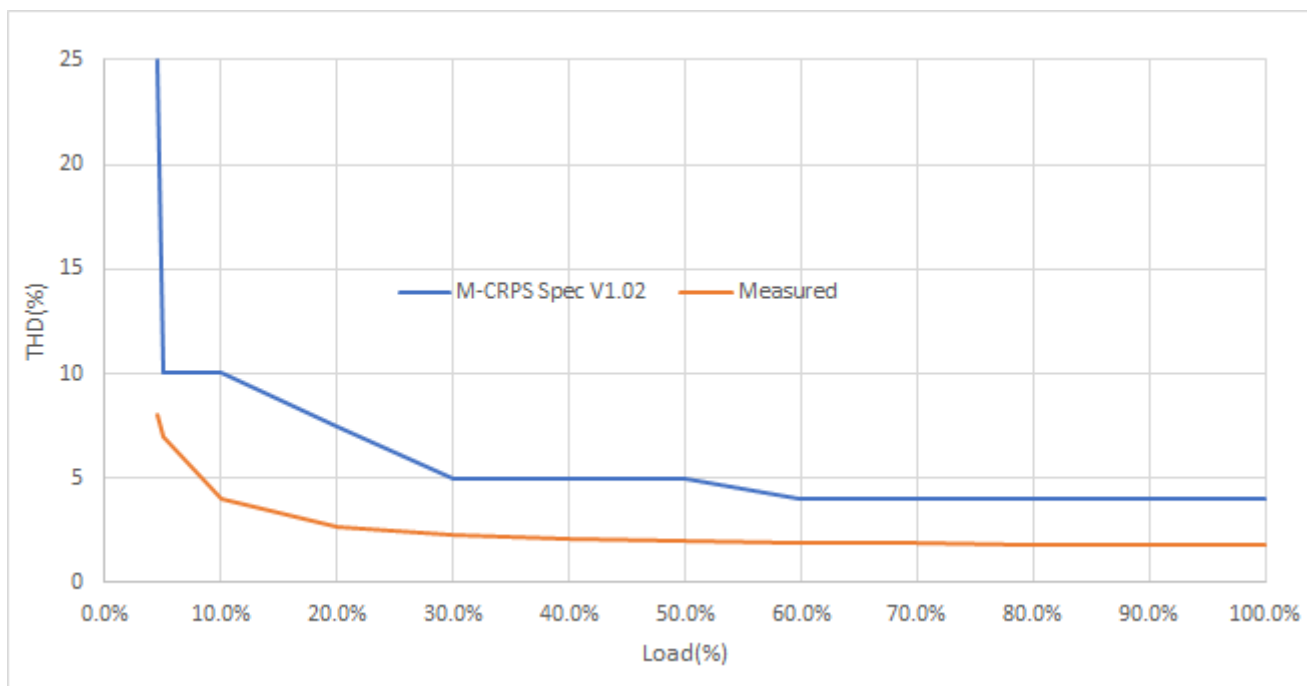


图 4-3. 120VAC 输入时的 THD 图

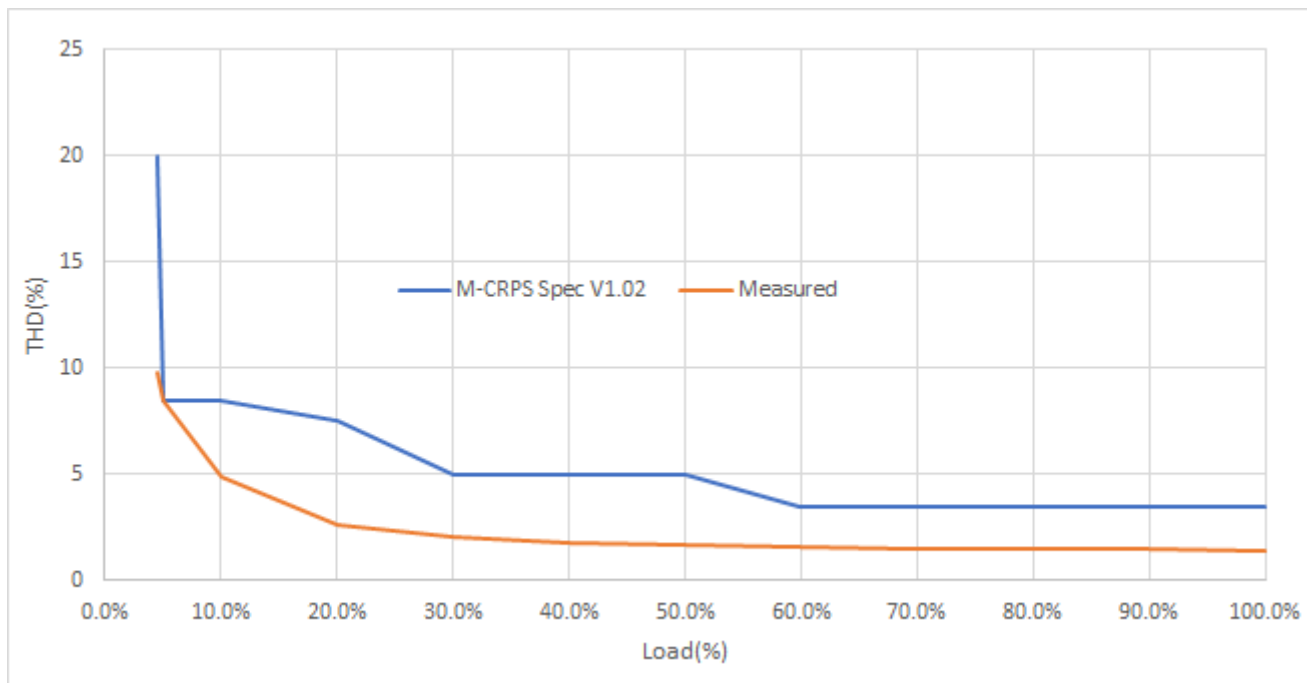


图 4-4. 240VAC 输入时的 THD 图

4.3 功率因数

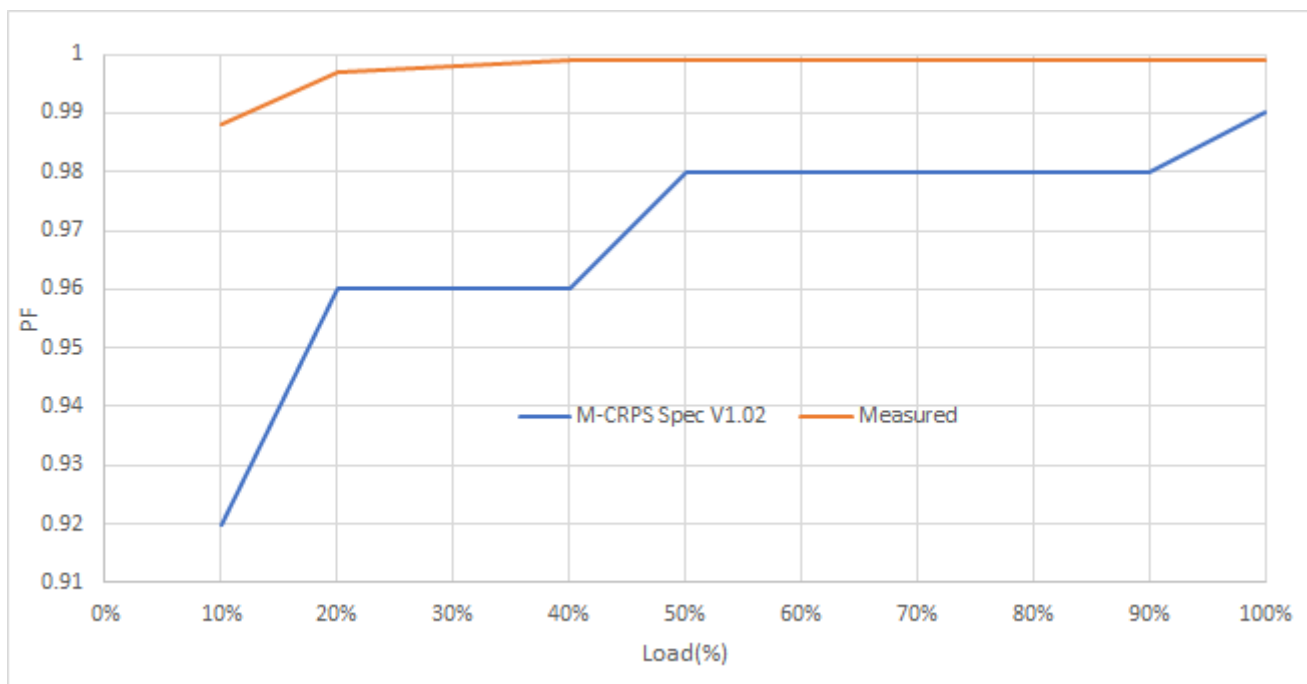


