

使用 C2000™ MCU 的双向交错式 CCM 图腾柱无桥 PFC 参考设计



说明

此参考设计说明了一种使用 C2000™ 微控制器 (MCU) 和 LMG3410R070 控制双向交错式连续导通模式 (CCM) 图腾柱 (TTPL) 无桥功率因数校正 (PFC) 功率级的方法。此电源拓扑支持双向潮流 (PFC 和并网逆变器) 且使用氮化镓 (GaN) 器件, 可提高效率并减小电源尺寸。该设计可利用切相和自适应死区时间来提高效率, 通过输入电容补偿方案提高轻负载下的功率因数, 并借助非线性电压环降低 PFC 模式下的瞬态电压尖峰。此参考设计中的硬件和软件可帮助您缩短产品上市时间。

资源

TIDM-02008	设计文件夹
TMS320F280049 、 TMS320F28075	产品文件夹
LMG3410R070 、 UCC27714 、 ISO7831	产品文件夹
OPA2376 、 SN74LVC1G3157DRYR 、 TLV713	产品文件夹
C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK	工具文件夹

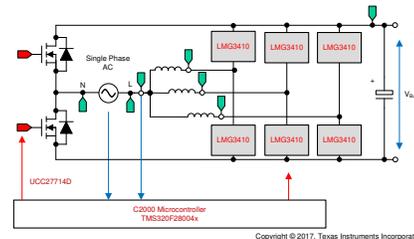


特性

- 交错式 3.3kW 单相双向无桥式 CCM 图腾柱 PFC 级
- 100kHz 脉宽调制 (PWM) 开关
- 可编程输出电压, 标称值为 380V 直流输出电压
- 总谐波失真 (THD) 小于 2%
- 峰值效率高于 98%
- 提供 powerSUITE™ 支持, 以使设计轻松满足用户要求
- 具有软件频率响应分析器 (SFRA), 可实现对开环增益的快速测量
- 具有 PWM 软启动功能, 可降低 TTPL PFC 中的零电流尖峰
- 对使用驱动程序库的 F28004x 提供软件支持
- 在 C28x 或 CLA 上运行控制环路时保持的相同源代码

应用

- 电动汽车 (EV) 车载充电器
- 电信整流器
- 驱动器、焊接和其他工业应用
- 能源存储系统 (ESS)



NOTE

TIDM-02008 是 TIDM-1007 (单向 PFC) 的更新版本。这两种设计采用相同的硬件, 但 TIDM-02008 通过软件更新实现了双向 PFC。TIDM-02008 包括原始设计提供的所有功能, 因此它是 TIDM-1007 的超级集合, 且 TIDM-1007 的技术支持将继续作为更新版 TIDM-02008 的一部分。

NOTE

有关 LMG3410R070 产品和供货情况的信息，请参阅 [具有集成驱动器和保护功能的 LMG3410R070 600V 70mΩ GaN](#)。该器件不符合 AEC-Q100 标准。如需更多信息，请联系 TI。

1 系统说明

双向交错式 TTPL PFC 是一种倍受青睐的拓扑，适用于电动汽车充电器、工业应用和并网储能系统，而且趋向于具有更高的功率、更高的效率和更高的功率密度。图 2-1 所示为双向 TTPL 无桥 PFC 在 TIDM-02008 电路板上的实现。

1.1 主要系统规格

表 1-1 介绍了双向交错式 CCM TTPL PFC 参考设计电源规格。

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格	
	PFC 模式	逆变器模式 (并网)
输入电压	交流 120Vrms VL-N, 60Hz 或 交流 230Vrms VL-N, 50Hz	380V 直流 (总线标称值)
输入电流	16A (均方根最大值)	10A (最大值)
输出电压	380V 直流 (总线标称值)	交流 120Vrms VL-N, 60Hz 或 交流 230Vrms VL-N, 50Hz
输出电流	10A (最大值)	16A (均方根最大值)
额定功率	1.65KW (单相 120Vrms) 或 3.3KW (单相 230Vrms)	
电流 THD	小于 2% (120Vrms L-N 额定负载)	
效率	230Vrms 输入时峰值为 98.7% , 120Vrms 输入时峰值大于 97.7%	230Vrms 输出时峰值为 98.3% , 120Vrms 输出时峰值大于 97.3%
初级滤波电感器	478μH	
输出电容	880μF	
PWM 开关频率	100kHz	

**WARNING**

TI 建议，该参考设计仅可在 **实验室环境中运行**，不可作为成品 供一般消费者使用。

TI 建议，该参考设计仅可由熟悉处理高压电子和机械部件、系统及子系统所存在相关风险的 **合格工程师和技术人员** 使用。

电路板中存在可接触的高电压。如电路板的电压和电流处理不当或施加不正确，则将可能导致电击、火灾或伤害。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。



CAUTION

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

高电压！ 电路板中存在可接触的高电压。可能发生电击。如电路板的电压和电流处理不当，则可能会导致电击、火灾或伤害。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。为安全起见，强烈建议使用具有过压和过流保护功能的隔离式测试设备。

TI 认为在对电路板通电或进行仿真之前，用户有责任确认其已明确并理解电压和隔离要求。通电后，请勿触摸该设计或与该设计相连的元件。

表面高温！ 接触可能会导致烫伤。请勿触摸！

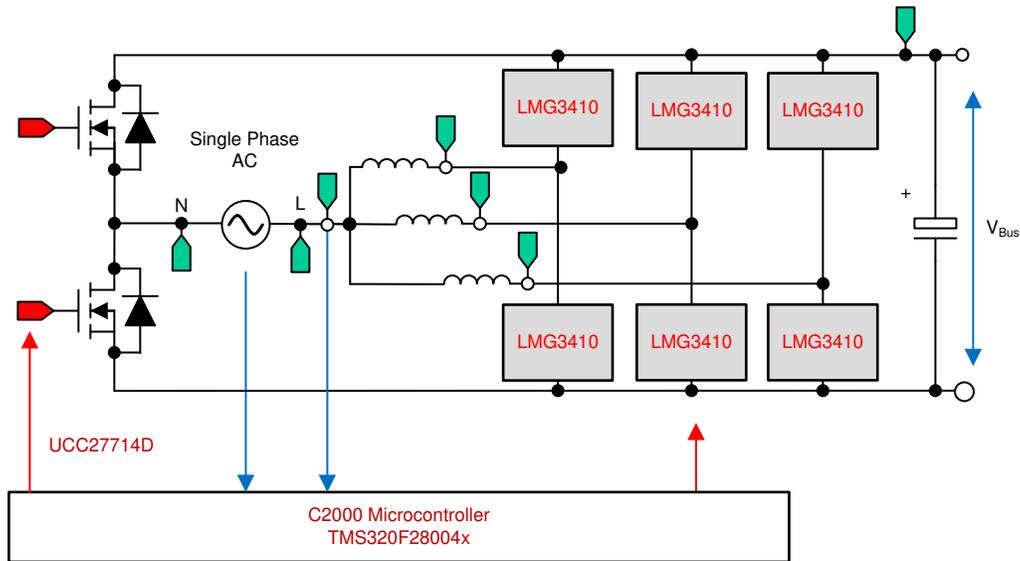
电路板加电后，某些元件可能会达到 55°C 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时，用户不得触摸电路板，因为可能存在高温。

2 系统概述

双向交错式 TTPL PFC 是一种倍受青睐的拓扑，适用于电动汽车充电器和 ESS，而且趋向于具有更高的功率、更高的效率和更高的功率密度。图 2-1 所示为双向 TTPL 无桥 PFC 在本参考设计中的实现。

2.1 方框图

图 2-1 所示为该参考设计的方框图，并突出显示了主要 TI 元件。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 2-1. 电源拓扑方框图

2.2 设计注意事项

以下部分详细介绍了此设计中的检测电路。也可以参阅 *calculations.xlsx* 文件（位于 C2000Ware Digital Power SDK 安装目录 `<install_location>\solutions\tidm_02008\hardware` 下），了解有关检测电路的详细信息。

2.2.1 输入交流电压感测

线电压和中性点电压被电阻分压器感测为主板的接地电压，如图 2-2 所示。在控制器上减去这两个读数可得到 V_{ac} 感测结果。

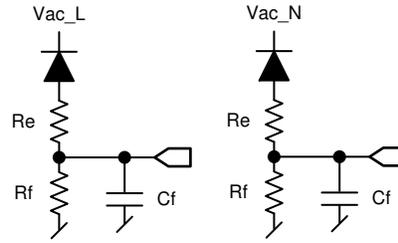


图 2-2. 输入交流电压感测

2.2.2 总线电压感测

同样，总线电压通过电阻分压器进行感测，如图 2-3 所示。

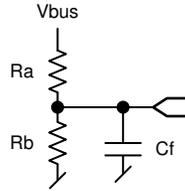


图 2-3. 总线电压感测电路

2.2.3 交流电流感测

霍尔效应传感器可感测总电流，但具有内置失调电压，且该失调电压的范围不在 ADC 可测量的范围内。因此，使用如图 2-4 所示的电路对电压进行调节，从而匹配 ADC 范围。

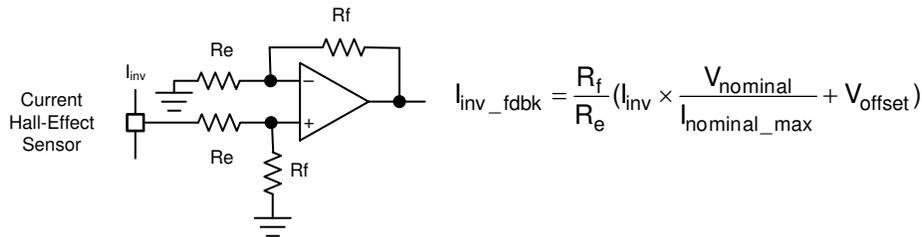


图 2-4. 使用霍尔效应传感器进行电流感测

2.2.4 检测滤波器

在连接到控制器之前，使用 RC 滤波器对信号进行滤波。该设计的所有检测信号共用一个 RC 滤波器，如图 2-5 所示。

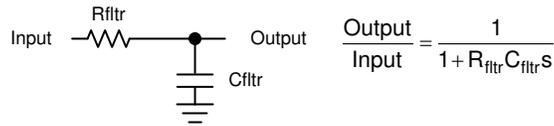


图 2-5. RC 滤波器

2.2.5 保护 (CMPSS)

大多数电力电子转换器需要过流事件保护功能。对于该设计，需要用到多个比较器，并且必须针对跳闸生成基准，如图 2-6 所示。

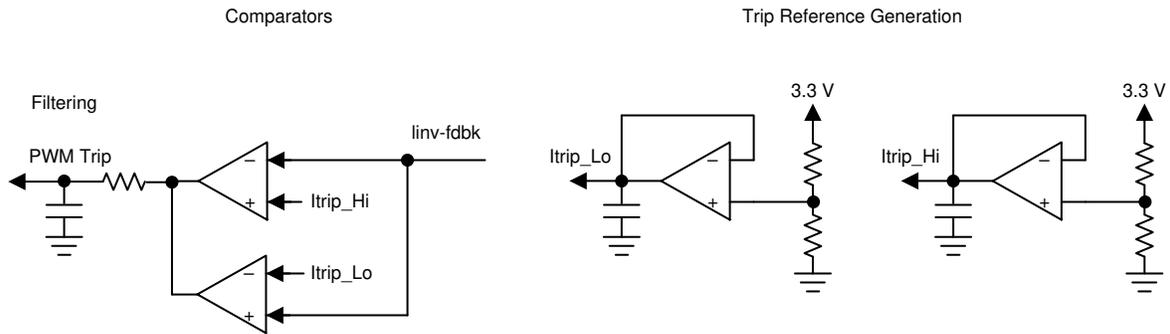


图 2-6. 使用比较器和基准生成器为 PWM 生成跳闸

在使用 TMS320F28377D 等 C2000 MCU 时，避免了所有这些电路，这些 MCU 具有作为 CMPSS 一部分的片上窗口比较器，它们在内部连接到 PWM 模块，可以实现 PWM 快速跳闸。片上窗口比较器有助于在最终应用中节省布板空间和成本，因为可通过使用片上资源避免额外的元件，如图 2-7 所示。

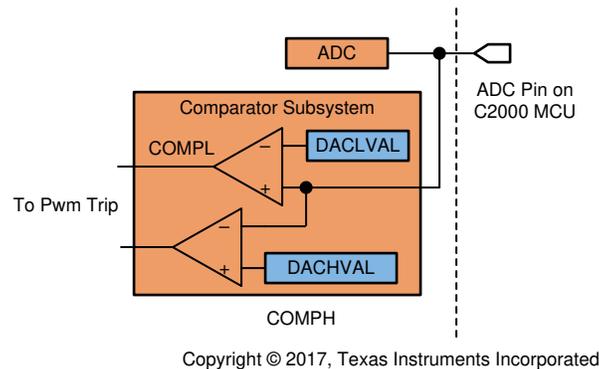


图 2-7. 用于过流保护的 CMPSS

2.3 主要产品

2.3.1 C2000™ MCU F28004x

C2000 MCU 属于经优化的 MCU 系列，适用于实时控制应用。快速且高质量的模数控制器可实现精确的电流和电压信号测量，集成比较器子系统 (CMPSS) 提供了过流和过压保护功能，无需使用任何外部器件。经优化的 CPU 内核可快速执行控制环路。使用片上三角函数加速器 (TMU) 对三角函数运算进行了加速。该解决方案还提供了基于 F28004x 和 F2837x 使用控制律加速器 (CLA) 的选项。CLA 是一款协处理器，用于减轻 CPU 负载并支持在 C2000 MCU 上更快地运行循环或更多函数。

2.3.2 LMG3410R070

LMG3410R070 单通道 GaN 功率级采用 8mm x 8mm QFN 封装，其中包含一个 70mΩ、600V 的 GaN 功率晶体管和专用驱动器。直接驱动架构用于创建常关器件，同时还能提供 GaN 功率晶体管的原生开关性能。当 LMG3410 未通电时，集成的低压硅 MOSFET 将通过源极将 GaN 器件关闭。在正常运行过程中，低压硅 MOSFET 持续保持导通，而 GaN 器件直接由内部产生的负电压电源进行门控。集成的驱动器可提供额外的保护和便利功能。快速过流、过热和欠压锁定 (UVLO) 保护功能有助于创建失效防护系统。该器件的状态由 FAULT 输出指示。内部 5V 低压降稳压器可提供高达 5mA 的电流来为外部信号隔离器供电。最后，可通过外部调节的压摆率以及低电感 QFN 封装尽可能减少开关损耗、漏极振铃和产生的电气噪声。

2.3.3 UCC27714

UCC27714 是一款 600V 高侧/低侧栅极驱动器，具有 4A 拉/灌电流能力，专用于驱动 MOSFET 或 IGBT。该器件包含一个接地基准通道 (LO) 和一个悬空通道 (HO)，后者专用于自举电源操作。该器件具有出色的稳定性和抗噪性，能够在 HS 引脚上的负电压高达 -8VDC 的条件下 (VDD = 12V 时) 维持逻辑正常运行。

2.4 系统设计原理

2.4.1 PWM

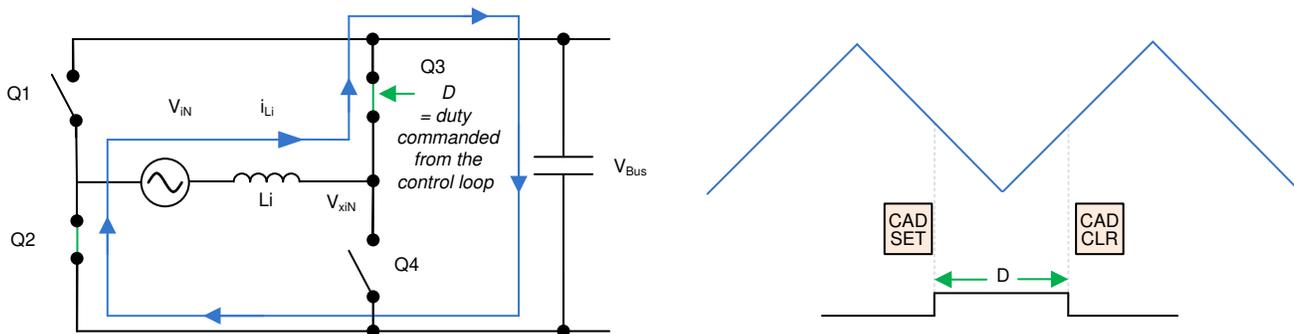


图 2-8. TTPL PFC 的单相图

图 2-8 所示为交错式 TTPL PFC 拓扑的简单单相图。若要控制该整流器，需要对占空比进行控制，以直接调节电压。如果将软件变量 *Duty* 或 *D* 设置为当等于 1 时，Q3 始终为 ON，并且该设置使电压 V_{xiN} 等于 V_{bus} 电压，则可进行此调节。当 *Duty* 设置为 0 时，Q3 从不打开，并且 Q4 始终连接到，使得 V_{xiN} 电压变为 0。

2.4.2 电流环路模型 (PFC 和逆变器模式)

相同的控制环路模型同时适用于 PFC 和并网逆变器操作。若要了解电流环路模型，应首先仔细查看电感器电流。在图 2-8 中，为连接到开关 Q3 和 Q4 的 PWM 调制器提供了占空比 (*D*)。在这里，方程式 1 表达为：

$$V_{xiN} = D \times V_{bus} \quad (1)$$

NOTE

当 *D* 设置为 1 时，Q3 始终为开，而当 *D* 设置为 0 时，Q3 始终为关。

若要调制流经电感器的电流，应使用 Q3 和 Q4 开关的占空比控制来调节电压 V_{xiN} 。假设电流的方向沿从交流线路到整流器的方向为正并使用直流总线前馈和输入交流电压前馈，同时假设电网的阻抗相当小。图 2-9 所示为简化的电流环路，电流环路受控体模型表达为 方程式 2。

$$H_{p_i} = \frac{i_{Li}^*}{D} = \frac{1}{K_{V_gain}} \times K_{i_gain} \times K_{i_fltr} \times G_d \times \frac{1}{Z_i} \quad (2)$$

其中：

- K_{V_gain} 为感测到的最大总线电压的倒数，
- K_{vac_gain} 为感测到的最大交流电压的倒数（在前馈中应用了一个用于标准化该值的因子，因此电流环路模型仅依赖于 K_{V_gain} ）
- K_{i_gain} 为感测到的最大交流电压的倒数， $I_{AC_MaxSense}$
- K_{i_fltr} 为从电流传感器连接到 ADC 引脚的 RC 滤波器的响应
- G_d 为与 PWM 更新相关的数字延迟，数字控制是当前命令
- i_{Li}^* 为当前命令

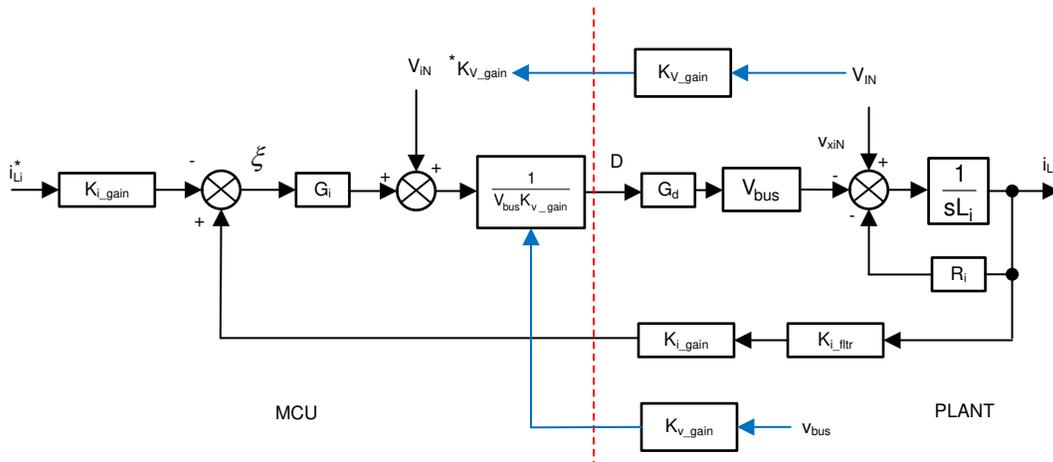


图 2-9. 电流环路控制模型

NOTE

电流环路被视为对电压 V_{xiN} 进行调节，因此在参考上使用了负号。若要增大电流，必须降低 V_{xiN} ，因此在图 2-9 中，对基准电压和电压反馈标记了“+”。