图 4-5. 120VAC 输入时的功率因数

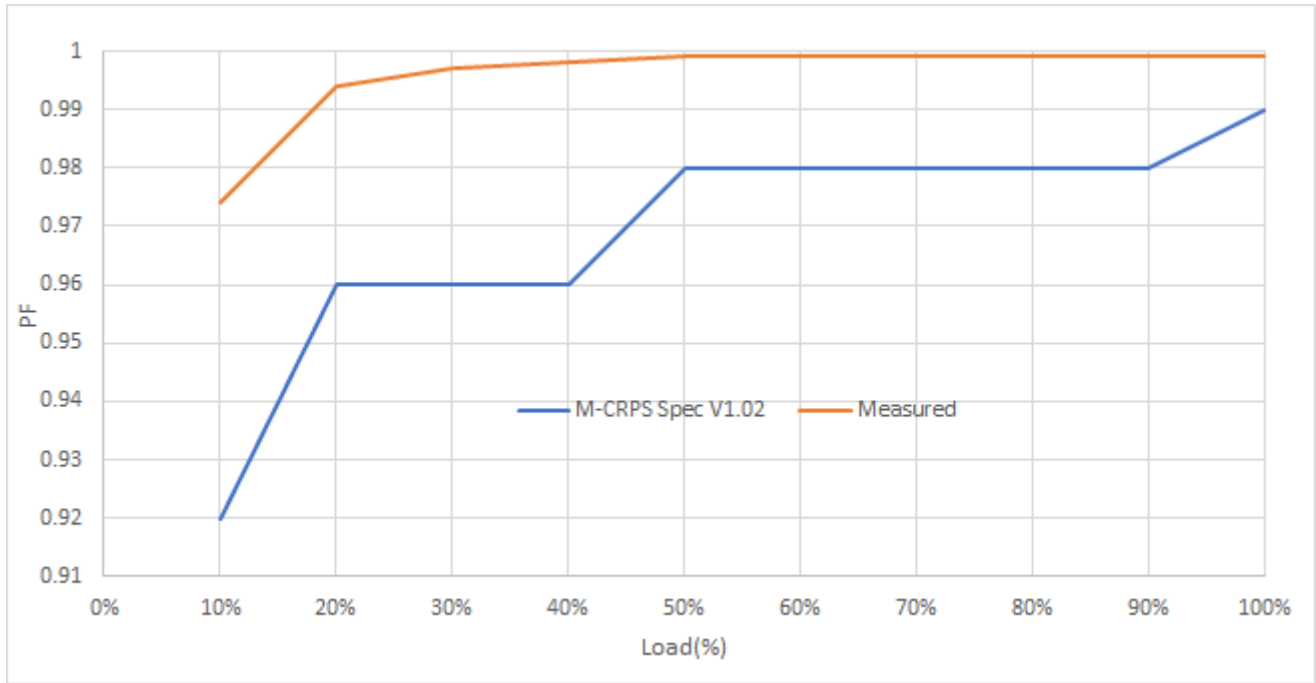


图 4-6. 240VAC 输入时的功率因数

4.4 效率图

条件

- 开关频率：65kHz
- GaN 压摆率：100V/ns
- 输出：385V
- 功率分析仪：WT5000
- 继电器和 BB 旁路 FET 短路
- 不包含辅助电源

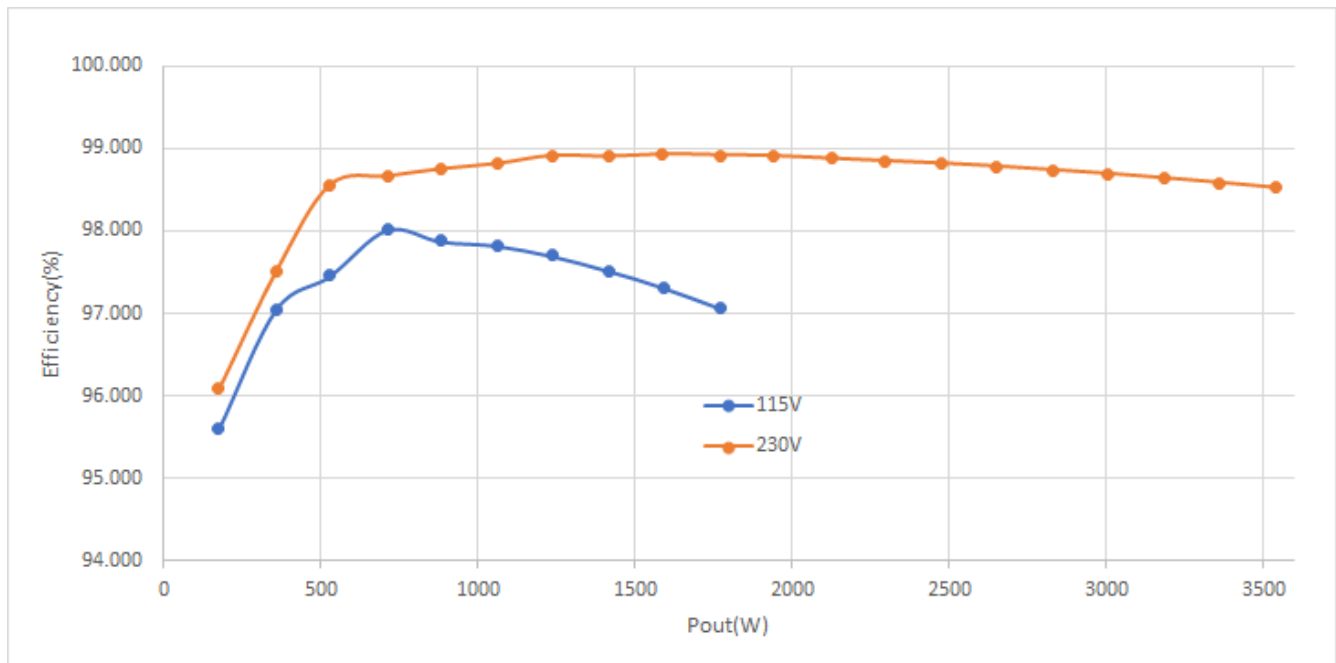


图 4-7. 效率图

4.5 电表性能

测试中使用的功率分析仪：WT5000

4.6 负载瞬态

备注

如下图所示：蓝色：Vout，粉色：lin，黄色：Iout

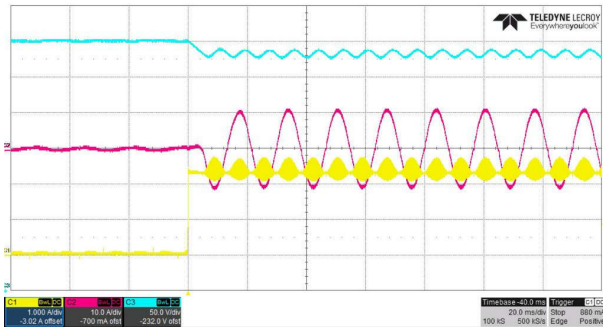


图 4-8. 115VAC，0% -> 50% 负载

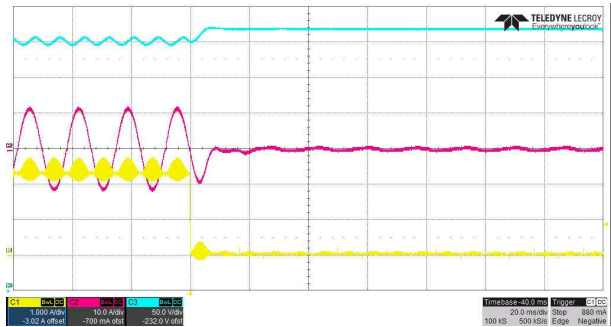


图 4-9. 115VAC，50% -> 0% 负载

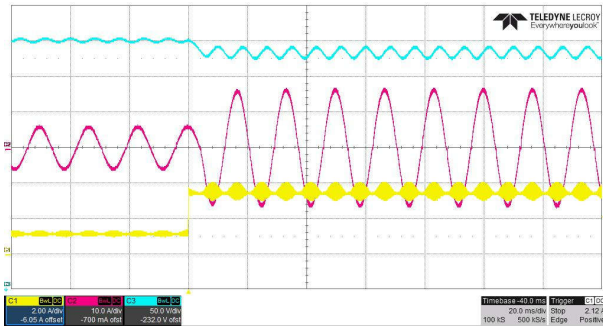


图 4-10. 115VAC，25% -> 75% 负载