该电流环路模型用于设计电流补偿器。该电流环路使用了一个简单比例积分控制器。

现在，在三个交错相位的情况下，为每个支路提供相同的占空比，因此电流仅增加了三倍。因此，受控体模型表达为 方程式 3。

$$H_{p_i} = \frac{i_{Li}^*}{D} = 3 \times \frac{1}{K_{V_gain}} \times K_{i_gain} \times K_{i_fltr} \times G_d \times \frac{1}{Z_i} \quad (3)$$

使用 SFRA 库在此设计上验证该模型。图 2-10 所示为模型与测得的开环频率响应，表明了两之间具有良好的相关性。

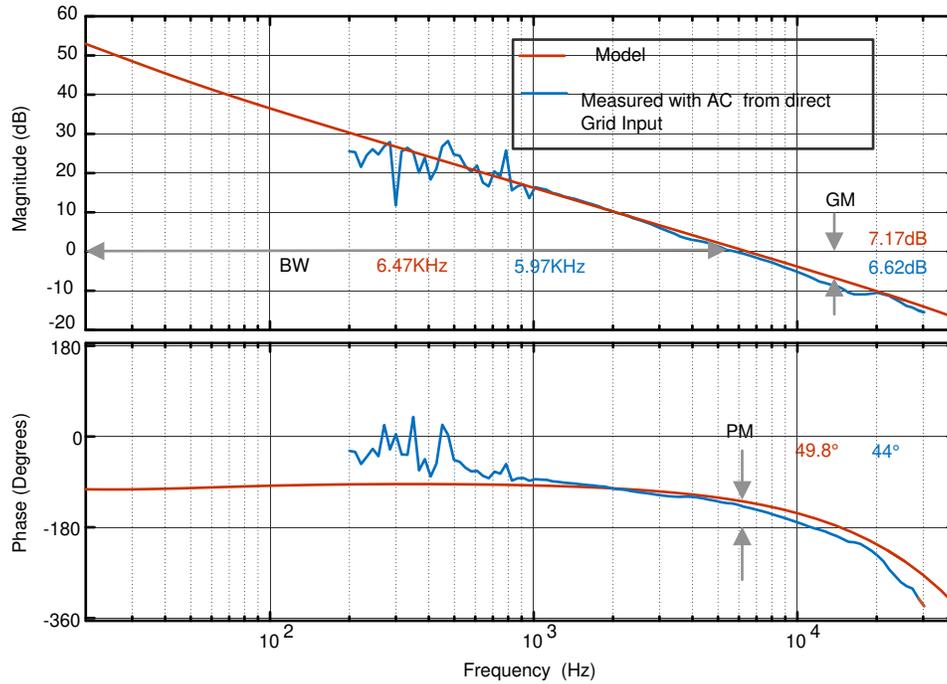


图 2-10. Gi，电流开环增益测量值与建模值

2.4.3 直流总线调节环路 (仅适用于 PFC 模式)

假设直流总线调节环路提供基准电源。然后将基准电源除以线电压 RMS 的平方，可得出电导率，再乘以线电压，以给出瞬时电流命令。

通过围绕运行点对 [方程式 4](#) 进行线性化来形成直流总线调节环路的小信号模型。

$$\hat{i}_{DC} V_{bus} = \eta \bar{V}_{Nrms} \hat{i}_{Nrms} \rightarrow \hat{i}_{DC} = \eta \frac{\bar{V}_{Nrms}}{V_{bus}} \hat{i}_i \quad (4)$$

对于电阻负载，总线电压与电流相关，如 [方程式 5](#) 所示。

$$\hat{V}_{bus} = \frac{R_L}{1 + sR_L C_o} \hat{i}_{DC} \quad (5)$$

可以画出直流电压调节环路控制模型，如图 2-11 所示。施加了额外的 V_{bus} 前馈，以使控制环路独立于总线电压，因此总线控制的受控体模型可表达为方程 6。

$$H_{p_bus} = H_{load} \times \eta \times K_{i_gain} \times K_{v_gain} \times K_{v_flt} \quad (6)$$

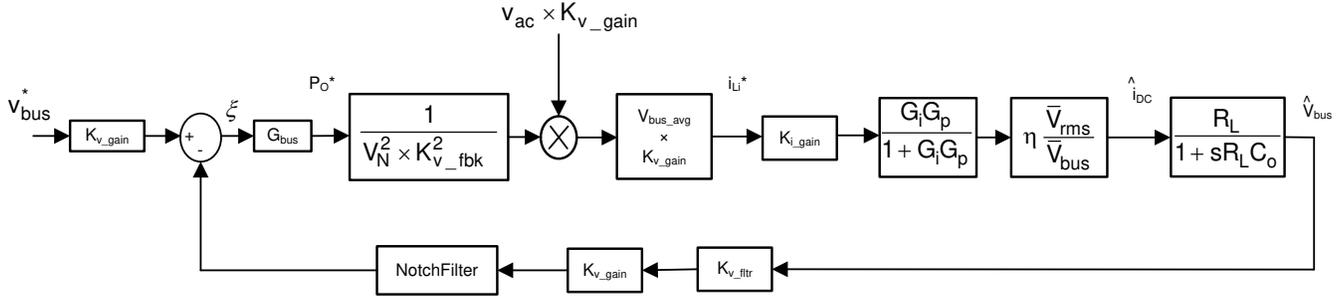


图 2-11. 直流电压环路控制模型

借助图 2-11，为该电压环路设计了一个比例积分器 (PI) 补偿器。该环路的带宽保持在较低水平，因为它在稳态下与 THD 相冲突。

SFRA 库用于测量电压环路上的频率响应并验证模型。图 2-12 所示为电压环路模拟与测量图。

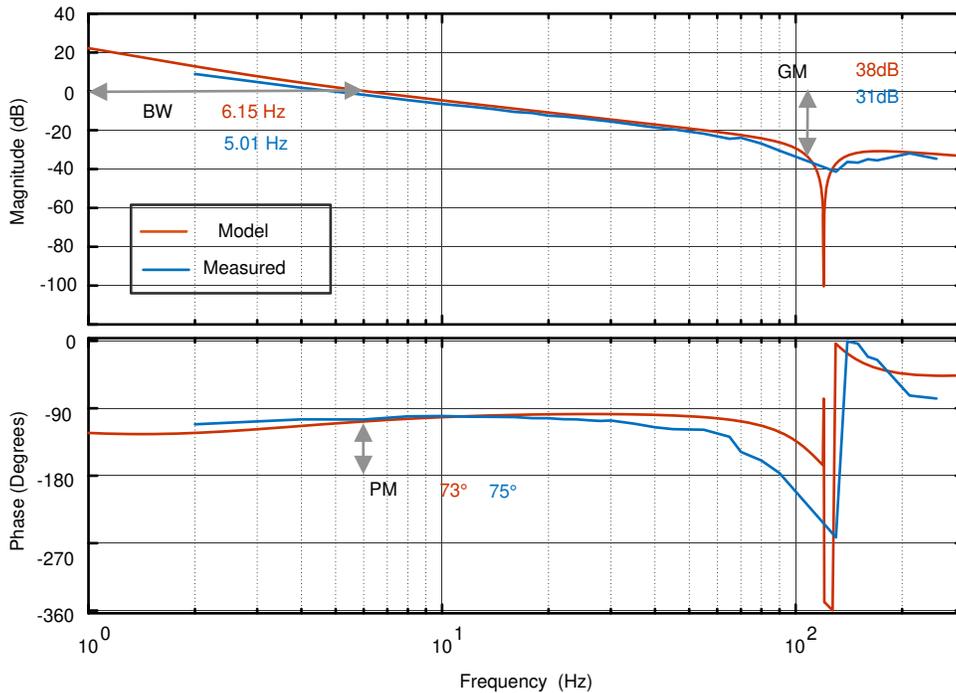


图 2-12. G_v ，电压环路模拟与测量

2.4.4 过零点附近的软启动可消除或减少电流尖峰

对于 TTPL PFC 拓扑，过零点电流尖峰是一个具有挑战性的问题。通过实施软启动方案，即通过状态机按特定时序导通和关断开关，可解决此问题。

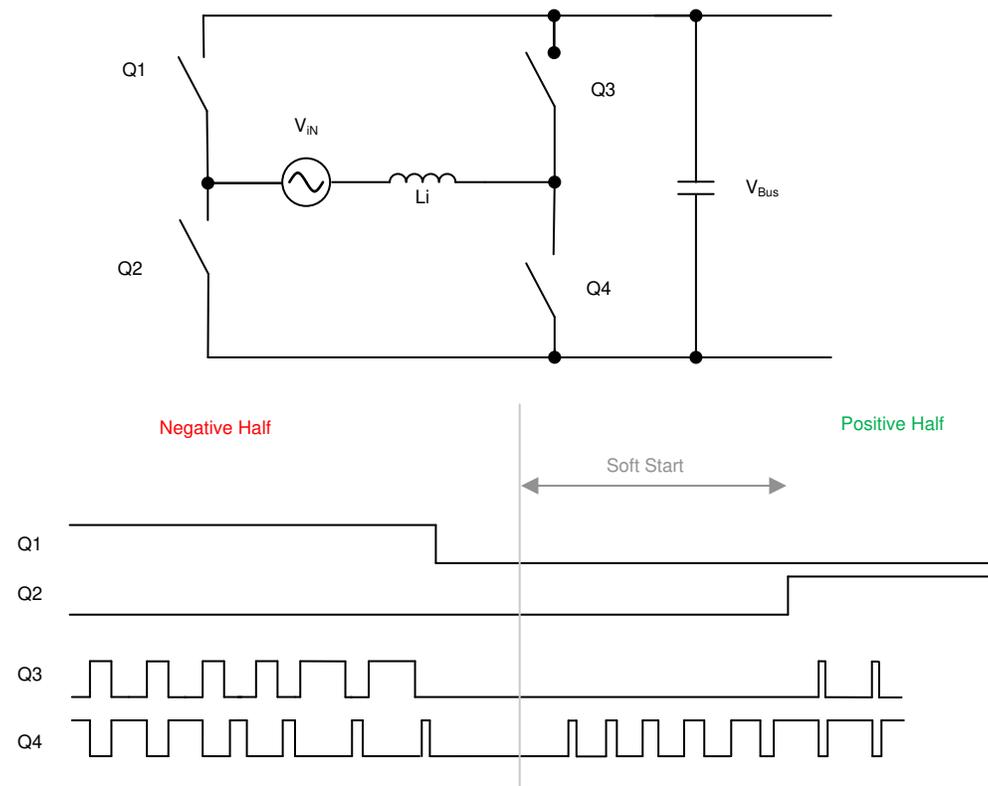


图 2-13. 使用 PWM 序列和软启动功能，可减少过零点处的电流尖峰

图 2-13 所示为交流波从负到正时的开关序列。在负半周期，Q1 导通，Q3 是有源 FET，Q4 是同步 FET。在此期间，Q2 两端的电压是直流总线电压。当交流周期发生变化时，Q2 必须处于 100% 或接近 100%。如果 Q2 立即导通，则会产生巨大的正尖峰。因此，使用软启动序列导通 Q4，如图 2-13 所示。这种软启动的调谐取决于电感值和其他功率级参数，例如器件静态输出电容 (C_{oss})。

过零点附近出现负电流尖峰的另一个原因是零交叉附近的交流电压相对较低。当 Q3 导通时，虽然占空比很低，但会施加高电压差，并会导致高负电流尖峰。因此，在 Q3 再次开始切换回之前应用了足够的延迟。

类似地，在软启动开始后，Q2 会延迟一段时间开启。

2.4.5 交流中断测试

交流中断测试需要准确检测交流故障和交流恢复事件，从而停止和恢复 PFC 操作。交流中断测试中的重大技术挑战是交流电恢复时的 PLL 同步问题。通常，基于 SW 的 PLL 需要几个周期才能赶上电网相位，因此它无法在此过渡期间提供与电压同相的电流基准。图 2-14 所示为理想的交流中断测试波形。在交流电恢复后，PLL 立即追上交流电网并恢复正常的 PFC 操作。

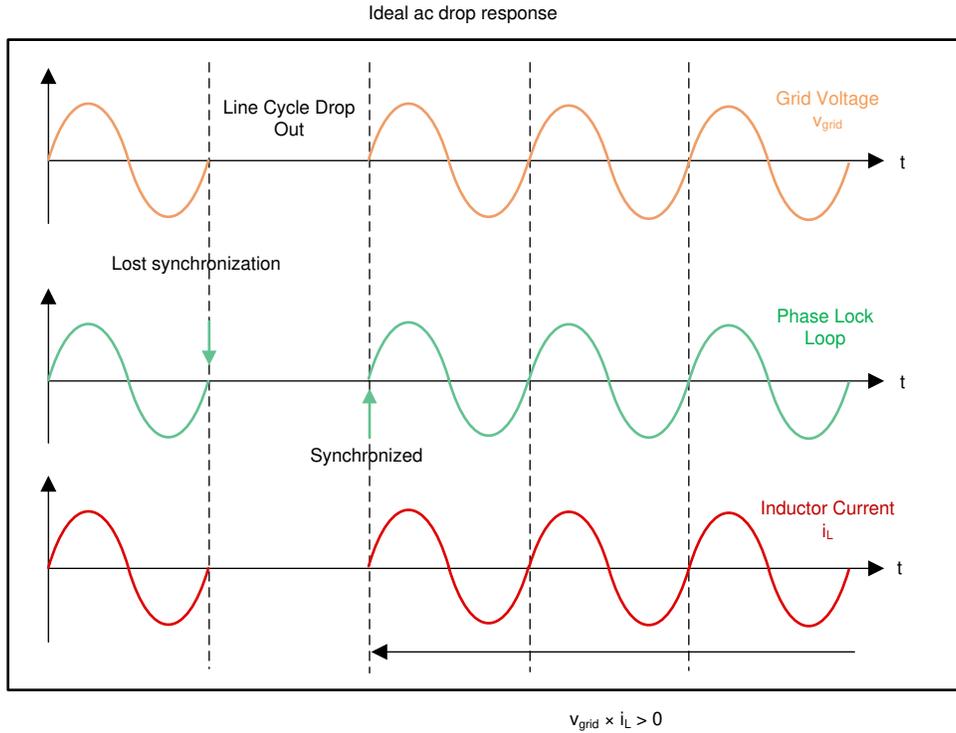


图 2-14. 理想的交流中断波形

图 2-15 所示为不太理想的交流中断解决方案。由于 SPLL 过渡时间的原因，它需要额外的时间让 PLL 工作并且不提供快速的直流总线恢复。

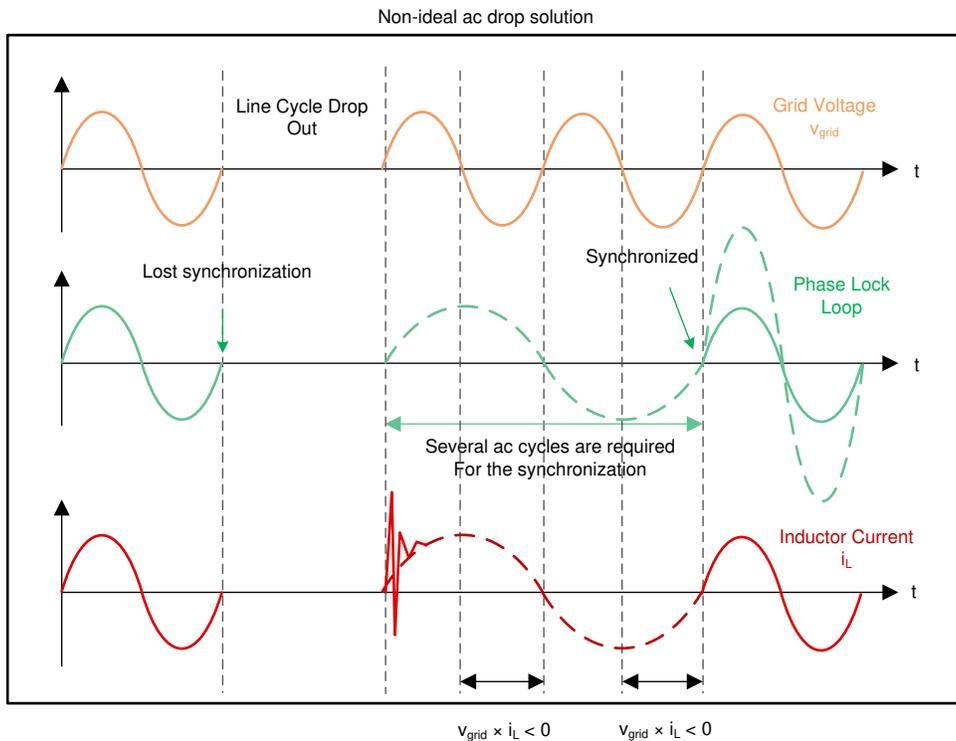


图 2-15. 不太理想的交流中断波形

在 TIDM-02008 中，引入了虚拟交流电压。MCU 内部会生成内部正弦波，其振幅和相位角将与可用的实际交流电网同步。一旦同步，无论实际电网电压如何，虚拟信号都会提供正弦信号，即使在交流中断期间也可以使用。如图 2-16 所示，虚拟交流信号在过渡期间提供电流基准，一旦 PLL 追上交流电网，PLL 将照常提供电流基准。