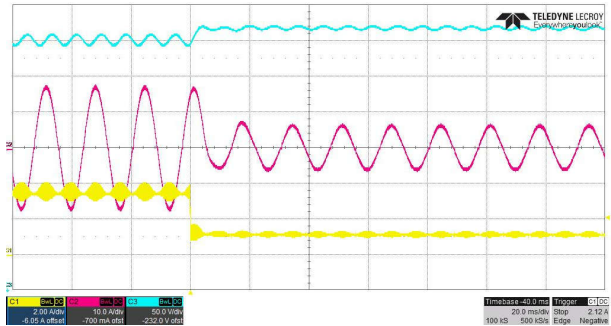


图 4-11. 115VAC，75% -> 25% 负载

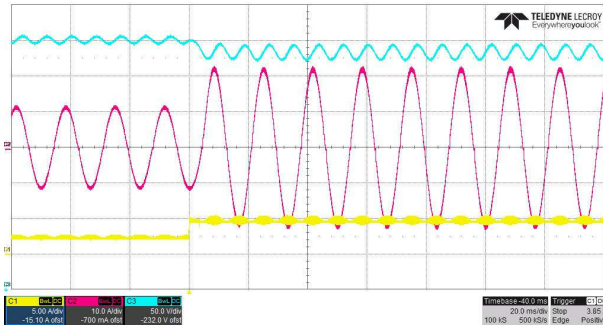


图 4-12. 115VAC，50% -> 100% 负载

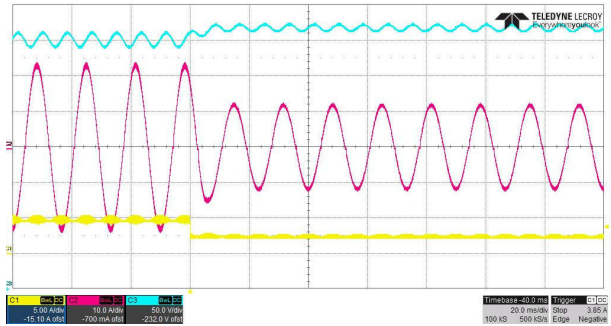


图 4-13. 115VAC，100% -> 50% 负载

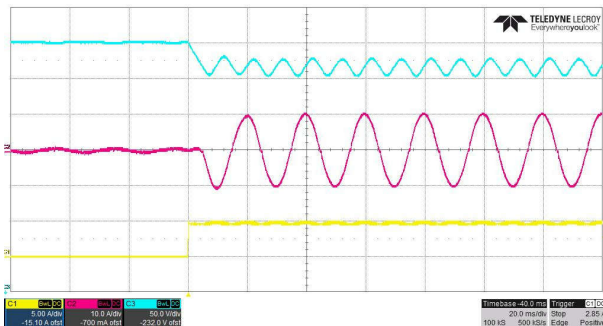


图 4-14. 230VAC，0% -> 50% 负载

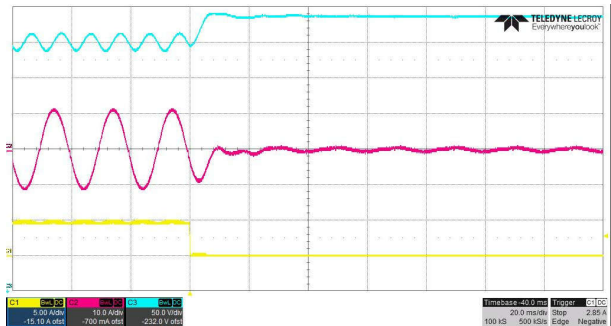


图 4-15. 230VAC，50% -> 0% 负载

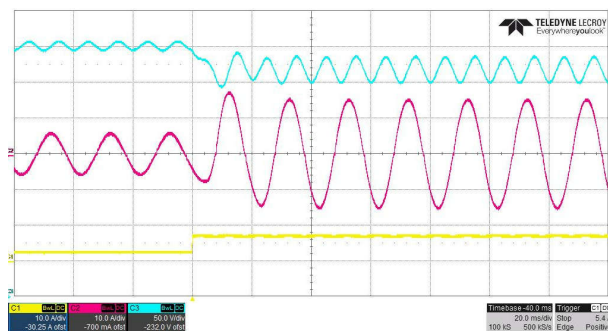


图 4-16. 230VAC , 25% -> 75% 负载

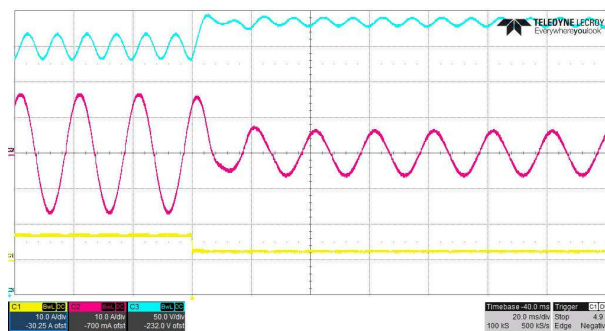


图 4-17. 230VAC , 75% -> 25% 负载

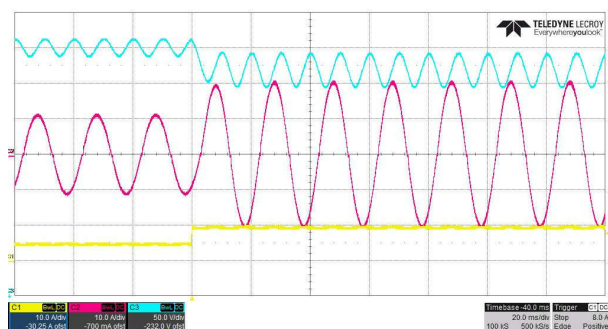


图 4-18. 230VAC , 50% -> 100% 负载

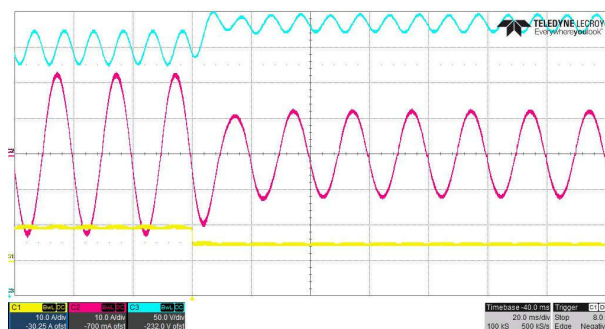


图 4-19. 230VAC , 100% -> 50% 负载

4.7 输入电流波形