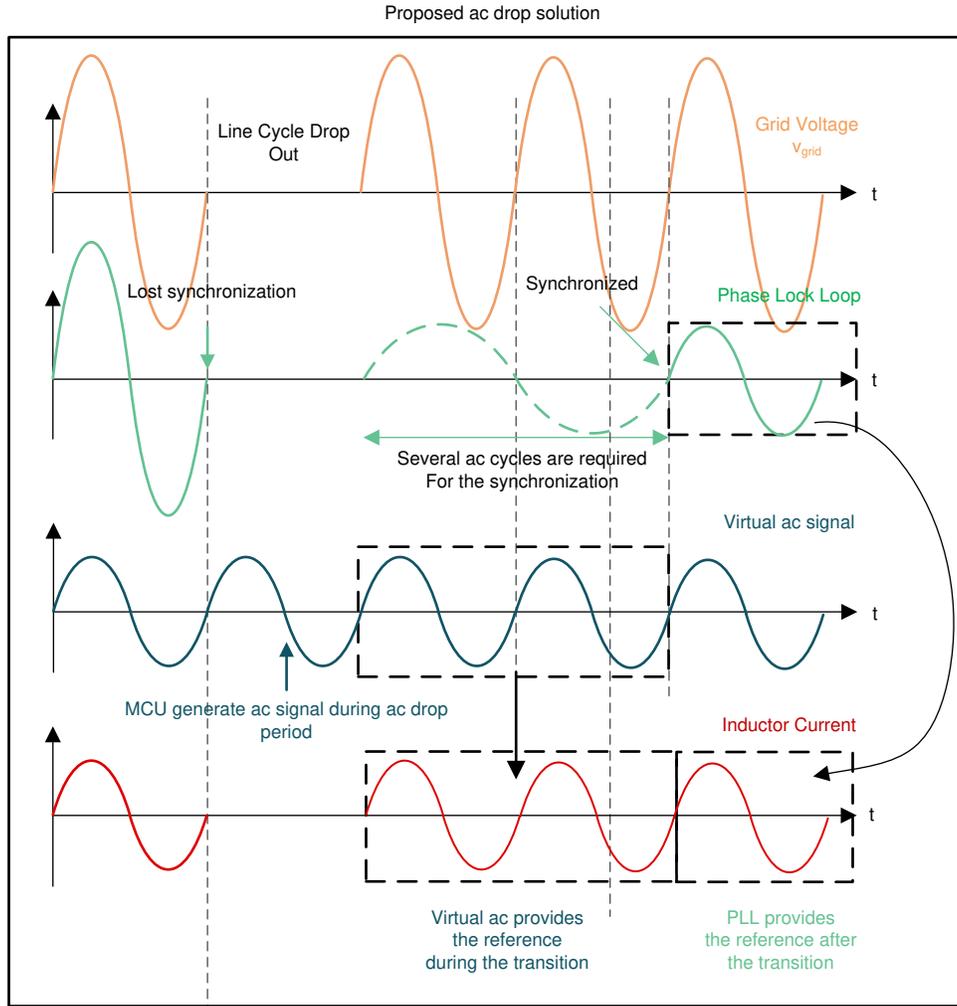


图 2-16. 建议的交流中断波形

图 2-17 所示的状态机监控交流电压并根据交流电压状态做出决定。

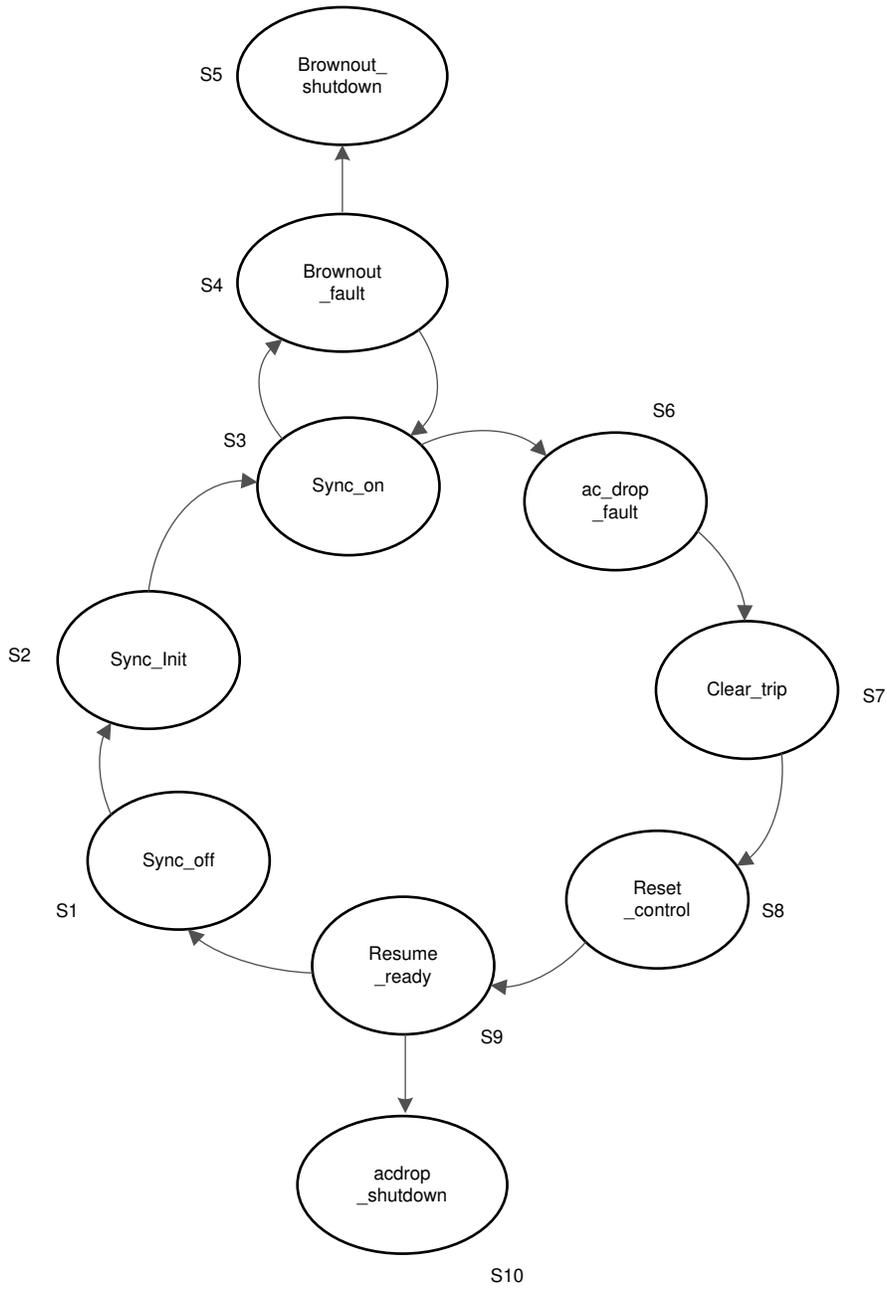


图 2-17. 交流中断状态机

图 2-18 所示为实际交流中断测试波形。它是在 900W 负载、120V 交流输入下捕获的。

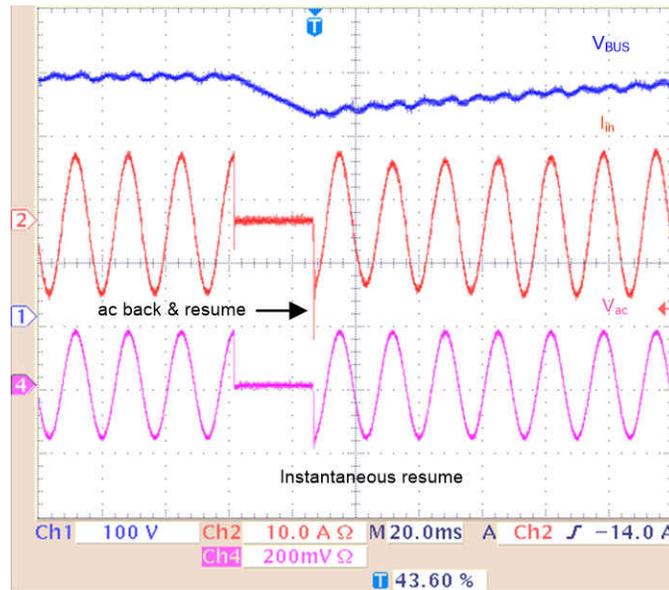


图 2-18. 900W 负载下的交流中断测试结果

可通过更改 `ttplpfc_user_settings.h` 中的 `TTPLPFC_AC_DROP` 来打开和关闭交流中断测试功能

```
#define TTPLPFC_AC_DROP 1 (1: 启用, 0 禁用)
```

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 需要的硬件和软件

3.1.1 硬件

本节详细介绍了硬件以及电路板上的不同部分。如果仅通过 powerSUITE 使用该设计的固件，则本节将不适用。

3.1.1.1 基板设置

该设计遵循 HSEC 控制卡理念，而且可能会用到从 C2000 MCU 产品系列中提供 HSEC 控制卡的任何器件。表 3-1 中列出了用于控制 MCU 功率级的重要资源。图 3-1 所示为设计板上的主要功率级和连接器。表 3-2 列出了主要连接器及其功能。着手实施时，请执行以下步骤：

1. 确保没有电源连接到该设计。
2. 在 J600 插槽中插入控制卡。
3. 在 TP604 处连接 12V、1A 直流电源。对于接地端子，请使用 TP606。不要接通电源。
4. 在 TP608 处连接 5V、1A 直流电源。对于接地端子，请使用 TP609。不要接通电源。
5. 接通 12V 和 5V 电源。控制卡上的 LED 亮起，并指示器件已加电。

NOTE

MCU 的偏置与功率级是分离的，从而能够在这组指令中安全地启动系统。PMP20396 是一款适用于该转换器的偏置电源设计

6. 若要连接 JTAG，请使用 USB 电缆连接控制卡和主机。
7. 对于 PFC 模式，可将一个单相交流电源连接到 J100 输入。此外，在某些实验中，可能需要一个直流电源来安全地测试系统。应将大约 500 Ω 和 400W 的电阻负载连接至 J104 输出。
8. 对于逆变器模式，可将一个直流电源连接到 J100 输入。应将约 125 Ω 和 200W 的电阻负载连接至 J104 输出。
9. 可连接电流和电压探针，用于观察输入电流、输入电压和输出电压，如图 3-1 所示。

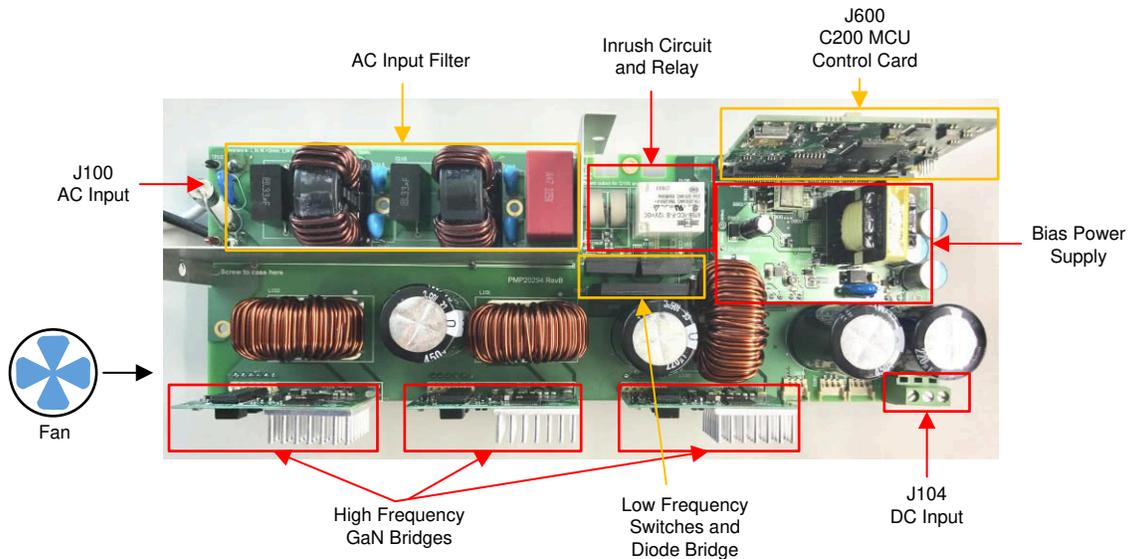


图 3-1. 电路板概述

表 3-1. 电路板上用于控制功率级的主要控制器外设

信号名称	HSEC 引脚编号	功能
PWM-1A	49	PWM：低频 MOSFET 桥臂，高侧开关
PWM-1B	51	PWM：低频 MOSFET 桥臂，低侧开关
PWM-2A	53	PWM：高频 GaN 桥臂，高侧开关，第一相
PWM-2B	55	PWM：高频 GaN 桥臂，低侧开关，第一相

表 3-1. 电路板上用于控制功率级的主要控制器外设 (continued)

信号名称	HSEC 引脚编号	功能
PWM-3A	50	PWM：高频 GaN 桥臂，高侧开关，第二相
PWM-3B	52	PWM：高频 GaN 桥臂，低侧开关，第二相
PWM-4A	54	PWM：高频 GaN 桥臂，高侧开关，第三相
PWM-4B	56	PWM：高频 GaN 桥臂，低侧开关，第三相
Iac	18	具有 CMPSS 的 ADC：交流返回电流测量
IL1	15	具有 CMPSS 的 ADC：电感器电流测量 Ph1
IL2	21	具有 CMPSS 的 ADC：电感器电流测量 Ph2
IL3	25	具有 CMPSS 的 ADC：电感器电流测量 Ph3
VL	20	ADC：线路交流电压
VN	17	ADC：零线交流电压
Vbus	24	ADC：总线电压
浪涌继电器	57	GPIO：用于控制浪涌继电器
GaN 故障 1	58	GPIO：GaN 故障信号第一相
GaN 故障 2	60	GPIO：GaN 故障信号第二相
GaN 故障 3	62	GPIO：GaN 故障信号第三相
交流电流感应增益更改	63	GPIO：控制增益级

表 3-2. 主要连接器和功能

连接器名称	功能	
	PFC	逆变器
J100	输入交流电压	输出交流电压
J104	输出直流总线电压	输入直流总线电压
TP604	输入偏置电源，12V 直流，1A	
TP608	输入偏置电源，5V 直流，1A	
TP606/TP609	GND	
J600	HSEC 控制卡连接器槽	

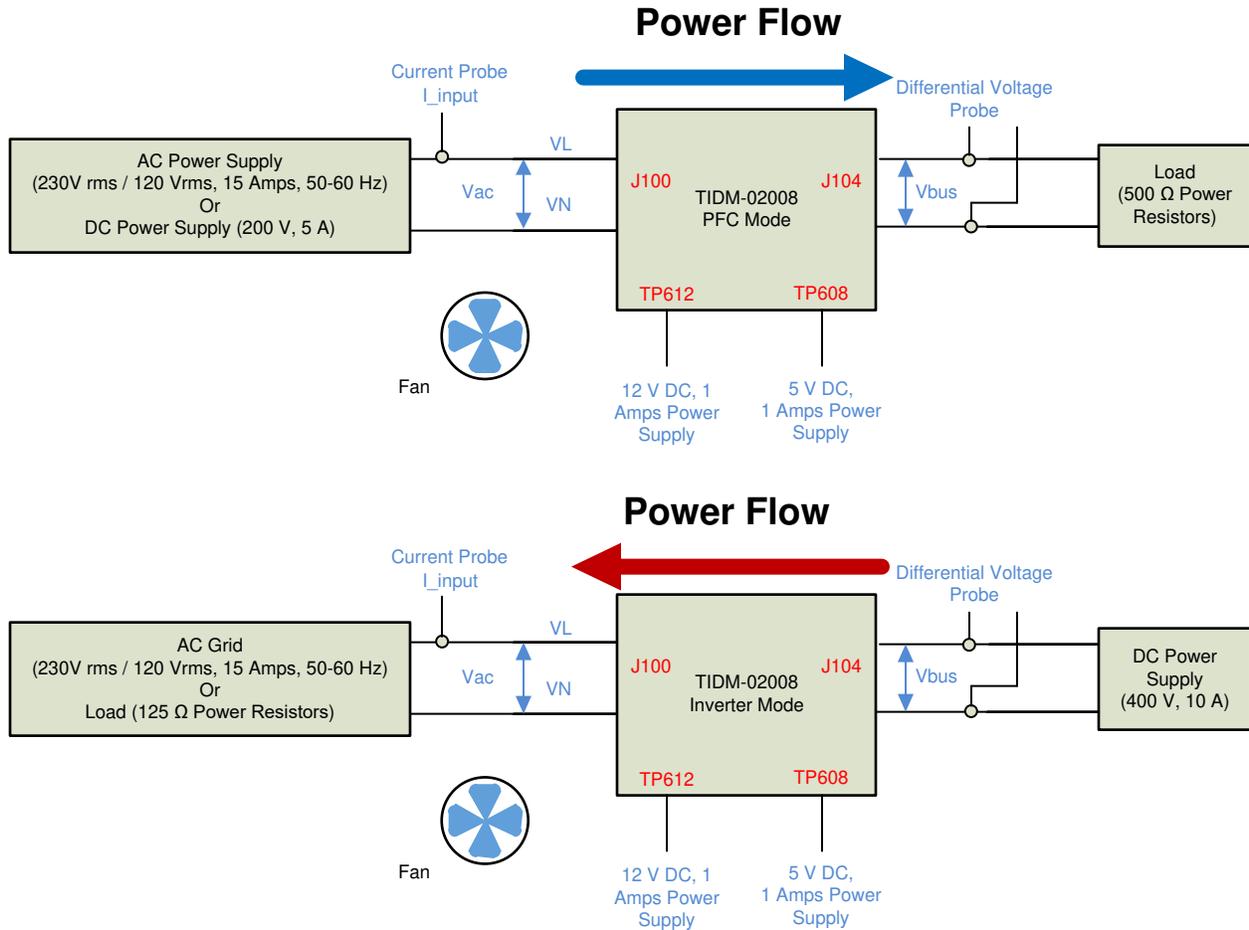


图 3-2. 用于运行软件的硬件设置 (PFC 和逆变器模式)

3.1.1.2 控制卡设置

需要对器件控制卡进行某些设置，以通过 JTAG 进行通信并使用隔离式 UART 端口。用户还必须提供正确的 ADC 基准电压。下文是需要对 F280049M 控制卡修订版 A 进行的设置。也可以参阅位于 C2000Ware 内 `<install_path>\c2000ware\boards\controlcards\TMDSCNCD280049C` 下的信息表，或者从文档 <http://www.ti.com/lit/pdf/spruic4> 中获取该表

1. 必须在两端将控制卡上的 S1:A 设置到“打开 (向上)”位置，以实现 JTAG 到器件的连接以及 SFRA GUI 的 UART 连接。如果该开关处于“关闭 (向下)”位置，则无法使用控制卡上的内置隔离式 JTAG，SFRA GUI 也无法与器件进行通信。
2. J1:A 是适用于 USB 电缆的连接器的，该电缆用于实现运行 Code Composer Studio™ (CCS) 的主机 PC 与器件之间的通信。
3. 需要为该设计的控制环路调优使用 3.3V 基准。使用 F28004x 的内部基准，为此，必须将 S8 开关移到左侧 (即指向 VREFHI)
4. 控制卡上的隔离式接地端之间连接了一个电容器 C26:A。为了使该参考设计实现卓越性能，建议移除该电容器。

3.1.2 软件

该设计使用的软件在 C2000Ware Digital Power SDK 中提供，并由 powerSUITE 框架提供支持。

3.1.2.1 打开 CCS 内的工程

着手实施时，请执行以下步骤：

1. 从 [Code Composer Studio \(CCS\) 集成开发环境 \(IDE\)](#) 工具文件夹安装 CCS，建议安装 CCSV9.3 或更高版本。

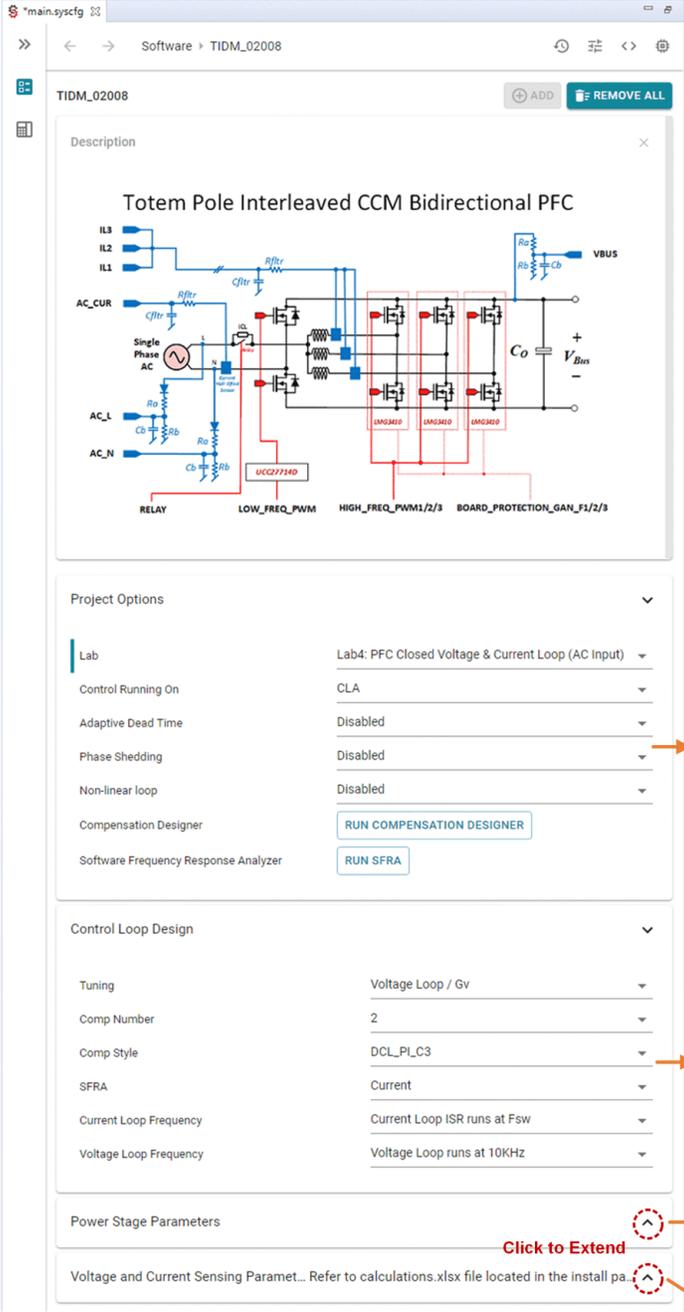
2. 安装 *C2000Ware Digital Power SDK* 工具文件夹内的 C2000Ware DigitalPower SDK。
 - 注意：在进行默认安装时，powerSUITE 随该 SDK 一同安装。
3. 转到 *View* (视图) → *Resource Explorer*。在 TI Resource Explorer 下，转到 *C2000Ware DigitalPower SDK*。

按原样打开参考设计软件 (以固件在该设计和硬件上运行的方式打开固件，要求电路板与该参考设计完全相同)。

1. 在 *C2000Ware DigitalPower SDK* 下，选择 *Development Kits* (开发套件) → *CCM Totem Pole PFC TIDM-02008*，然后点击 *Run <Import> Project* (运行 <Import> 工程)。
2. 这些步骤将导入工程和开发套件，或者显示设计页面。该页面可用于浏览有关该设计的所有信息，包括该用户指南、测试报告、硬件设计文件等。
3. 点击 *Import <device_name> Project* (导入 <device_name> 工程)。
4. 这会将工程导入到工作区环境中，并显示具有与图 3-3 类似的 GUI 的 *main.syscfg* 页面。

打开待改编的参考设计软件。用户可修改功率级参数，然后这些参数用于在补偿设计器中创建功率级模型，并且还可修改适合定制设计的电压和电流的调节值。

1. 在 *C2000Ware Digital Power SDK* 下，点击 *powerSUITE* → *Solution Adapter Tool* ()。
2. 从显示的解决方案列表中选择 *Single Phase CCM Totem Pole PFC*。
3. 在下一页中选择该解决方案必须运行的器件。
4. 点击图标之后，将显示一个弹出窗口，询问要创建工程的位置。还可在工作区内保存工程。指定位置后，即可创建工程，并会显示 **GUI** 页面和适用于该解决方案的可修改选项 ()。
5. 该 **GUI** 可用于更改经改编的解决方案的参数，如额定功率、电感、电容、检测电路参数等。



Power Stage Diagram

Project Options

1. Lab Selection
2. Core Selection
3. Advanced Control Technique Enable/Disable
4. SFRA and Comp Designer Launch Button

Control Loop Design

1. Current/Voltage Compensator Selection
2. SFRA Current/Voltage Selection
3. Adjust ISR Rate for Control Loop

Power Stage Parameters

1. PWM setup
2. Nominal voltage and power rating setup
3. Inductor and output capacitor value

Voltage and Current Sensing Parameters

1. Specify resistor divider and current sensor values, used to compute max sensed voltage and current which is used in the plant model

Click to Extend

图 3-3. CCM TTPL PFC 解决方案的 powerSUITE 页面

3.1.2.2 工程结构

导入工程后，CCS 内将显示 Project Explorer，如图 3-4 所示。

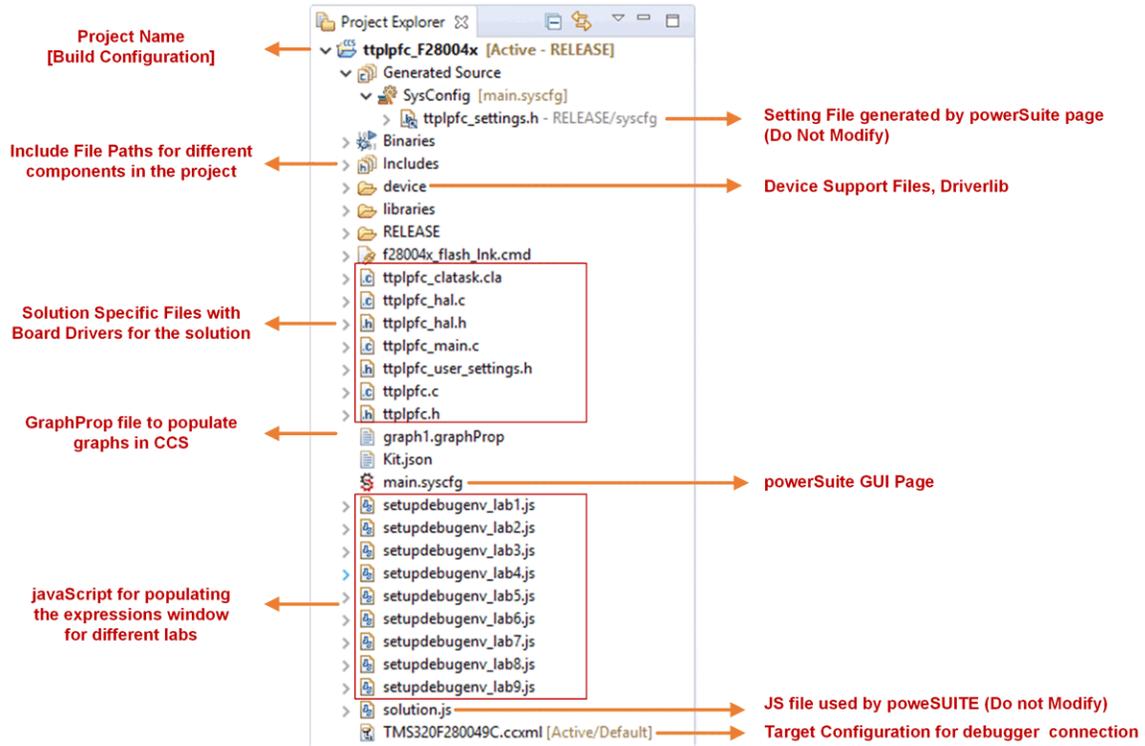


图 3-4. 解决方案工程的 Project Explorer 视图

图 3-5 中显示了工程的总体结构。

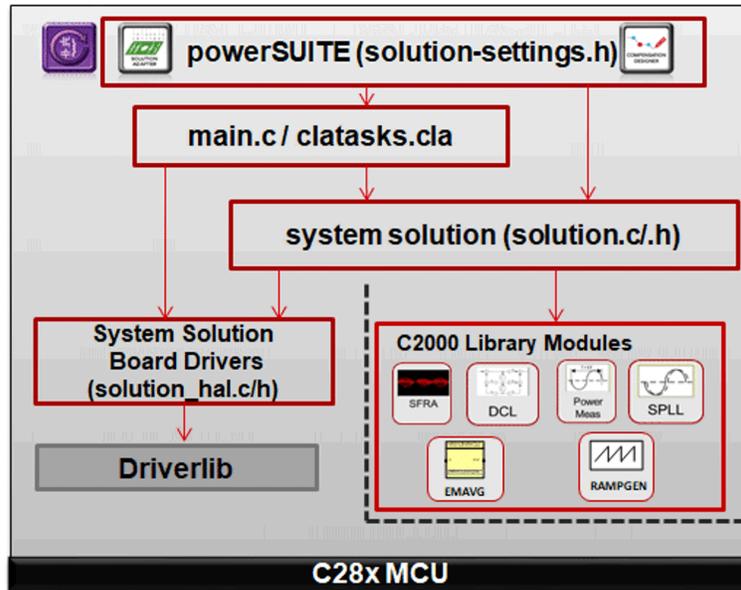


图 3-5. 工程结构概览

NOTE

图 3-5 展示了用于 F28004x 的工程；不过，如果从 powerSUITE 页面中选择了不同的器件，结构则是类似的。

特定于解决方案并且独立于器件的文件是 `<solution>.c/h`。该文件包含工程的 `main.c` 文件，负责解决方案的控制结构。

对于该设计，`<solution>` 是 `ttplpfc`。

特定于电路板并且特定于器件的文件是 `<solution>_hal.c/h`。该文件包含特定于器件的驱动程序，用于运行解决方案。

可通过点击列在 Project Explorer 下的 `main.syscfg` 文件来打开 powerSUITE 页面。powerSUITE 页面生成 `<solution>_settings.h` 文件。该文件是由 powerSUITE 页面生成的用于工程编译的唯一文件。用户不得手动修改该文件，因为每次保存工程时 powerSUITE 都会被覆盖。用户可修改 `<solution>_user_settings.h` 文件中的多个设置。

`Kit.json` 和 `solution.js` 文件由 powerSUITE 在内部使用，也不允许用户进行修改。对这些文件进行的任何更改都会导致工程无法正常运行。

提供了 `setupdebugenv_build.js` 以自动填充不同构建的观察窗口变量

提供了 `*.graphProp` 文件以自动填充数据记录器图形的设置

该工程包含一个在每个 PWM 周期中都会调用的中断服务例程 (ISR)，并且电流控制器在该 ISR 内运行。除此之外，还会调用一个大约 10kHz 的较慢 ISR，用于运行电压环路和仪表 ISR。一些后台任务 (A0-A4 和 B0-B4) 以轮询方式进行调用，可用于运行不要求绝对计时精度的缓慢任务 (如 SFRA 后台等)。

图 3-6 所示为固件的软件流程图

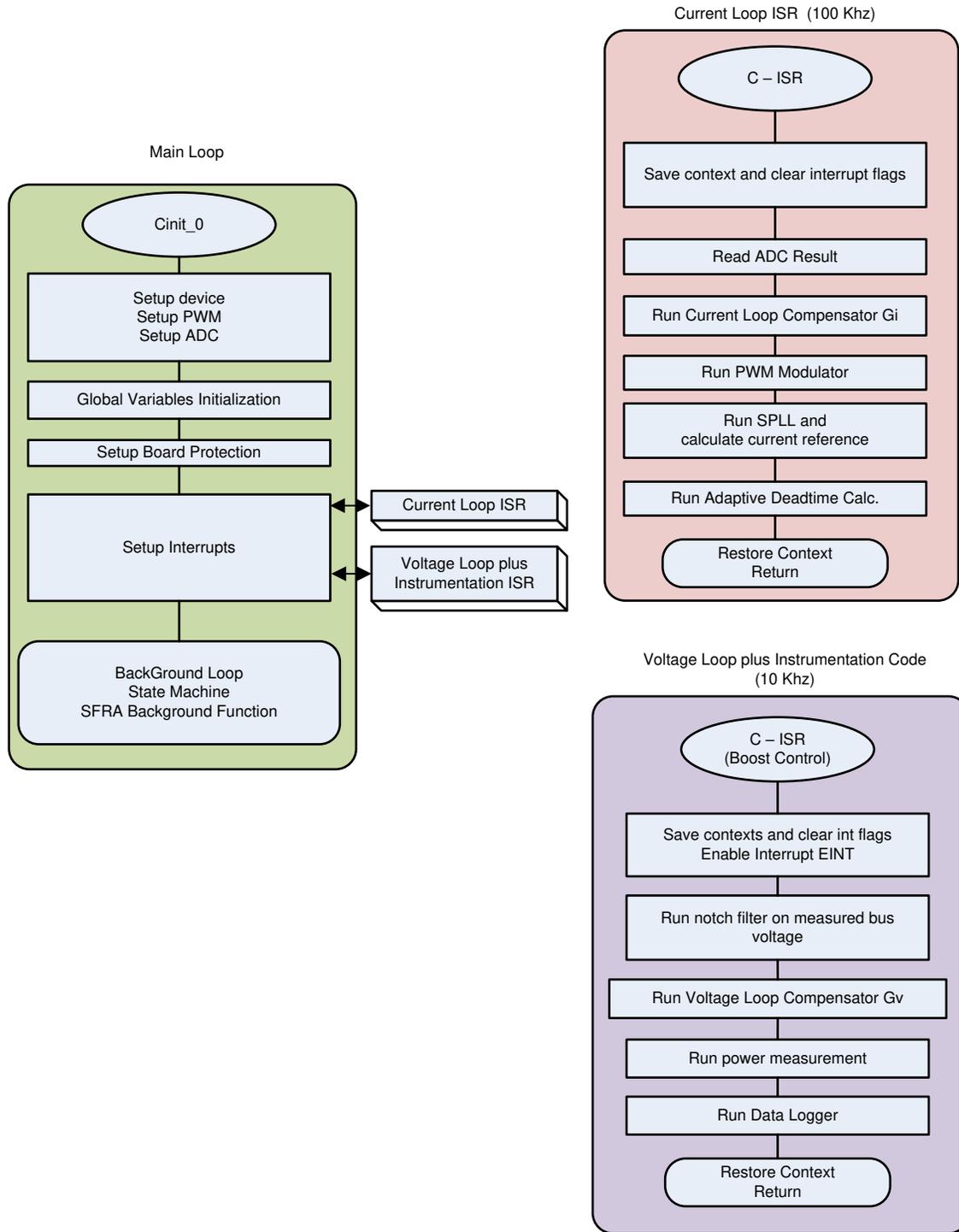


图 3-6. 工程结构图像

为了简化系统开发和设计，该参考设计的软件分为九个实验。实验 1 到 4 旨在验证 PFC 操作，实验 5 到 9 旨在验证逆变器操作。

- PFC 操作
 - 实验 1：开环（直流输入）
 - 实验 2：闭合电流环路（直流输入）
 - 实验 3：闭合电流环路（交流输入）

- 实验 4：闭合电压和电流环路（交流输入）
- 逆变器操作
 - 实验 5：开环（直流输出）
 - 实验 6：开环（交流输出）
 - 实验 7：闭合电流环路（直流输出，电阻负载）
 - 实验 8：闭合电流环路（交流输出，电阻负载）
 - 实验 9：闭合电流环路（交流输出，并网条件）

这些实验详见节 3.1.2.5。如果使用参考设计硬件，请确保如节 3.1.1 中所述完成硬件设置。

3.1.2.3 基于 C2000 MCU 使用 CLA 来减轻 CPU 负载

控制律加速器 (CLA) 是一款基于 C2000 MCU 系列器件提供的协处理器。利用该协处理器，可从主 C28x CPU 核心上卸载控制 ISR 函数。

若要基于 CLA 运行控制 ISR，对于 powerSUITE 中支持的解决方案，可通过 powerSUITE CFG 页面上的下拉菜单进行选择。powerSUITE 解决方案的软件结构设计做到了通过下拉菜单进行选择即可将任务卸载到 CLA 上。不会复制代码，仅维护解决方案算法的单源代码，即使代码在 CLA 或 C28x 上运行也是如此。利用该配置，可灵活地调试解决方案。

每个器件的 CLA 功能略有不同。例如，在 F2837xD、F2837xS 和 F2807x 上，CLA 在给定时间只能支持一项任务，并且没有嵌套功能。这种配置意味着任务是不可中断的。只能将一个 ISR 卸载到 CLA 上。在 F28004x 上，CLA 支持可嵌套常规 CLA 任务的后台任务。利用该配置，可将两个 ISR 卸载到 CLA 上。

CLA 支持一项后台任务，可在其中嵌套一项 CLA 任务。利用该配置，可将两个 ISR 函数卸载到 CLA 上。对于 F28004x，电流环路和电压环路的控制 ISR (100kHz) 和仪表 ISR (10kHz) 都将卸载到 CLA 上。

有关 CLA 的更多信息，请访问 [CLA 实践技术讲座](#) 以及相应的器件技术参考手册。

3.1.2.4 CPU 和 CLA 利用率及内存分配

可通过翻转 GPIO 和使用示波器捕获波形来监测 CPU 利用率。每个 ISR 都包含性能评测功能，可在 ISR 开始时将 GPIO 引脚设置为高电平，在 ISR 结束时将 GPIO 引脚设置为低电平。但是，当嵌套 ISR 时，这种方法不再准确。

为了克服基于示波器方法的缺点，XBAR 和 ECAP 模块用于捕获 GPIO 的翻转瞬间，而 MCU 计算适应嵌套的 ISR 负载。此外，这种方法直接在观察窗口上提供 ISR 负载，因此不需要示波器。ISR1 (100kHz) 专为内部电流环路控制而设计。外部电压环路和仪表在 ISR2 (10kHz) 上实现。ISR1 和 ISR2 负载分别呈现在 TTPLPFC_ISR1>LoadingMax 和 TTPLPFC_ISR2>LoadingAvg_accountingForNesting 中。图 X 捕获了在 CPU 上运行控件时的观察窗口。

Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab8	0x00008002@Data
TTPLPFC_pwm_SwState.enum_pwmSwSta	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x0000809E@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x00008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	0	0x0000808E@Data
TTPLPFC_closeGvLoop	long	0	0x0000808C@Data
TTPLPFC_vBusRef_pu	float	0.821337461	0x0000804A@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_pu	float	0.0322265625	0x00008022@Data
TTPLPFC_closeGILoop	long	0	0x0000808A@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	14.8819313	0x00008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	-1.876652	0x0000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
TTPLPFC_powerRms_Watts	float	0.0	0x0000806C@Data
TTPLPFC_powerFactor	float	0.0	0x00008076@Data
TTPLPFC_acFreqAvg_Hz	float	0.0	0x0000807A@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.00999999978	0x0000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	-0.93359375	0x00008008@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.933105469	0x0000800A@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.933105469	0x0000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	0	0x00008080@Data
TTPLPFC_ISR1>LoadingMax	float	0.517068267	0x000080D2@Data
TTPLPFC_ISR2>LoadingAvg.accountingFo	float	0.054254517	0x000080CE@Data

图 3-7. 用于 eCAP 性能评测的观察表达式

可通过配置 `main.syscfg`，以相同的方式测量启用了高级选项（相位减少、自适应死区时间、非线性环路、SFRA）的 ISR 负载。表中捕获了最糟糕情形下的 ISR 负载

	ISR1 (100kHz)	ISR2 (10kHz)
CPU 利用率 (高级选项：全部关闭)	53%	6%
CPU 利用率 (高级选项：全部打开)	65%	9%

如果没有高级选项，总 CPU 使用率约为 59%。如果启用了所有高级选项，总 CPU 使用率约为 74%。利用该 CLA 选项，在两个 ISR 都卸载到 CLA 上时，可将 CPU 负载降低至 0%。表中显示了最糟糕情形下 CLA 上的 ISR 负载

	ISR1 (100kHz)	ISR2 (10kHz)
CLA 利用率 (高级选项：全部关闭)	57%	9%
CLA 利用率 (高级选项：全部打开)	79%	12%

由于进行额外的计算，高级选项显然会增加 CPU 的使用率。除此之外，用于电网同步的编译器优化等级、锁相环 (PLL) 方法也会影响 CPU 使用率。使用 NOTCH SPLL (`#define SPLL_METHOD_SELECT SPLL_1PH_NOTCH_SEL`) 捕获表 x 和 y 上的 ISR 负载，并且编译器优化级别为 3。可在 [C2000™ C28x 优化指南](#) 中找到代码优化基准。