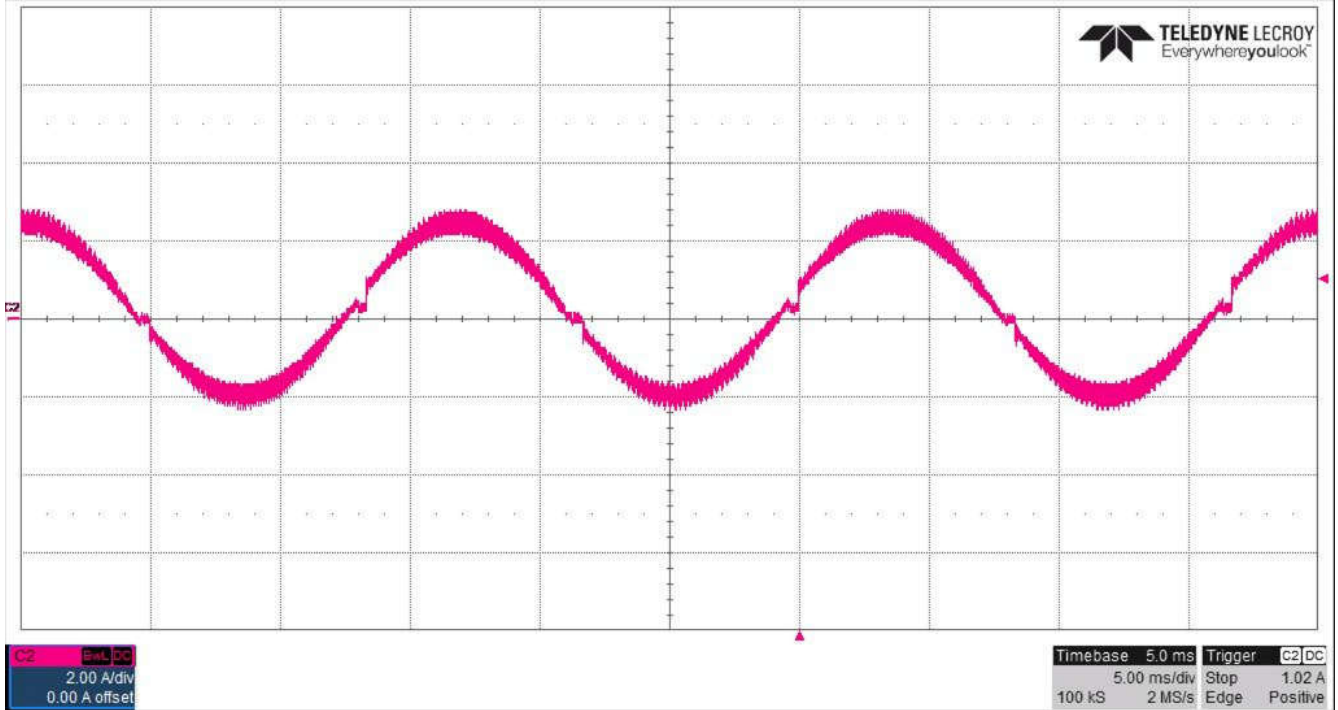


图 4-20. 120VAC 10% 负载

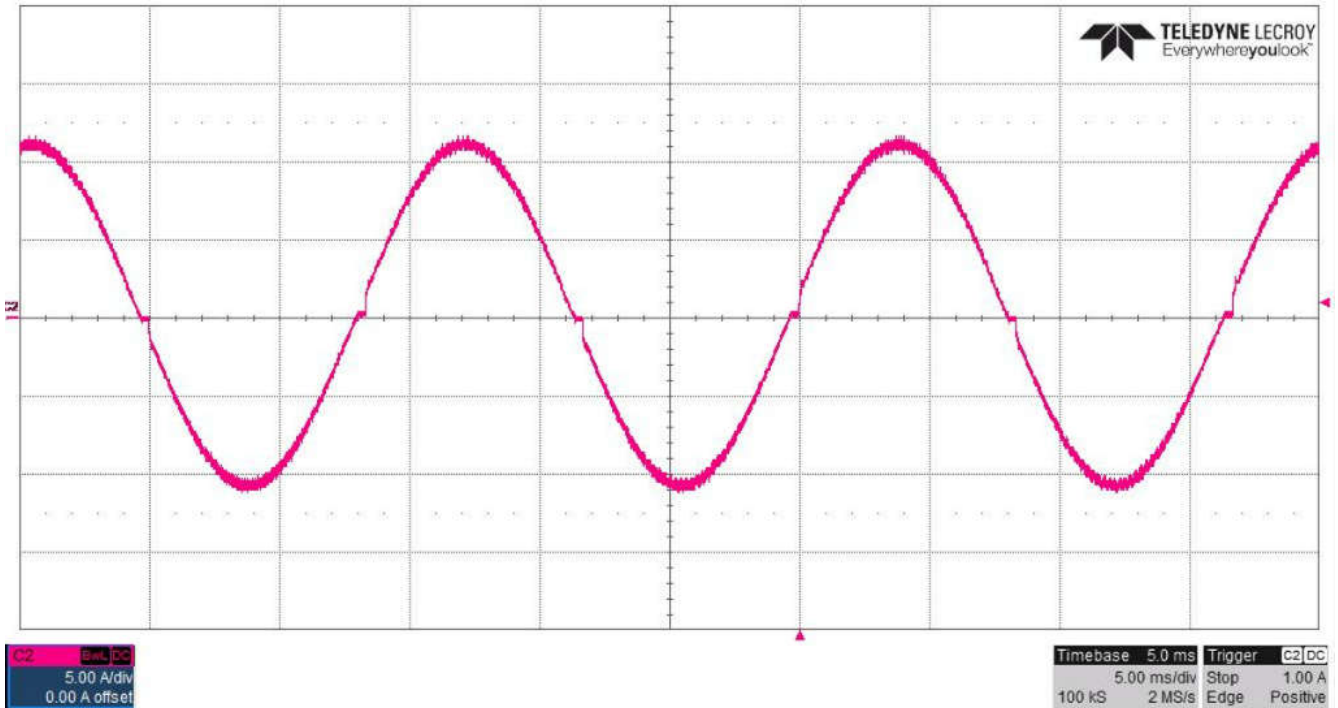


图 4-21. 120VAC 50% 负载

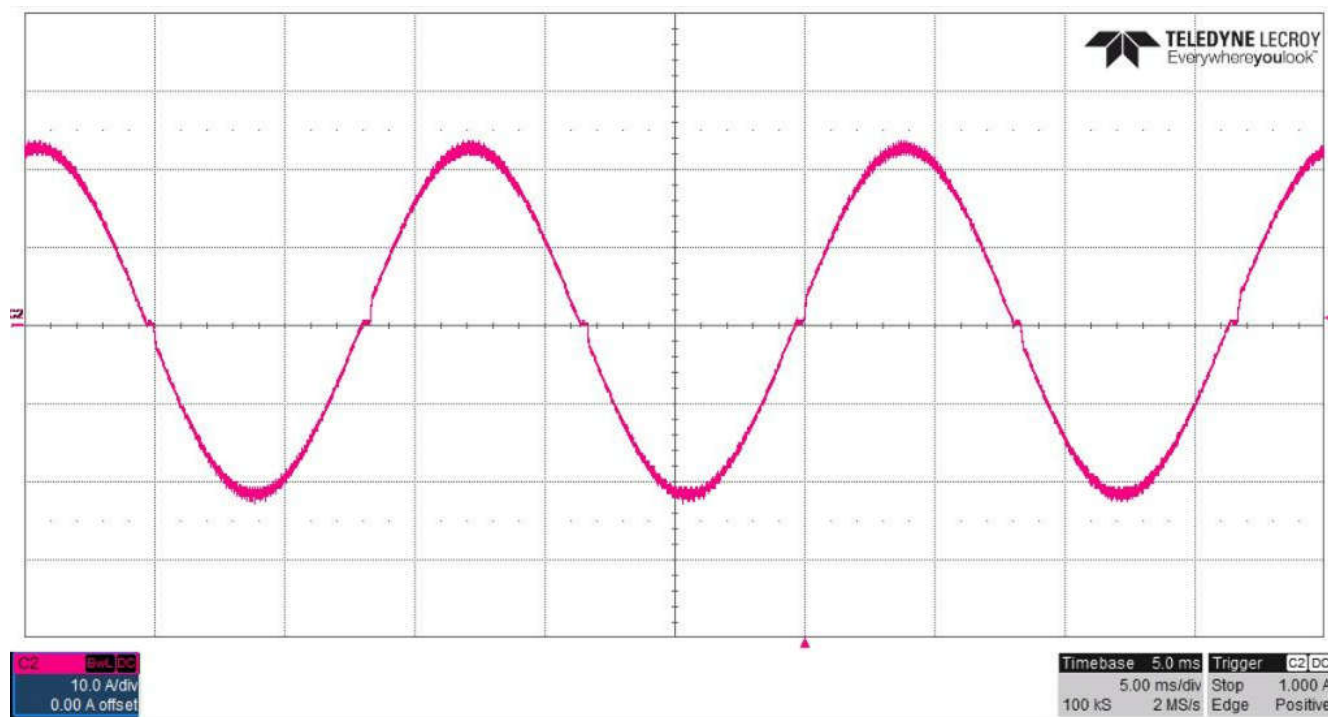


图 4-22. 120VAC 100% 负载

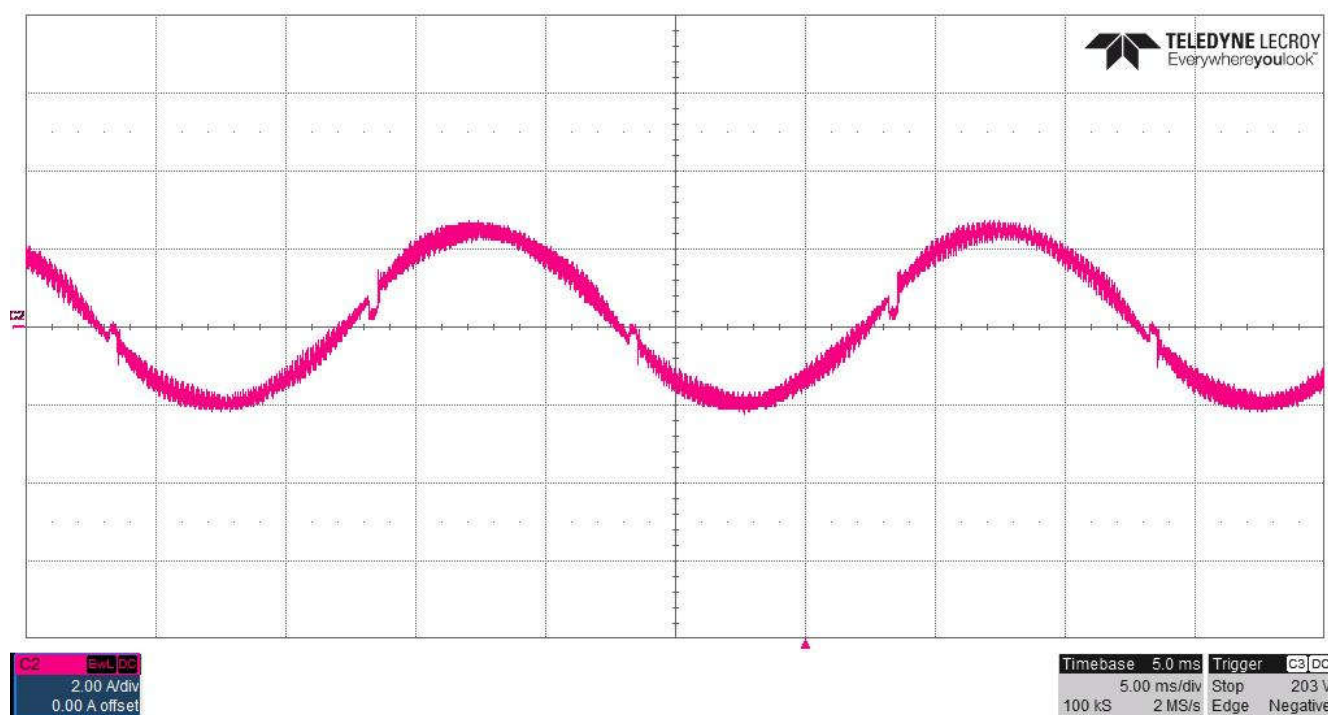


图 4-23. 240VAC 10% 负载

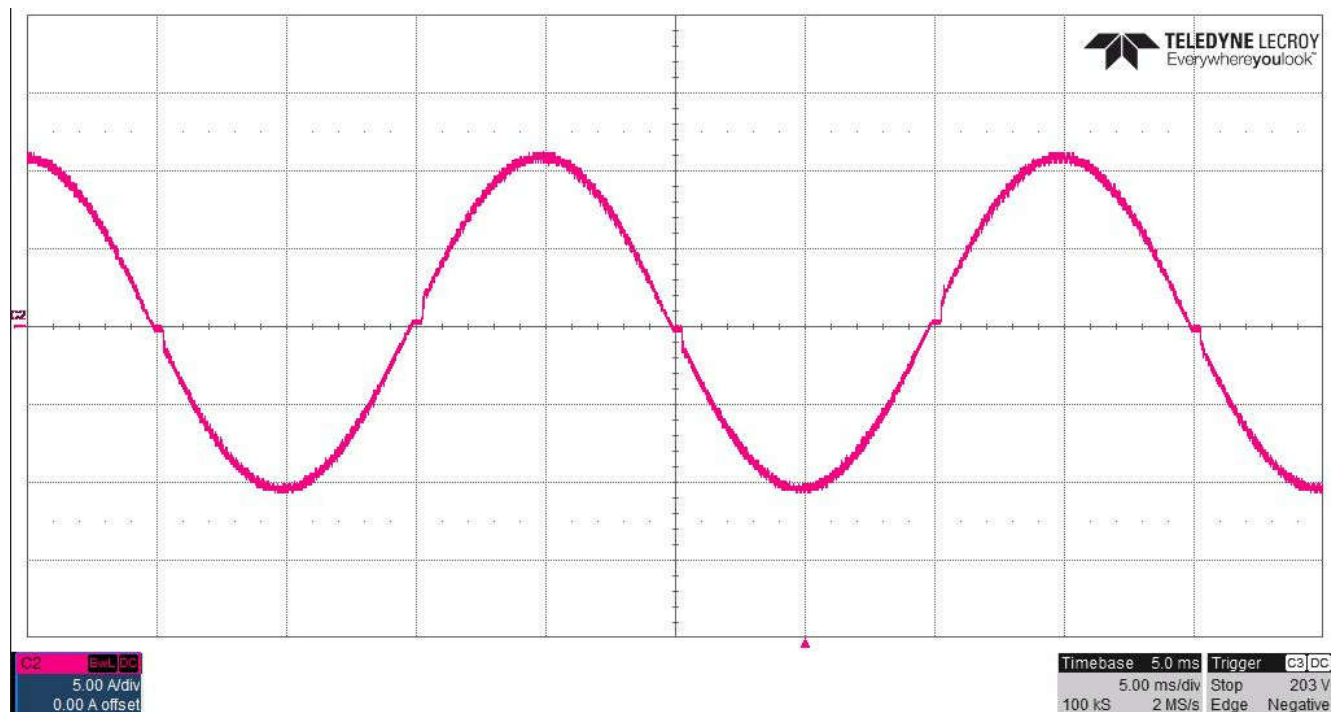


图 4-24. 240VAC 50% 负载

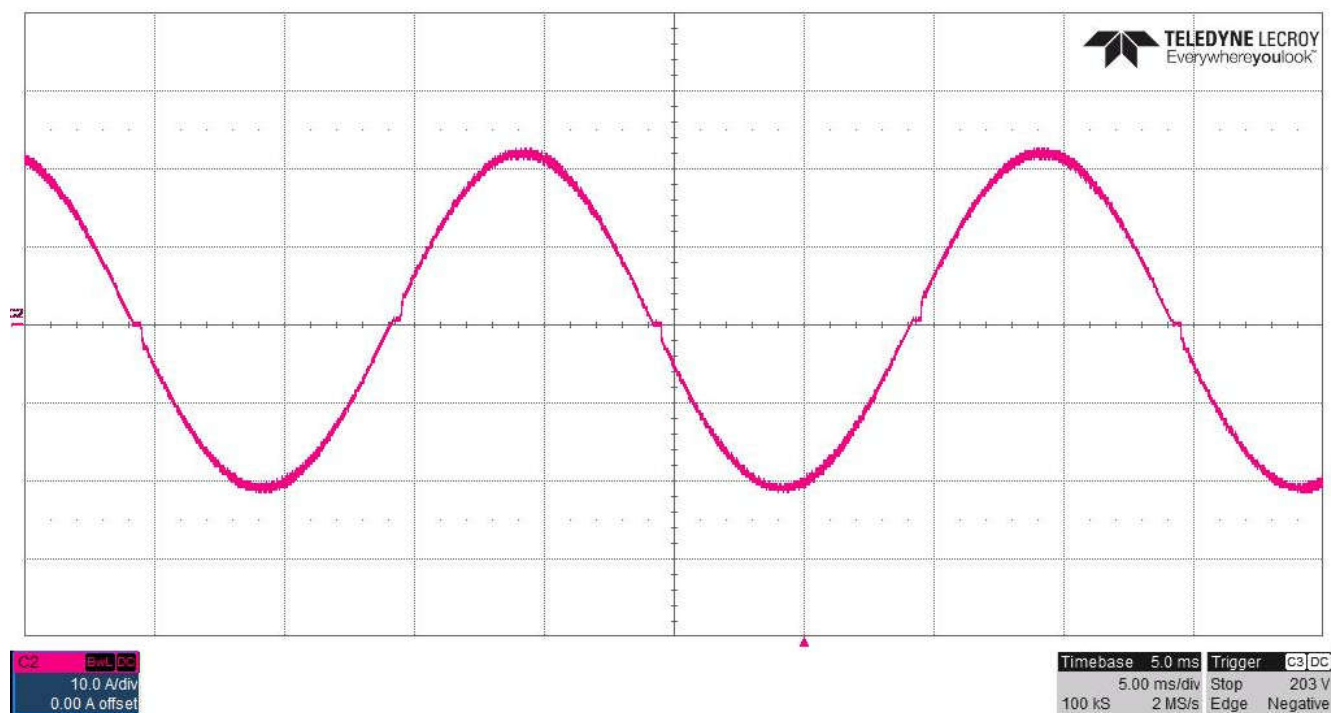


图 4-25. 240VAC 100% 负载

4.8 交流压降测试

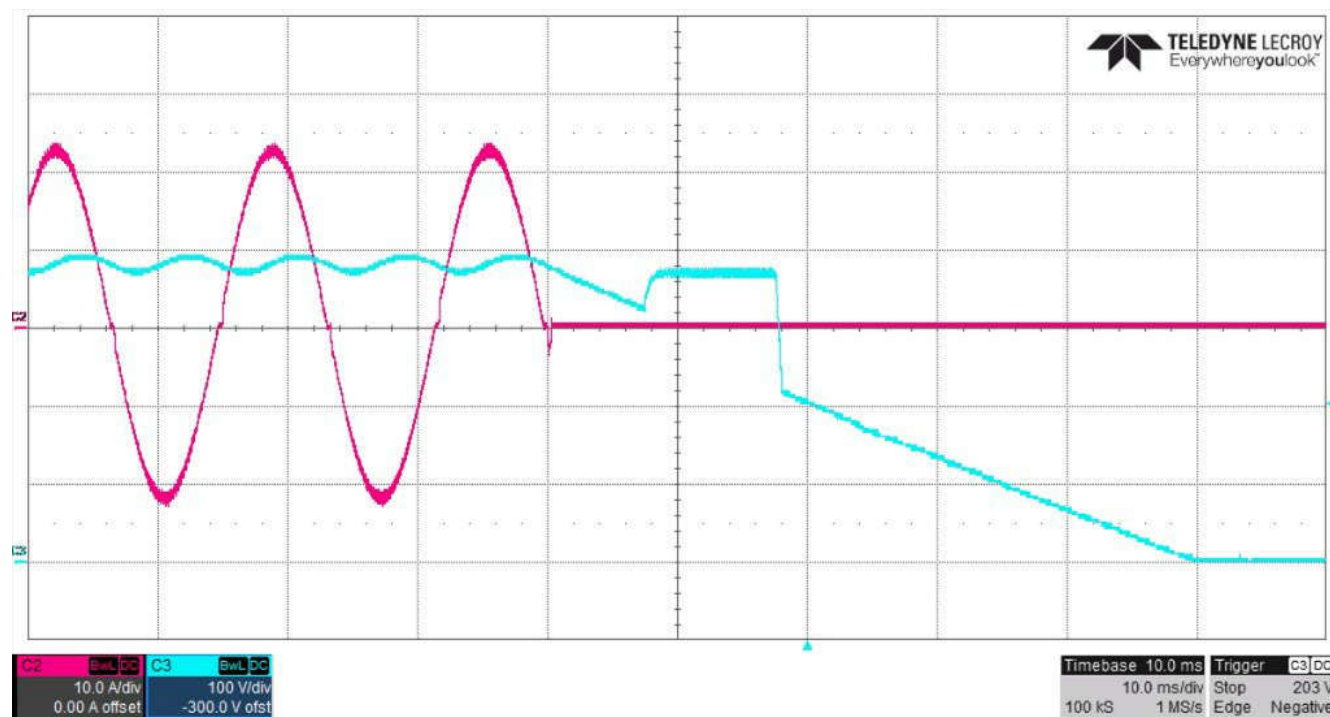


图 4-26. 120VAC , 1800W 负载下的交流压降 (蓝色 : Vout , 粉色 : lin)

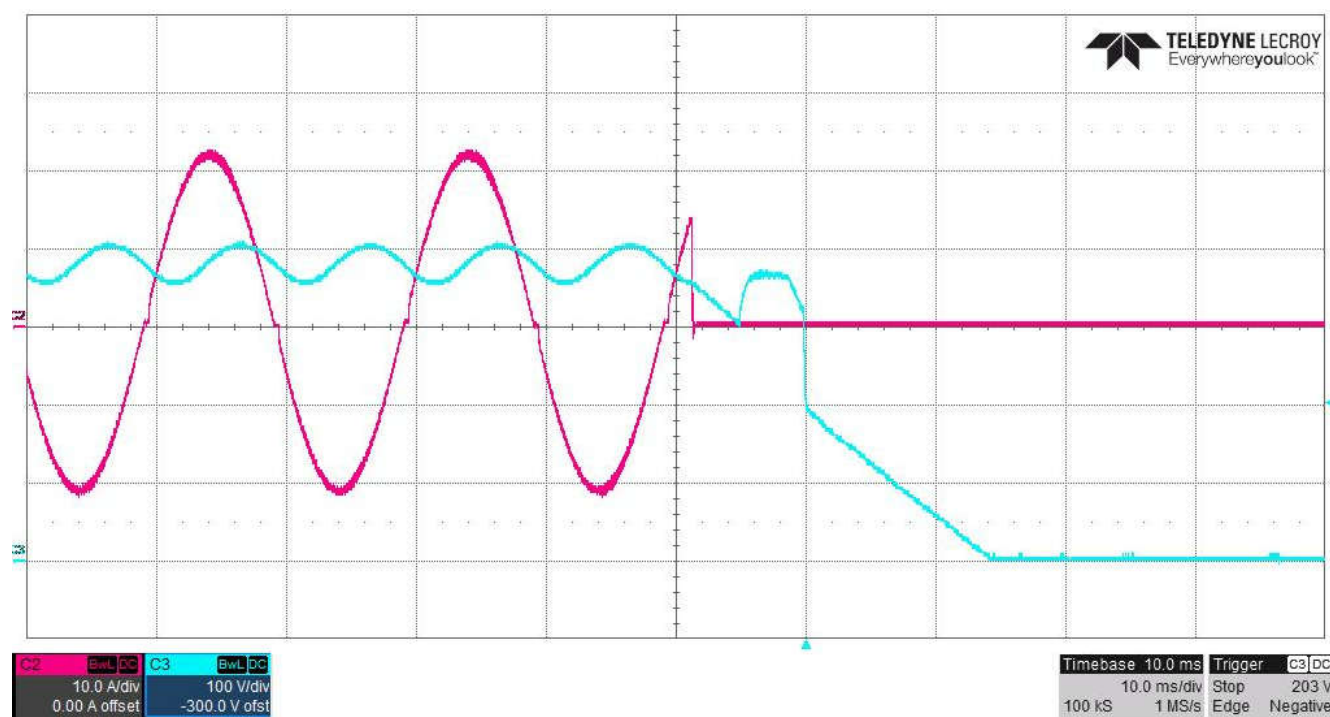


图 4-27. 240VAC , 3600W 负载下的交流压降 (蓝色 : Vout , 粉色 : lin)

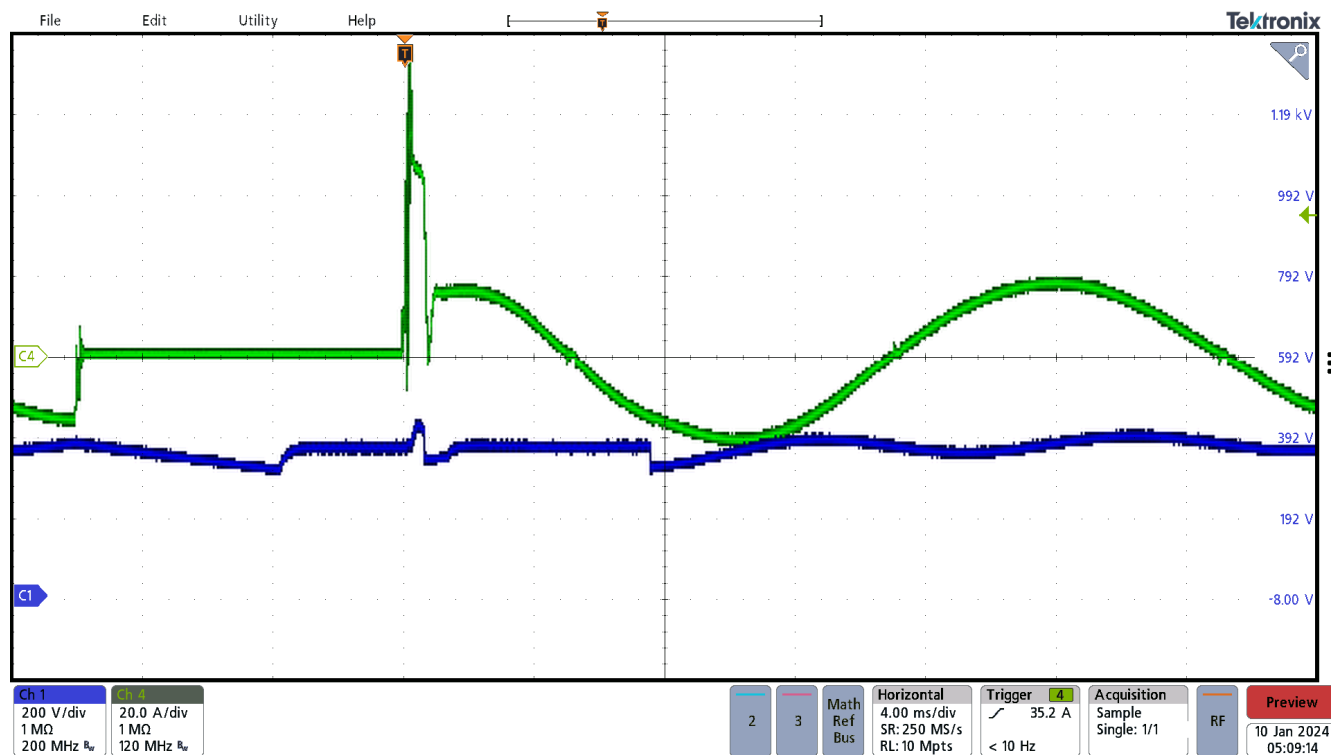


图 4-28. 交流从 10ms 压降返回时的重浪涌电流 (绿色 : lin , 蓝色 : Vout)