内存分配如图 3-8 所示

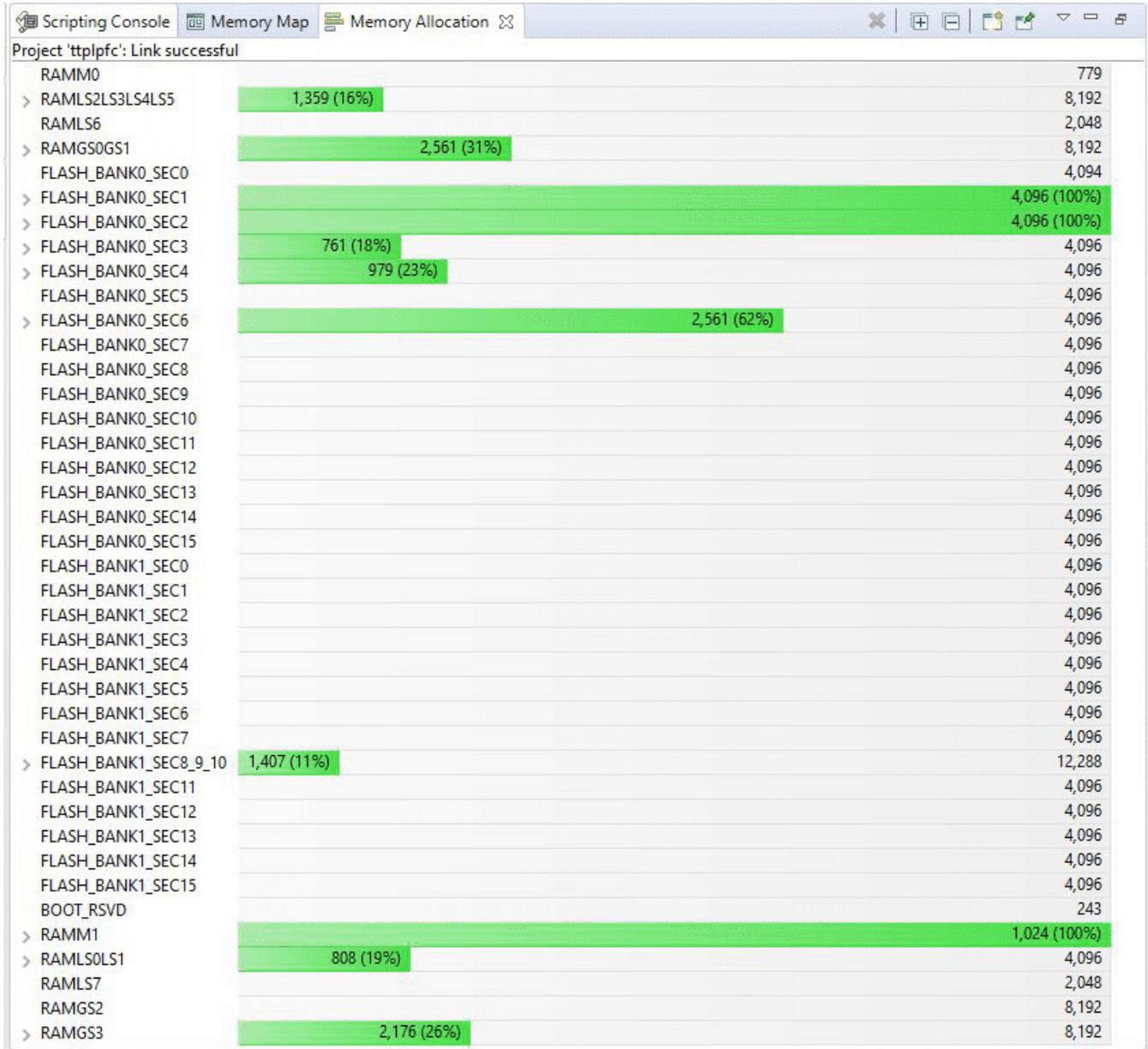


图 3-8. TIDM-02008 内存分配

3.1.2.5 运行项目

3.1.2.5.1 实验 1：开环，直流（PFC 模式）

在本实验中，电路板以开环方式激励（采用固定占空比）。占空比通过 `dutyPU_DC` 变量进行控制。该构建验证来自功率级的反馈值感应以及 PWM 栅极驱动器的运行，并确保没有硬件问题。此外，可以在该构建中执行输入和输出电压检测校准。图 3-9 中显示了该构建的软件结构。系统中有两个 ISR：用于电流环路的快速 ISR，以及用于运行电压环路和仪表功能的较慢 ISR。每个 ISR 中运行的模块如图 3-9 所示。

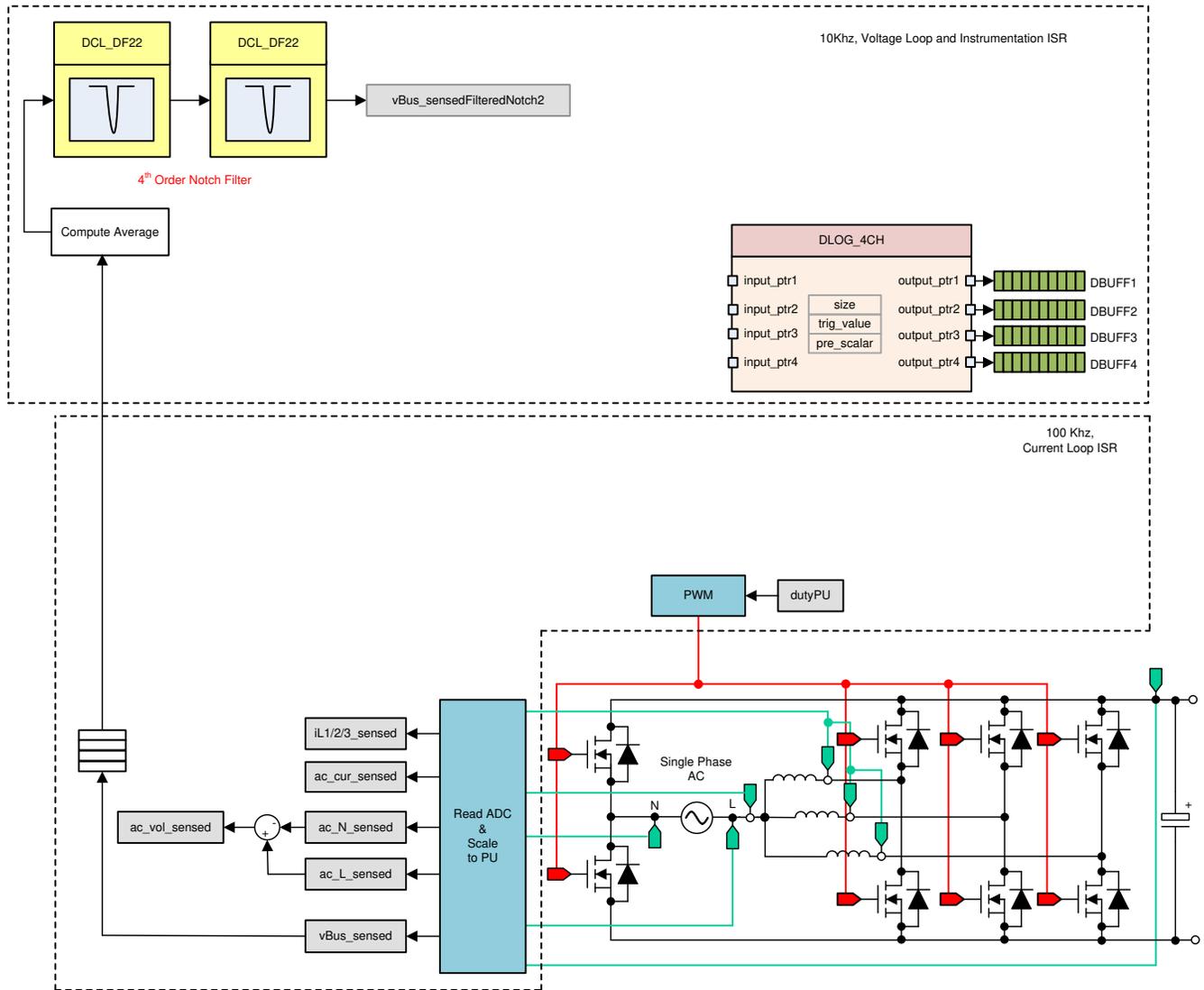


图 3-9. 实验 1 控制软件图：开环工程

假设硬件设置与上一节概述的内容相似。图 3-10 总结了实验 1 测试的硬件设置。

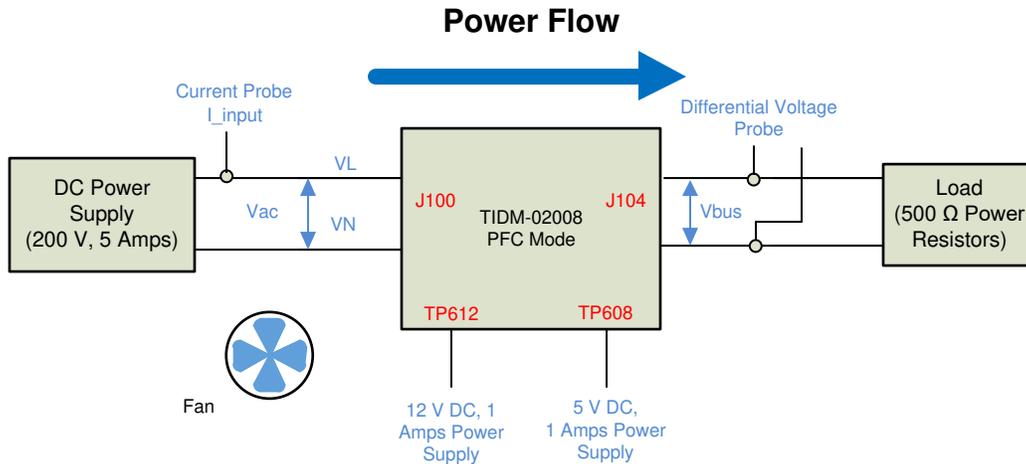


图 3-10. 实验 1 的硬件设置

3.1.2.5.1.1 设置实验 1 的软件选项

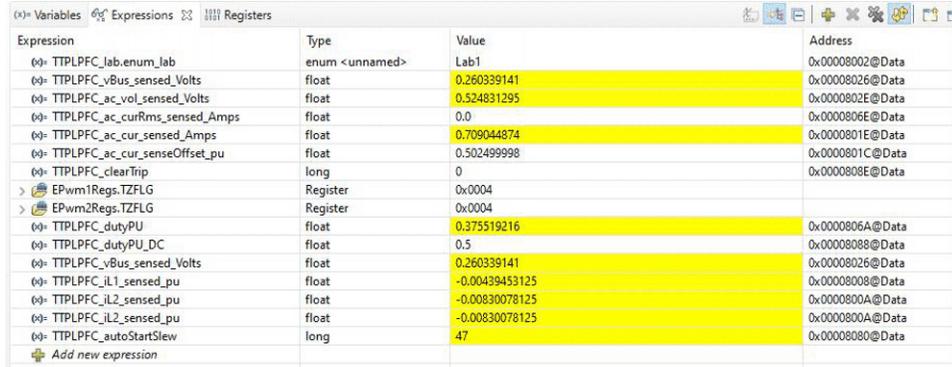
- powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 *Project Options*（工程选项）部分下：
 - 选择“Lab”（实验）选项下的 *Lab1*（实验 1），
 - 并禁用其他选项，例如 *Non Linear Voltage Loop*、*Adaptive Deadtime and Phase shedding*（非线性电压环路、自适应死区时间和切相）
- 如果这是经改编的解决方案，请编辑 *Voltage and Current Sensing Parameters*（电压和电流感应参数）下的设置。用户可以参阅 *calculations.xlsx* 文件（位于 C2000Ware DigitalPower SDK 安装目录 `<install_location>\solutions\tidm_02008\hardware` 下），详细了解 powerSUITE 页面的感测电路以及如何计算最大范围
- 在“Power Stage Parameters”（功率级参数）下，指定开关频率、死区和额定功率。保存该页面。

3.1.2.5.1.2 生成和加载工程

- 右键单击工程名称，然后单击 *Rebuild Project*（重建工程）。
- 随后将成功构建工程。
- 在 *Project Explorer* 中，确保在 *targetconfigs* 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”（有效）（图 3-4）。
- 然后单击 *Run*（运行）→ *Debug*（调试）。此操作会启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。
- 然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。

3.1.2.5.1.3 设置调试环境窗口

- 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击“open” (打开)，然后浏览到位于项目文件夹内的 **setupdebugenv_lab1.js** 脚本文件。该脚本文件会采用调试系统所需的相应变量的值填充观察窗口。点击观察窗口中的“Continuous Refresh” (持续刷新) 按钮，以持续更新控制器中的值。系统会显示观察窗口，如图 3-11 所示。



Expression	Type	Value	Address
(*) TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab1	0x00008002@Data
(*) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	0.260339141	0x00008026@Data
(*) TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	0.524831295	0x0000802E@Data
(*) TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
(*) TTPLPFC_ac_cur_sensed_Amps	float	0.709044874	0x0000801E@Data
(*) TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
(*) TTPLPFC_clearTrip	long	0	0x0000808E@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
(*) TTPLPFC_dutyPU	float	0.375519216	0x0000806A@Data
(*) TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
(*) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	0.260339141	0x00008026@Data
(*) TTPLPFC_iL1_sensed_pu	float	-0.00439453125	0x00008008@Data
(*) TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	-0.00830078125	0x0000800A@Data
(*) TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	-0.00830078125	0x0000800A@Data
(*) TTPLPFC_autoStartSlew	long	47	0x00008080@Data
+ Add new expression			

图 3-11. 实验 1 表达视图

- 点击  以运行工程
- 现在通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 () 来暂停处理器

3.1.2.5.1.4 使用实时仿真

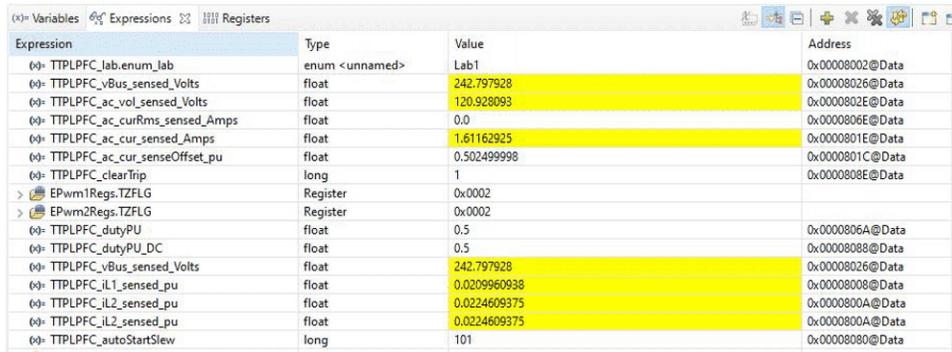
实时仿真是一项特殊仿真功能，允许在 MCU 运行时更新 CCS 内的窗口。该功能不但可实现图形和观察视图更新，而且使用户能够改变观察或存储器窗口中的值，并且无需停止处理器即可查看这些更改对系统的影响。

- 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。

Enable Silicon Real-time Mode (service critical interrupts when halted, allow debugger accesses while running)
- 可能会显示一个消息框。若是如此，选择 **YES** (是) 来启用调试事件。此操作会将状态寄存器 1 (ST1) 的位 1 (DGBM 位) 设置为 0。DGBM 是调试使能屏蔽位。当 DGBM 位设置为 0 时，存储器和寄存器值将传递到主机处理器以更新调试器窗口。

3.1.2.5.1.5 运行代码

- 现在，点击  以再次运行工程。
- 在几秒钟内，浪涌继电器发出咔嚓声，软件在实验 1 中被编程为执行此操作。跳闸清除，并施加 0.5 的占空比。
- 在观察视图中，定期查看是否更新了 TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts、TTPLPFC_vBus_sensed_Volts、TTPLPFC_ac_cur_sensed_Amps 变量。
 - 注意：现在未通电，因此该值将接近于零。
- 现在，缓慢增大输入直流电压（从 0 到 120V）。输出电压显示电压升高，因为默认设置施加了一个 0.5 PU 的稳定占空比。如果消耗高电流，请验证电压端子是否交换。如果为真，请先将电压降至零并在恢复测试之前纠正问题
- 验证电压感测：确保 TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts 和 TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 显示正确的值，对于 120V 直流输入，TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 接近 240V。这就以某种方式实现了对电路板电压感测的验证。
- 验证电流感测：注意给定测试条件下的 TTPLPFC_ac_cur_sensed_Amps；此值接近于 1A。



Expression	Type	Value	Address
(*) TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab1	0x00008002@Data
(*) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	242.797928	0x00008026@Data
(*) TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	120.928093	0x0000802E@Data
(*) TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
(*) TTPLPFC_ac_cur_sensed_Amps	float	1.61162925	0x0000801E@Data
(*) TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
(*) TTPLPFC_clearTripp	long	1	0x0000808E@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0002	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0002	
(*) TTPLPFC_dutyPU	float	0.5	0x0000806A@Data
(*) TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
(*) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	242.797928	0x00008026@Data
(*) TTPLPFC_iL1_sensed_pu	float	0.0209960938	0x00008008@Data
(*) TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	0.0224609375	0x0000800A@Data
(*) TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	0.0224609375	0x0000800A@Data
(*) TTPLPFC_autoStartSlew	long	101	0x00008080@Data

图 3-12. 实验 1：显示测量的电压和电流的观察表达式

- 该检查在基本层面上验证 PWM 驱动器和硬件连接，用户可更改 dutyPU_DC 变量以查看在各种升压条件下的操作。
- 完成后，将输入电压降至零，然后等待总线电压降至零。
- 对该构建的检查到此就结束了，成功完成该构建后，会验证以下事项：
 - 电压和电流感测以及调节正确
 - 电流环路 ISR 和电压环路仪表 ISR 中实验 1 代码的中断生成和执行
 - PWM 驱动器和开关

如果观察到任何问题，则需要仔细检查硬件，以消除所有构建问题，等等。

- 现在可停止控制器并且终止调试连接。
- 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt**（暂停）按钮 () 或使用 **Target**（目标）→ **Halt**（暂停）来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，点击  以对 MCU 进行复位。
- 点击 **Terminate Debug Session**（终止调试会话）（**Target**（目标）→ **Terminate all**（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。

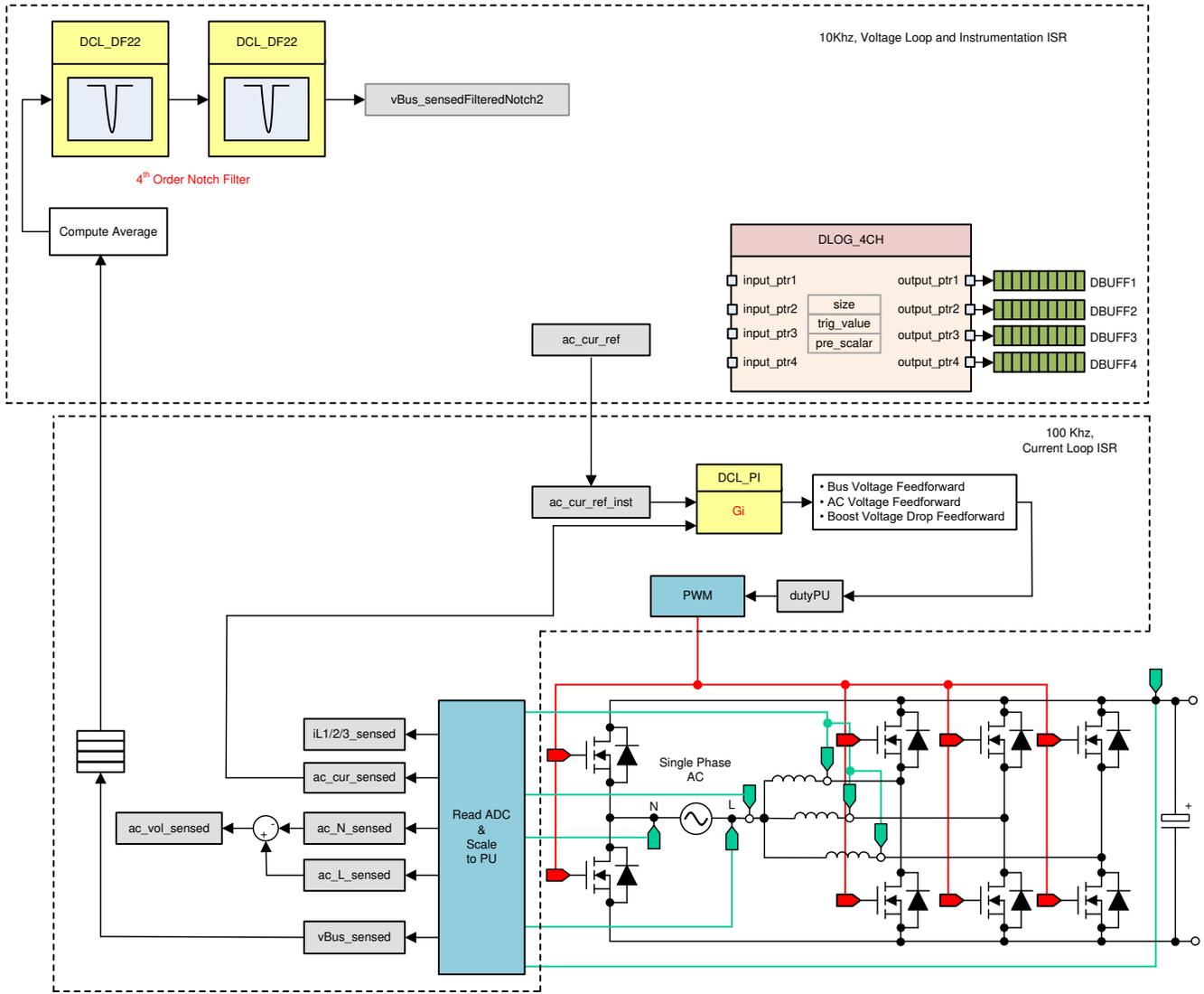


3.1.2.5.2 实验 2：闭合电流环路，直流 (PFC)

在该构建（实验 2）中，内侧电流环路是闭合的，也就是说，使用电流补偿器 G_i 控制电感器电流。对该电流补偿器的输出应用了直流总线和输出电压前馈，以生成逆变器的占空比，如方程式 7 所示。该操作可以简化电流补偿器的受控体，并且可以使用比例 (P) 控制器来调节内侧电流的环路。我们已在节 2.4.2 中得出了电流环路的模型。如图 3-13 所示完成该构建的软件图。

$$\text{duty1PU} = \frac{(\text{ac_cur_meas} - \text{ac_cur_ref_inst}) \times G_i + \text{ac_vol_sensed}}{\text{vBus_sensed}} \quad (7)$$

如图 3-13 所示完成该构建的软件图。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 3-13. 实验 2 控制软件图：闭合电流环路

3.1.2.5.2.1 设置实验 2 的软件选项

1. 确保如图 3-10 中所述设置硬件。先不要向电路板提供任何高压 (HV) 电源。
2. powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 *Project Options* 工程选项) 部分下：
 - 选择 “Lab” (实验) 选项下的 *lab2* (实验 2)。
 - 在 “INPUT” (输入) 选项下将输入设为 “DC” (直流)
 - 并禁用其他选项，例如 *Non Linear Voltage Loop*、*Adaptive Deadtime and Phase shedding* (非线性电压环路、自适应死区时间和切相)
3. 假设所有其他选项与节 3.1.2.5.1.1 中所指定的一样
4. 在 *Control Loop Design* (控制环路设计) 下，系统会自动选择用于电流环路调优的选项 (*Tuning* (调优) → *Current Loop* (当前环路) → *COMP1* → *DCL_PI_C1*)。现在点击 *Compensation Designer* 图标 ()。

3.1.2.5.2.2 设计电流环路补偿器

1. 补偿设计器将以电流环路受控体模型启动，powerSUITE 页面中指定了相应的参数。可以零极点角度调整基于 PI 的控制器，以确保稳定的闭环运行。可以通过观察补偿设计器中开环传递函数图上的增益裕量和相位裕度来验证使用所设计的补偿器时的系统稳定性，如图 3-14 所示。

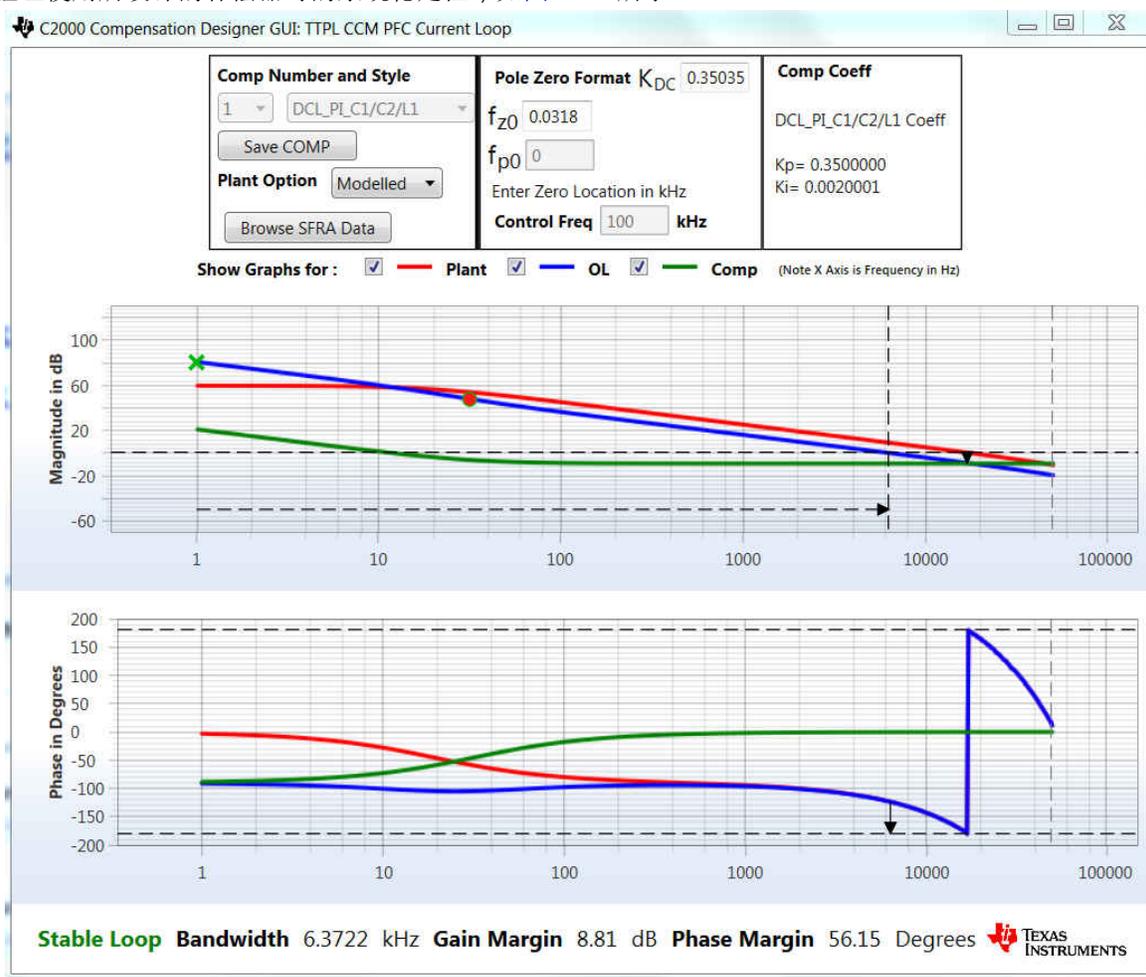
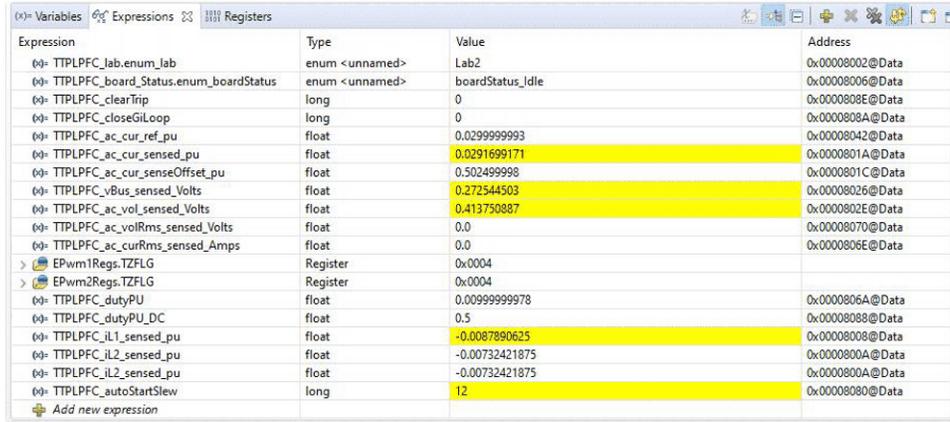


图 3-14. 使用补偿设计器的电流环路设计

2. 对开环增益感到满意后，点击 *Save COMP* (保存 COMP)。该操作会将补偿器值保存到工程中。
 - 注意：如果未从解决方案适配器中选择工程，则系统不允许对补偿器进行更改。通过解决方案适配器选择解决方案。
3. 关闭补偿设计器并返回 powerSUITE 页面。

3.1.2.5.2.3 生成和加载工程以及设置调试

- 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project** (重建工程)。随后将成功构建工程。点击 **Run** (运行) → **Debug** (调试)，这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
- 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open** (打开) 浏览到位于工程文件夹内的 `setupdebugenv_lab2.js` 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。点击观察窗口中的 **Continuous Refresh** (持续刷新) 按钮 (🔄)，以持续更新控制器中的值。观察窗口将如图 3-15 所示。



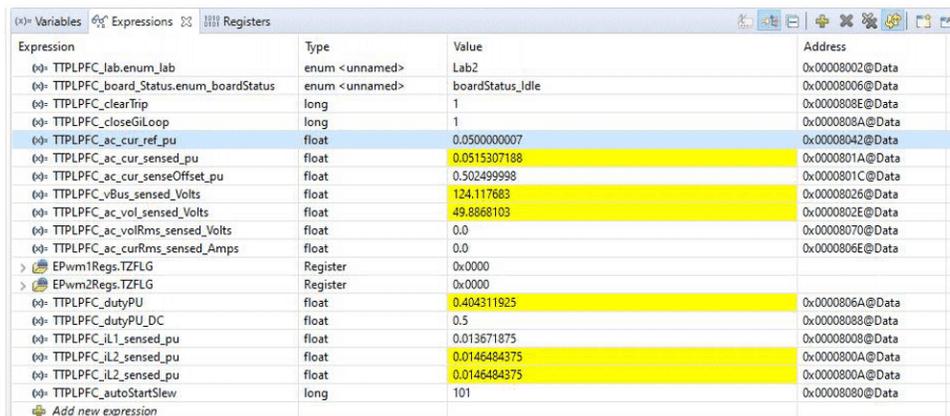
Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab2	0x00008002@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x00008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	0	0x0000808E@Data
TTPLPFC_closeGilLoop	long	0	0x0000808A@Data
TTPLPFC_ac_cur_ref_pu	float	0.0299999999	0x00008042@Data
TTPLPFC_ac_cur_sensed_pu	float	0.0291699171	0x0000801A@Data
TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	0.272544503	0x00008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	0.413750887	0x0000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.00999999978	0x0000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	-0.0087890625	0x00008008@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	12	0x00008080@Data

图 3-15. 实验 2：闭合电流环路表达视图

- 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击 (🔄) 按钮以启用实时模式。
- 点击 (▶) 以运行工程
- 现在通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 (⏸) 来暂停处理器

3.1.2.5.2.4 运行代码

- 该工程被编程为驱动浪涌继电器并在设定的时间后清除跳闸，即 `autoStartSlew==100`。该软件在本实验中被编程为执行此操作。必须在运行后和此自动压摆计数器达到 100 之前施加输入电压。如果计数器达到 100，在于输入端施加电压之前，必须将代码复位。对于必须使控制器退出实时模式的情况，执行复位并重新启动。重复 3 中的步骤
- 现在，点击 (▶) 以运行工程。
- 在 `TTPLPFC_autoStartSlew` 达到 100 之前施加约 50V 的输入电压。一旦 `TTPLPFC_autoStartSlew` 达到 100，浪涌继电器即触发，PWM 跳闸被清除，同时关闭电流环路标志。



Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab2	0x00008002@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x00008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	1	0x0000808E@Data
TTPLPFC_closeGilLoop	long	1	0x0000808A@Data
TTPLPFC_ac_cur_ref_pu	float	0.0500000007	0x00008042@Data
TTPLPFC_ac_cur_sensed_pu	float	0.0515307188	0x0000801A@Data
TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	124.117683	0x00008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	49.8868103	0x0000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.404311925	0x0000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	0.013671875	0x00008008@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	0.0146484375	0x0000800A@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	0.0146484375	0x0000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	101	0x00008080@Data

图 3-16. 观察表达式、实验 2、闭合电流环路后的操作开始

4. 输入电流调节在 0.7A 左右，输出电压升至约 128V。
5. 现在，缓慢增大 TTPLPFC_ac_cur_ref_pu 至 0.1，即 2.5A 输入。
6. 接下来，缓慢增大 $V_{in} = 120V$ ，输出电压将大于 350V。

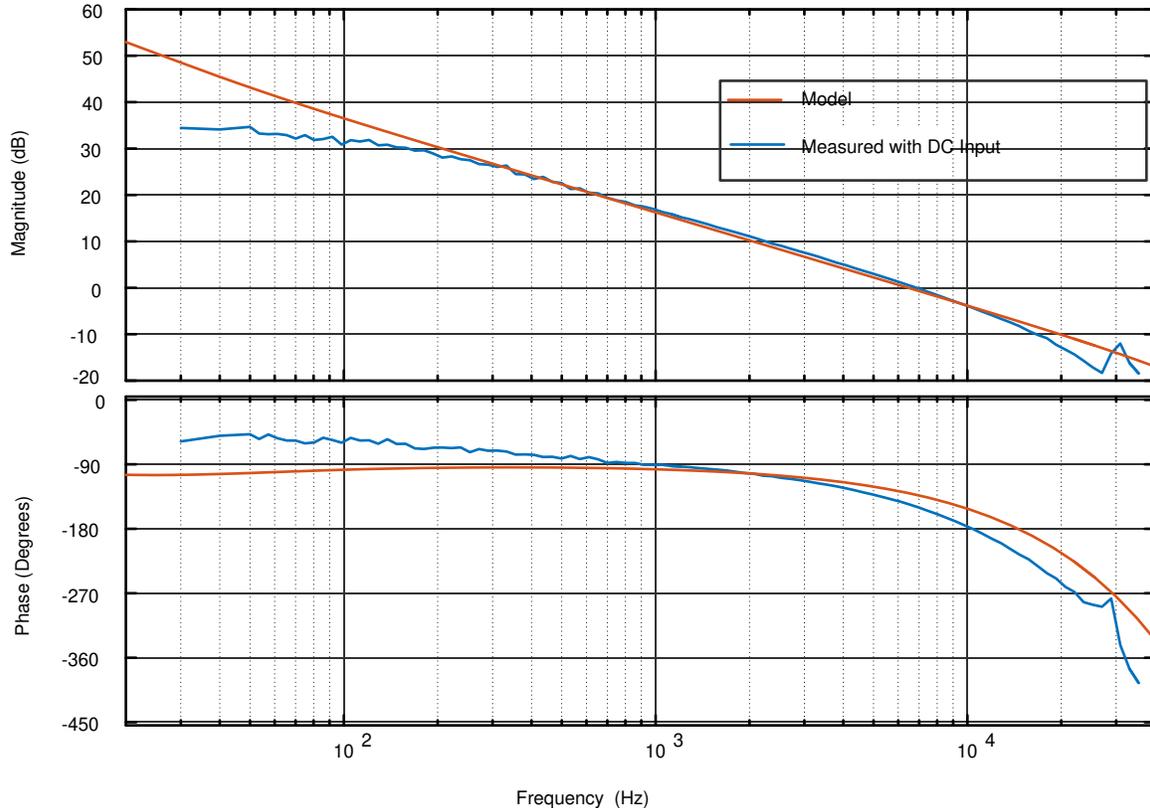
Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab2	0x00008002@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x00008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	1	0x0000808E@Data
TTPLPFC_closeGLoop	long	1	0x0000808A@Data
TTPLPFC_ac_cur_ref_pu	float	0.125	0x00008042@Data
TTPLPFC_ac_cur_sensed_pu	float	0.12306881	0x0000801A@Data
TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	379.47934	0x00008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	116.602524	0x0000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.31050238	0x0000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
TTPLPFC_iL1_sensed_pu	float	0.056640625	0x00008008@Data
TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	0.0654296875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	0.0654296875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	101	0x00008080@Data

图 3-17. 观察表达式、实验 2、闭合电流环路后的操作以全电压开始

7. SFRA 集成在该生成的软件中，通过在硬件上进行测量来验证所设计的补偿器是否能够提供足够的增益裕量和相位裕度。若要运行 SFRA，请使工程保持在运行状态，然后在 cfg 页面中点击 SFRA 图标。此时显示 SFRA GUI。
8. 在 SFRA GUI 上选择器件的相应选项。例如，对于 F28004x，选择“Floating Point”（浮点）。点击 Setup Connection（设置连接）。在弹出窗口中取消选中“boot on connect”（连接时启动）选项，然后选择相应的 COM 端口。确保已取消选择 Boot on Connect（连接时启动）。点击 OK（确认）。返回到 SFRA GUI，然后点击 Connect（连接）。

9. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击“Start Sweep”（启动扫描）来启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。可以通过查看 SFRA GUI 上的进度条以及检查控制卡背面用于指示 UART 活动的蓝色 LED 的闪烁情况来监视活动。完成之后，将立即显示一个包含开环图的图。将此与测量图进行比较，建模和测量之间存在良好的相关性，如图 3-18 所示。该操作证明设计的补偿器确实是稳定的，并且模型是准确的。注意：预计低频偏差低于 200Hz 并且这是已知现象，此处显示的测量值也是使用直流电源获得的，如果使用交流电源来模拟直流电源，则交流电源的输出阻抗会导致与下图的偏差

Gi OL Gain Model vs Measured with DC input


图 3-18. SFRA 运行与建模闭合电流环路、开环增益

频率响应数据也保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并根据 SFRA 运行的时间打上时间戳。