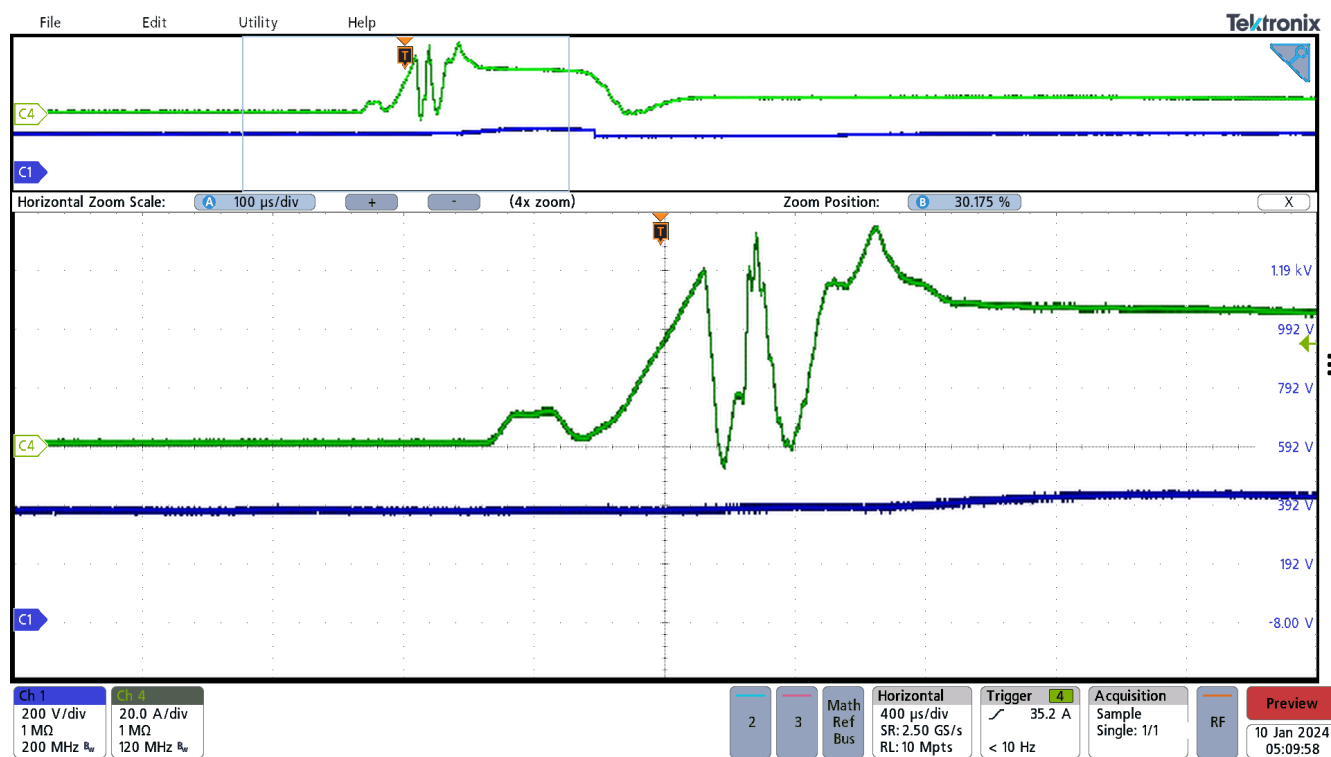


图 4-29. 重浪涌电流放大图

4.9 热像图

测试条件：

输入电压：230 VAC

输出电压：385V

负载：3.6KW

气流方向：与“启动序列”相同

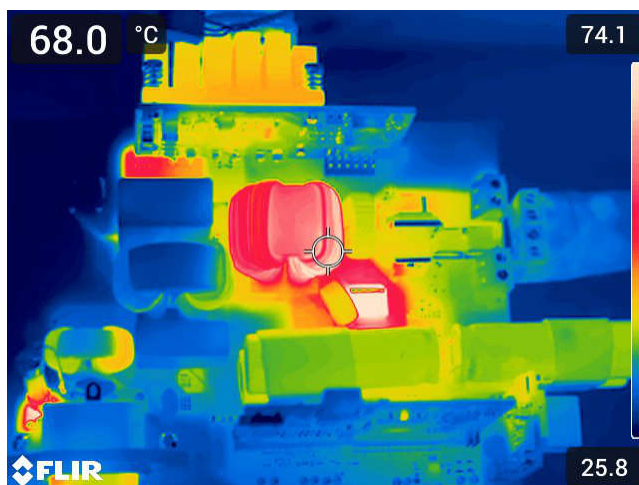


图 4-30. 热像图



图 4-31. 继电器旁路开关热像图

5 硬件设计文件

5.1 设计文件

如需获取 PFC23338EVM-107 设计文件，可前往 [TI.com](https://www.ti.com) 查看该 EVM 的产品页面。

6 相关文档

6.1 补充内容

另请参阅：

- [PMP23338 测试报告 \(PFC 主板 \)](#)
- [PMP23338 参考设计工具页面](#)
- [PMP20306 测试报告 \(辅助电源子卡 \)](#)
- [PMP20306 参考设计工具页面](#)
- [LMG3650R025 GaN 子卡](#)
- [LMG3522R030 GaN 子卡](#)
- [LMG3422R030 GaN 子卡](#)
- [TMDSCNCD280039C 控制卡](#)
- [数字电源软件开发套件](#)
- PMP23338 软件指南：在安装数字电源软件开发套件时，在下载的文件夹中选择：
C2000Ware_DigitalPower_SDK_x_xx_xx_xx → solutions → pmp23338 → docs →
pmp23338_software_guide.pdf
- [数字电源 SDK 入门指南](#)

7 外部基准

- [1] B. Sun, S. Yu, B. Genereaux, L. Yin, "[Design and Control Strategy of PFC During AC Dropout in a High Reliability and High-Power Density Server Power Supply](#)", ECCE 2023
- [2] B. Sun, S. Yu, T. Hud, "A Totem-pole PFC with Re-rush Current Control, Accurate E-metering, Low iTHD and High Power Density", APEC 2024
- [3] Modular Hardware System – Common Redundant Power Supply (MCRPS) Base Specification. Open Compute Project, Version 1.02 RC2, Aug. 23, 2023. [[Online](#)].
- [4] J. Kim, B. McDonald, S. Yu, "[AC Dropout Algorithm for Digitally Controlled Totem-pole Bridgeless PFC](#)", APEC 2023
- [5] B. Sun, "[How to reduce THD of a PFC](#)", April 2023, EDN
- [6] S. Yu, "[Current sensing considerations in a bridgeless totem pole PFC](#)", June 2022, EDN
- [7] R. Yin, "[Five major trends in power supply design for servers](#)", August 2022, EDN
- [8] B. Sun, "[How to improve the power factor of a PFC](#)", January 2024, EDN

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司