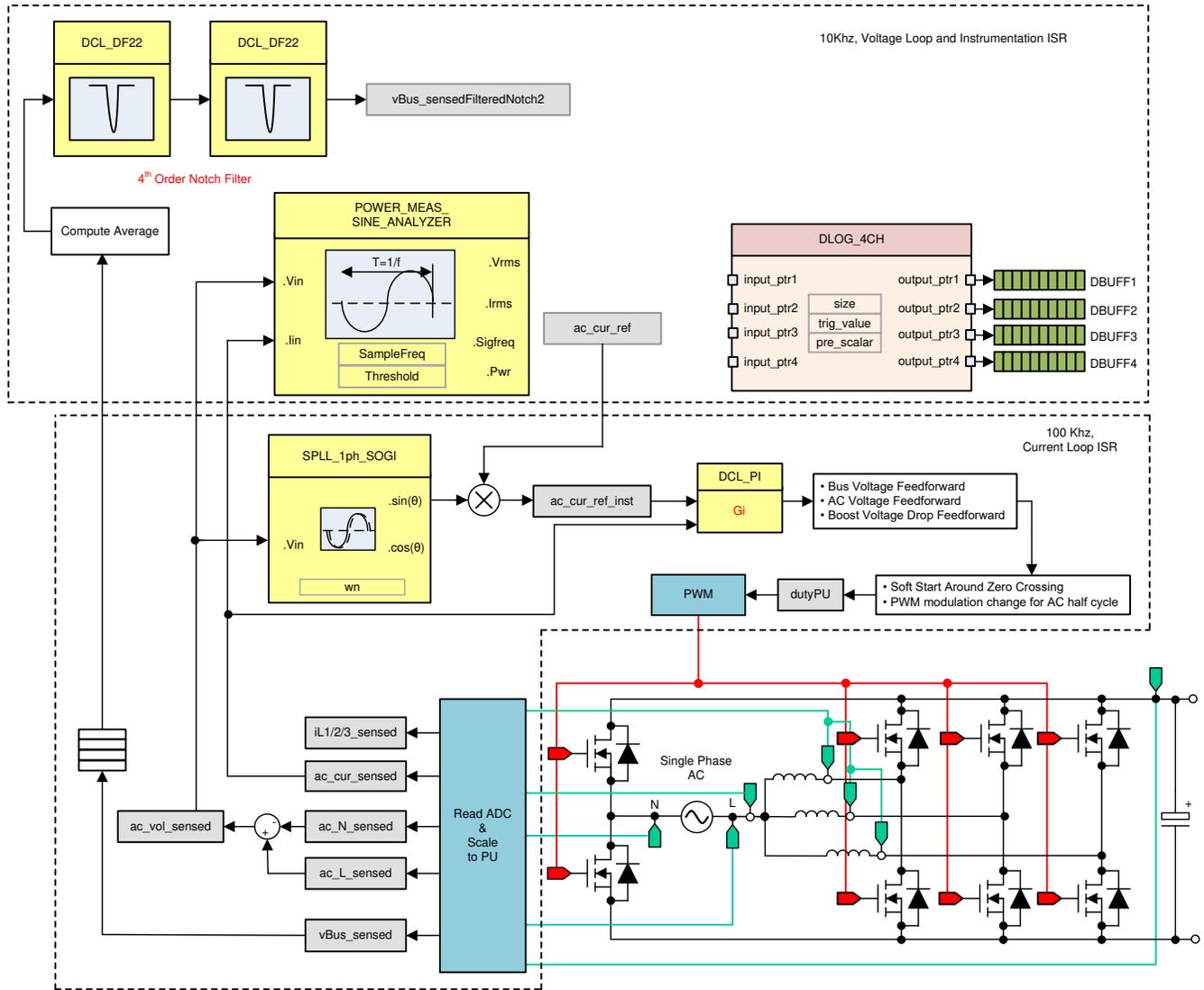
10. 或者，也可使用测得的受控体频率响应来设计电流补偿器：具体方法是在 `syscfg` 页面中再次点击 **Compensation Designer**，然后针对 GUI 上的受控体选项选择 **SFRA Data**（SFRA 数据）。这项操作使用测量的受控体信息来设计补偿器。该选项可用于微调补偿。默认情况下，补偿设计器指向最近运行的 SFRA。如果必须使用运行的前一个 SFRA 受控体信息，则用户可以选择 `SFRADData.csv` 文件（通过点击 **Browse SFRA Data** 浏览到该文件）。
11. 该操作验证了电流补偿器设计。
12. 若要使系统安全停止，请将输入直流电压降至零，并且观察 `TTPLPFC_vBus_sensed_Volts` 也降至零。
13. 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt**（暂停）按钮（) 或使用 **Target**（目标）→ **Halt**（暂停）来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位（）。
14. 点击 **Terminate Debug Session**（终止调试会话）（**Target**（目标）→ **Terminate all**（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.3 实验 3 : 闭合电流环路, 交流 (PFC)

在实验 3 中, 内侧电流环路是闭合的, 也就是说, 使用电流补偿器 G_i 控制电感器电流。对该电流补偿器 $++$ 的输出应用了直流总线和输出电压前馈, 以生成逆变器的占空比, 并在过零处对 PWM 进行软启动

如图 3-19 所示完成该构建的软件图。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 3-19. 实验 3 控制软件图：闭合电流环路，交流

若要运行该实验，请确保已设置硬件，如图 3-20 所示。请勿向电路板提供任何高压 (HV) 电源。

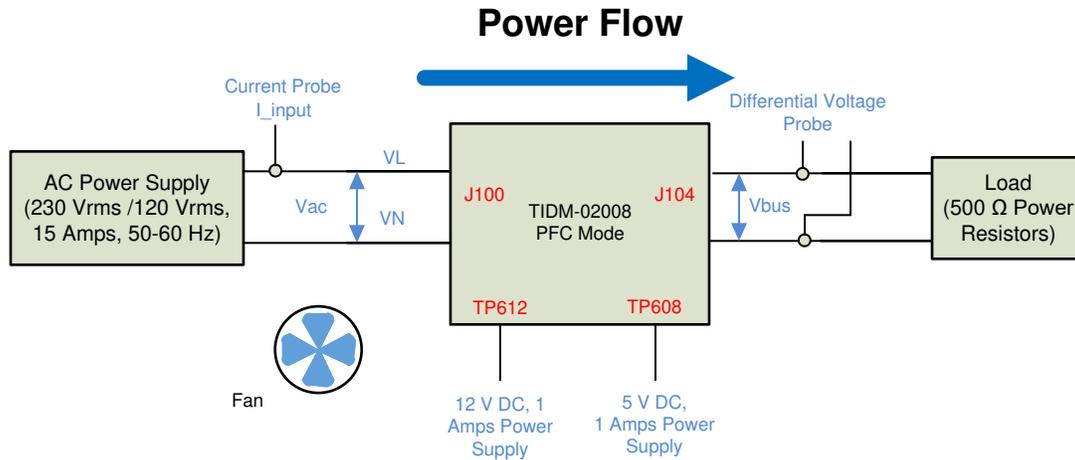


图 3-20. 交流输入的硬件设置

3.1.2.5.3.1 设置实验 3 的软件选项

1. powerSUITE 设置：在 *powerSUITE* 页面上，假设在 2 中选择了选项，在 *Project Options* (项目选项) 部分下选择 **Lab 3** (实验 3)。保存该页面。
2. 本实验中重新使用了先前构建中的电流补偿器，因此不需要执行额外的步骤来调整实验室中的电流环路。

3.1.2.5.3.2 生成和加载工程以及设置调试

1. 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project** (重建工程)。随后将成功构建工程。点击 **Run** (运行) → **Debug** (调试)，这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
2. 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open** (打开) 浏览到位于工程文件夹内的 `setupdebugenv_lab3.js` 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。点击观察窗口中的 **Continuous Refresh** (持续刷新) 按钮 (🔄)，以持续更新控制器中的值。观察窗口将如 3 所示。

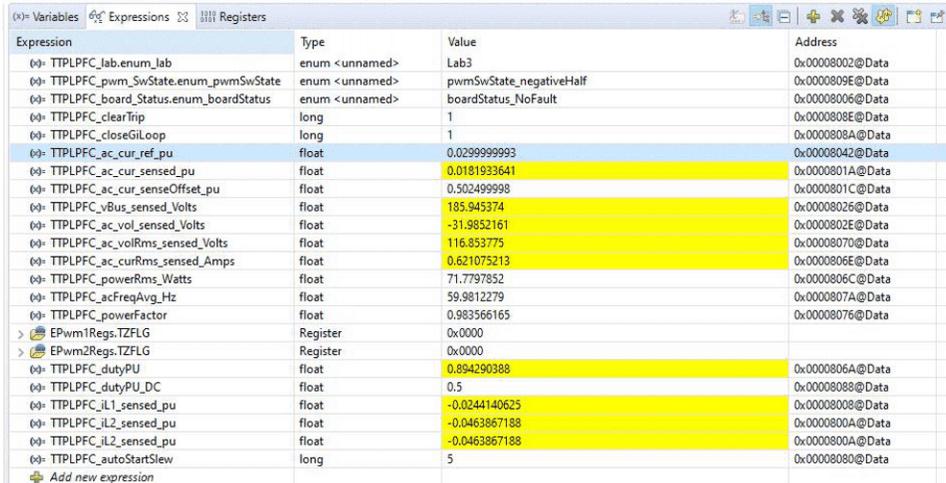
Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab3	0x00008002@Data
TTPLPFC_pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x0000809E@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_inputUnderVoltageTrip	0x00008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	0	0x0000808E@Data
TTPLPFC_closeGILoop	long	0	0x0000808A@Data
TTPLPFC_ac_cur_ref_pu	float	0.0299999993	0x00008042@Data
TTPLPFC_ac_cur_sensed_pu	float	0.0283173919	0x0000801A@Data
TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x0000801C@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	0.280229211	0x00008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	-0.792785595	0x0000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
TTPLPFC_powerRms_Watts	float	0.0	0x0000806C@Data
TTPLPFC_acFreqAvg_Hz	float	0.0	0x0000807A@Data
TTPLPFC_powerFactor	float	0.0	0x00008076@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.0099999978	0x0000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
TTPLPFC_iL1_sensed_pu	float	-0.00927734375	0x00008008@Data
TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_iL2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	0	0x00008080@Data

图 3-21. 实验 3：闭合电流环路“表达视图”

3. 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击 🔄 按钮以启用实时模式。

3.1.2.5.3.3 运行代码

1. 该工程被编程为等待输入电压超过 70Vrms 以驱动浪涌继电器，并清除跳闸。
2. 点击  以运行工程。
3. 现在施加约 120V 的输入电压，电路板就会脱离欠压状态，并且驱动浪涌继电器。跳闸清除，并消耗大约 0.55A RMS 的少量电流。观察窗口与图 3-22 类似。总线电压接近 180V。



Expression	Type	Value	Address
TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab3	0x0008002@Data
TTPLPFC_pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_negativeHalf	0x000809E@Data
TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_NoFault	0x0008006@Data
TTPLPFC_clearTrip	long	1	0x000808E@Data
TTPLPFC_closeGilLoop	long	1	0x000808A@Data
TTPLPFC_ac_cur_ref_pu	float	0.0299999993	0x0008042@Data
TTPLPFC_ac_cur_sensed_pu	float	0.0181933641	0x000801A@Data
TTPLPFC_ac_cur_senseOffset_pu	float	0.502499998	0x000801C@Data
TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	185.945374	0x0008026@Data
TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	-31.9852161	0x000802E@Data
TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	116.853775	0x0008070@Data
TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.621075213	0x000806E@Data
TTPLPFC_powerRms_Watts	float	71.7797852	0x000806C@Data
TTPLPFC_acFreqAvg_Hz	float	59.9812279	0x000807A@Data
TTPLPFC_powerFactor	float	0.983566165	0x0008076@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
TTPLPFC_dutyPU	float	0.894290388	0x000806A@Data
TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x0008088@Data
TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	-0.0244140625	0x0008008@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.0463867188	0x000800A@Data
TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.0463867188	0x000800A@Data
TTPLPFC_autoStartSlew	long	5	0x0008080@Data

图 3-22. 观察表达式、实验 3、闭合电流环路后的交流操作开始

4. 现在，缓慢增大 TTPLPFC_ac_cur_ref_pu 至 0.14，即 2.4A 输入，总线电压升至 380V。电压和电流波形如图 3-23 所示。

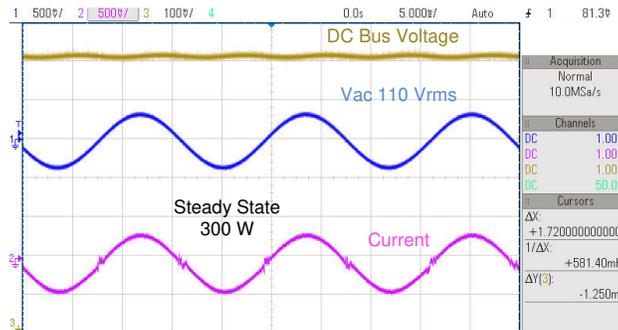


图 3-23. 输入交流输入、电流和输出直流电压波形

5. SFRA 集成在该构建的软件中，通过在硬件上进行测量来验证设计的补偿器是否能够提供足够的增益裕量和相位裕度。若要运行 SFRA，请使工程保持在运行状态，然后在 cfg 页面中点击 SFRA 图标。此时显示 SFRA GUI。
6. 在 SFRA GUI 上选择器件的相应选项。例如，对于 F28377D，选择“Floating Point”（浮点）。点击 Setup Connection（设置连接）。在弹出窗口中取消选中“boot on connect”（连接时启动）选项，然后选择相应的 COM 端口。点击 OK（确认）。返回到 SFRA GUI，然后点击 Connect（连接）。

7. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击“Start Sweep”（启动扫描）来启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。可以通过查看 SFRA GUI 上的进度条以及检查控制卡背面用于指示 UART 活动的蓝色 LED 的闪烁情况来监视活动。完成之后，将立即显示一个包含开环图的图，如图 3-24 所示。这类似于直流条件下看到的图；但交流谐波频率接近测量频率，因此可以看到一些额外的噪声。BW、PM 和 GM 数字与直流情况非常相似。注意，图 3-24 所示的图是使用直接网格交流输入获得的。当使用交流电源输出的交流电源交互时，可以观察到阻抗，这会影响到控制裕度。

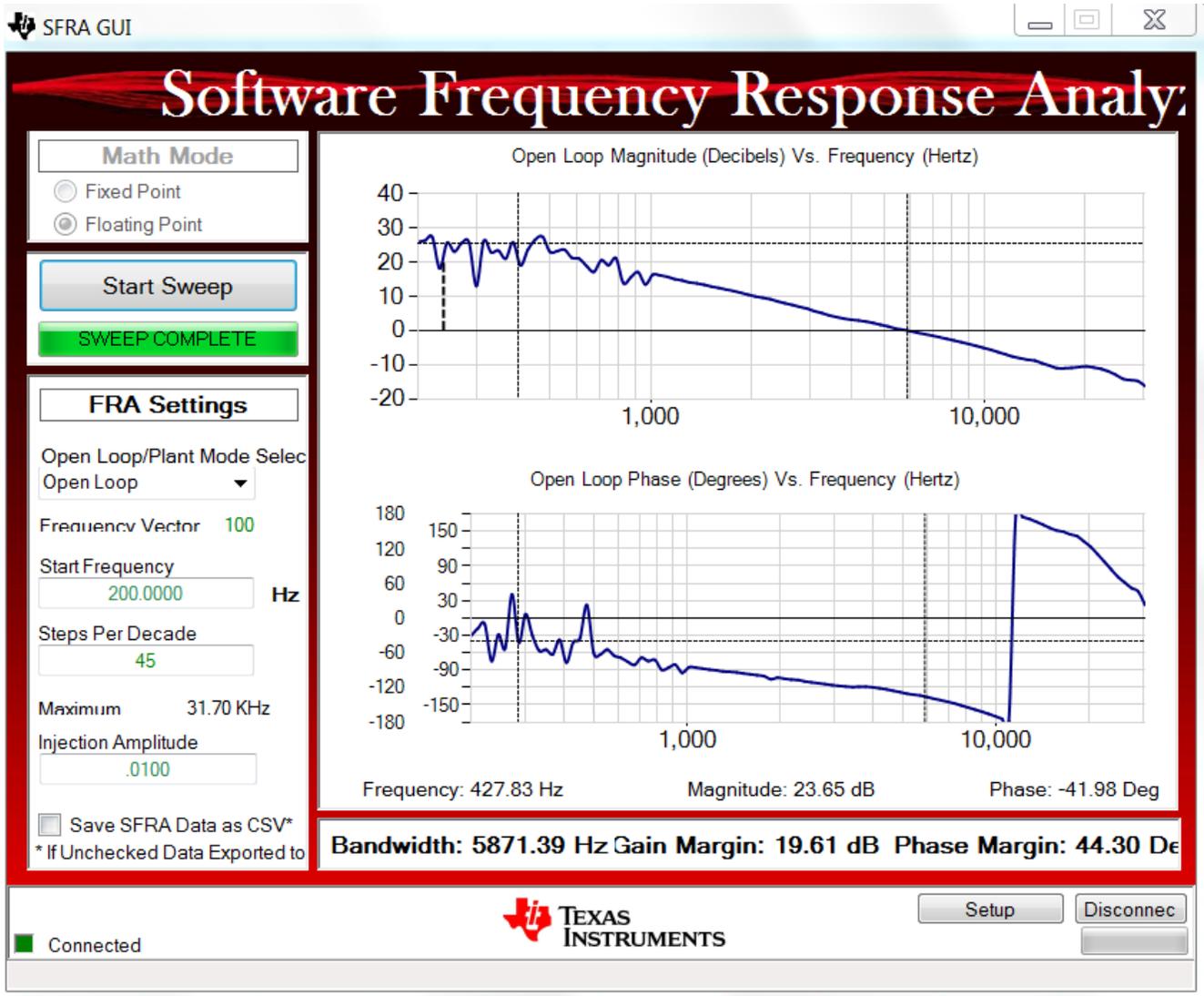


图 3-24. SFRA 运行、闭合电流环路、开环增益

8. 若要使系统安全停止，请先关闭交流电源的输出，从而将输入交流电压降至零，并且观察 TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 也降至零。
9. 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt**（暂停）按钮（）或使用 **Target**（目标）→ **Halt**（暂停）来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位（）。
10. 点击 **Terminate Debug Session**（终止调试会话）（**Target**（目标）→ **Terminate all**（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.4 实验 4：闭合电压和电流环路 (PFC)

在该实验中，在内侧电流环路闭合的情况下，外侧电压环路是闭合的。我们已在节 2.4.3 中得出了外侧电压环路的模型。我们使用了基于 PI 的补偿器，并通过补偿设计器对其进行调优，以用于外侧电压环路。

图 3-25 所示为该构建的软件图。

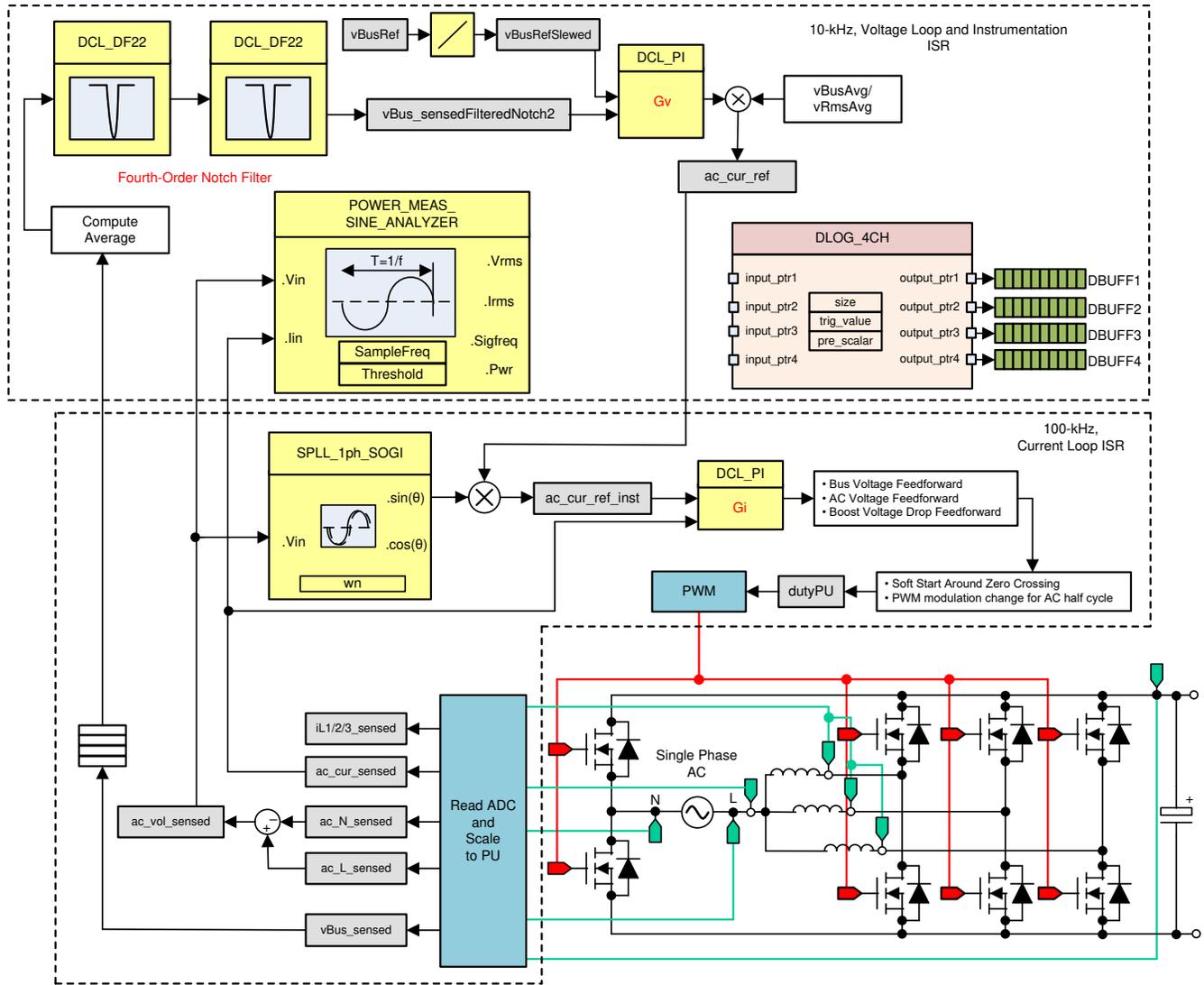


图 3-25. 实验 4 控制图：使用内侧电流环路进行输出电压控制

3.1.2.5.4.1 设置实验 4 的软件选项

1. 确保如图 3-20 中所述设置硬件。请勿向电路板提供任何高压 (HV) 电源。
2. powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 *Project Options* (工程选项) 部分下：
 - 选择“Lab” (实验) 选项下的 *Lab 4* (实验 4)，
 - 并禁用其他选项，例如 *Non Linear Voltage Loop*、*Adaptive Deadtime and Phase shedding* (非线性电压环路、自适应死区时间和切相)
3. 假设所有其他选项与节 3.1.2.5.1.1 中所指定的一样。
4. 在 *Control Loop Design* (控制环路设计) 下，选择 *Tuning* (调优) 作为 *Voltage Loop* (电压环路)。将样式预设设为 *DCL PI_C3*，保存该页面 (按 *Ctrl + S*)，然后点击“Compensation Designer”按钮 ()。
5. 确保在 powerSUITE cfg 页面中正确输入电路板的输出端连接的负载，因为该负载值用于电压补偿器的设计。

3.1.2.5.4.2 设计电压环路补偿器

- 然后补偿设计器以电压环路受控体模型启动，如图 3-26 所示。可以对 PI 补偿器进行编辑，以获取所需的增益裕量和相位裕度，同时请记住，电压环路的带宽与实现的 THD 之间具有反向关系。通常，在 PFC 应用中，该带宽保持在 10Hz 左右。

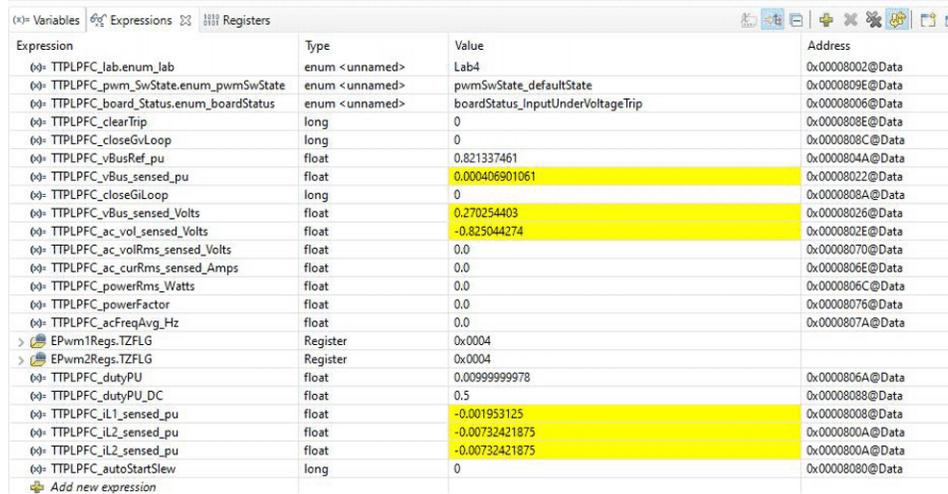


图 3-26. 使用补偿设计器进行电压环路 PI 补偿调优

- 对补偿器设计感到满意后，点击 **Save COMP** (保存 COMP)。该操作会将补偿器值保存到工程中。
 - 注意：如果未从解决方案适配器中选择工程，则系统不允许对补偿器进行更改。若要设计自己的补偿器，请通过解决方案适配器选择解决方案。
- 关闭补偿设计器并返回 **powerSUITE** 页面。使用 **Ctrl + S** 进行保存。

3.1.2.5.4.3 生成和加载工程以及设置调试

- 右键点击工程名称，然后点击 **Rebuild Project** (重建工程)。随后将成功构建工程。点击 **Run** (运行) → **Debug** (调试)，这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
- 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 **Open** (打开) 浏览到位于工程文件夹内的 `setupdebugenv_lab4.js` 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。点击观察窗口中的 **Continuous Refresh** (持续刷新) 按钮 ()，以持续更新控制器中的值。系统会显示观察窗口，如图 3-27 所示。



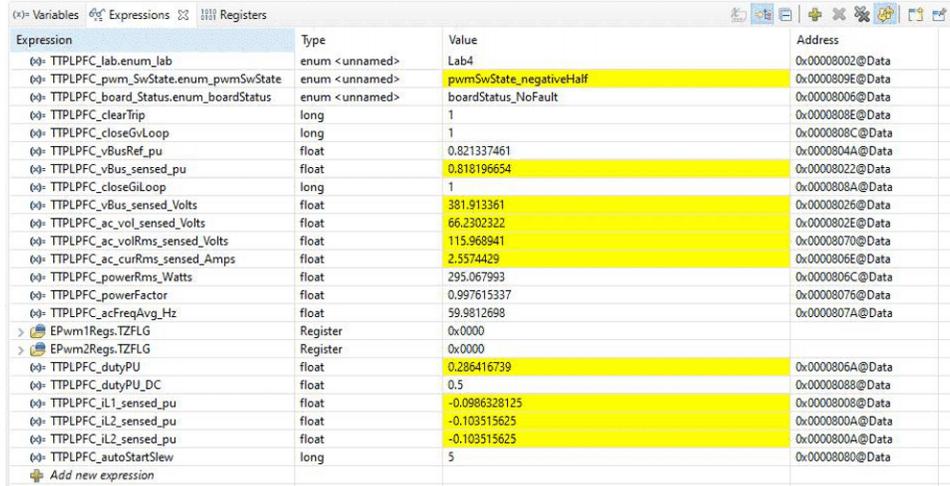
Expression	Type	Value	Address
(d) TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab4	0x00008002@Data
(d) TTPLPFC_pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x0000809E@Data
(d) TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_InputUnderVoltageTrip	0x00008006@Data
(d) TTPLPFC_clearTrip	long	0	0x0000808E@Data
(d) TTPLPFC_closeGvLoop	long	0	0x0000808C@Data
(d) TTPLPFC_vBusRef_pu	float	0.821337461	0x0000804A@Data
(d) TTPLPFC_vBus_sensed_pu	float	0.000406901061	0x00008022@Data
(d) TTPLPFC_closeGvLoop	long	0	0x0000808A@Data
(d) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	0.270254403	0x00008026@Data
(d) TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	-0.825044274	0x0000802E@Data
(d) TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	0.0	0x00008070@Data
(d) TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	0.0	0x0000806E@Data
(d) TTPLPFC_powerRms_Watts	float	0.0	0x0000806C@Data
(d) TTPLPFC_powerFactor	float	0.0	0x00008076@Data
(d) TTPLPFC_acFreqAvg_Hz	float	0.0	0x0000807A@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
(d) TTPLPFC_dutyPU	float	0.009999999978	0x0000806A@Data
(d) TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x00008088@Data
(d) TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	-0.001953125	0x00008008@Data
(d) TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
(d) TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.00732421875	0x0000800A@Data
(d) TTPLPFC_autoStartSlew	long	0	0x00008080@Data

图 3-27. 实验 4：表达视图

- 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。
- 点击  以运行工程
- 现在通过使用工具栏上的 **Halt** 按钮 () (暂停) 来暂停处理器。

3.1.2.5.4.4 运行代码

1. 该工程被编程为等待输入电压超过 70Vrms 以驱动浪涌继电器，并清除跳闸。
2. 点击  以运行工程。
3. 现在施加大约 120V 的输入电压，电路板就会脱离欠压状态，并且驱动浪涌继电器。跳闸清除，输出端升至 380V 直流电压。从交流输入端获取正弦电流。图 3-28 所示为程序在此阶段运行时的观察窗口。



Expression	Type	Value	Address
(0) TTPLPFC_lab.enum_lab	enum <unnamed>	Lab4	0x0008002@Data
(0) TTPLPFC_pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_negativeHalf	0x000809E@Data
(0) TTPLPFC_board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_NoFault	0x0008006@Data
(0) TTPLPFC_clearTrip	long	1	0x000808E@Data
(0) TTPLPFC_closeGvLoop	long	1	0x000808C@Data
(0) TTPLPFC_vBusRef_pu	float	0.821337461	0x000804A@Data
(0) TTPLPFC_vBus_sensed_pu	float	0.818196654	0x0008022@Data
(0) TTPLPFC_closeGvLoop	long	1	0x000808A@Data
(0) TTPLPFC_vBus_sensed_Volts	float	381.913361	0x0008026@Data
(0) TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts	float	66.2302322	0x000802E@Data
(0) TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts	float	115.968941	0x0008070@Data
(0) TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps	float	2.5574429	0x000806E@Data
(0) TTPLPFC_powerRms_Watts	float	295.067993	0x000806C@Data
(0) TTPLPFC_powerFactor	float	0.997615337	0x0008076@Data
(0) TTPLPFC_acFreqAvg_Hz	float	59.9812698	0x000807A@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
(0) TTPLPFC_dutyPU	float	0.286416739	0x000806A@Data
(0) TTPLPFC_dutyPU_DC	float	0.5	0x0008088@Data
(0) TTPLPFC_il1_sensed_pu	float	-0.0986328125	0x0008008@Data
(0) TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.103515625	0x000800A@Data
(0) TTPLPFC_il2_sensed_pu	float	-0.103515625	0x000800A@Data
(0) TTPLPFC_autoStartSlew	long	5	0x0008080@Data

图 3-28. 实验 4：应用交流电压后的“表达视图”

4. SFRA 集成在该构建的软件中，通过在硬件上进行测量来验证设计的补偿器是否能够提供足够的增益裕量和相位裕度。若要运行 SFRA，请使工程保持在运行状态，然后在 `cfg` 页面中点击 SFRA 图标。此时显示 SFRA GUI。
5. 在 SFRA GUI 上选择器件的相应选项。例如，对于 F28004x，选择“Floating Point”（浮点）。点击 *Setup Connection*（设置连接），然后在弹出窗口中取消选中“boot on connect”（连接时启动）选项，然后选择相应的 COM 端口。点击 *OK*（确认）。返回到 SFRA GUI，然后点击 *Connect*（连接）。

6. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击“Start Sweep”（启动扫描）来启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。可以通过查看 SFRA GUI 上的进度条以及检查控制卡背面用于指示 UART 活动的蓝色 LED 的闪烁情况来监视活动。完成之后，将立即显示一个包含开环图的图，如图 3-29 所示。该操作证明设计的补偿器确实是稳定的。

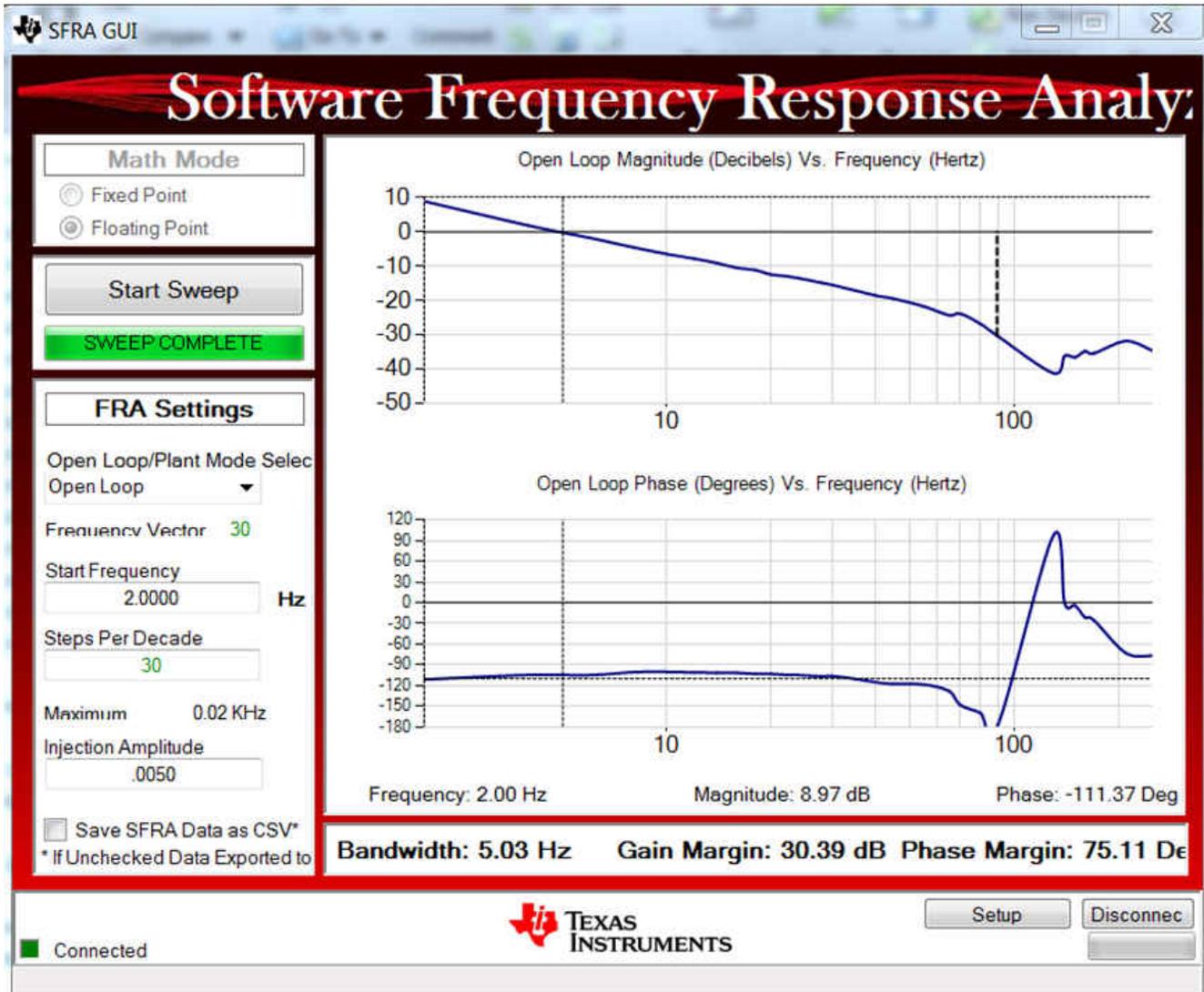


图 3-29. 在闭合电压环路上运行的 SFRA

频率响应数据也保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并根据 SFRA 运行的时间打上时间戳。

请注意测量的增益裕度和相位裕度接近于模拟值，如图 2-12 所示。

7. 可选。再次点击 CFG 页面中的“Compensation Designer”，然后针对 GUI 上的受控体选项选择 *SFRA Data*（SFRA 数据）。该选项使用测量受控体信息来设计补偿器，并且可用于微调补偿。默认情况下，补偿设计器指向最近运行的 SFRA。如果必须使用运行的前一个 SFRA 受控体信息，则用户可以选择 *SFRADData.csv* 文件（通过点击 *Browse SFRA Data* 浏览该文件）。完成之后，关闭补偿设计器以返回到 *cfg* 页面。
8. 该操作可验证电压补偿器设计。
9. 若要使系统安全停止，请将输入交流电压降至零，并且观察 *TTPLPFC_vBus_sensed_Volts* 也降至零。
10. 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 *Halt*（暂停）按钮（) 或使用 *Target*（目标）→ *Halt*（暂停）来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位（）。
11. 点击 *Terminate Debug Session*（终止调试会话）（*Target*（目标）→ *Terminate all*（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。


3.1.2.5.5 实验 5：开环，直流（逆变器）

在该构建中，电路板以开环方式激励（采用固定占空比），用于逆变器模式操作。占空比通过 *dutyPU_DC* 变量进行控制。该测试程序类似于实验 1。该构建的软件结构与实验 1 中的软件结构相同，如图 3-9 所示。需要注意的是，实验 5 的硬件设置不同于实验 1。在该构建中，直流电源必须连接到 J104，并且电阻负载必须移动到 J100。

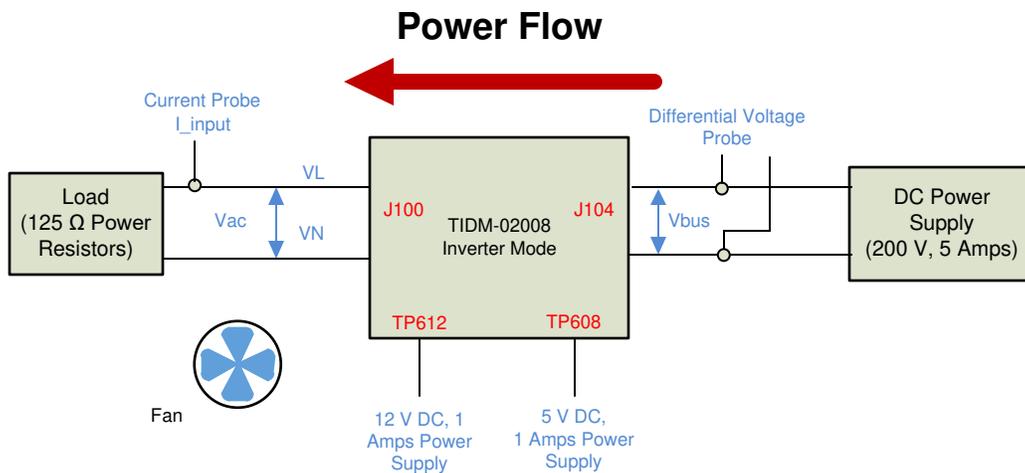


图 3-30. 实验 5 的硬件设置

3.1.2.5.5.1 设置实验 5 的软件选项

1. powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 *Project Options*（工程选项）部分下：
 - 选择“Lab”（实验）选项下的“Lab 5”（实验 5），
 - 并禁用其他选项，例如 *Non Linear Voltage Loop*、*Adaptive Deadtime and Phase shedding*（非线性电压环路、自适应死区时间和切相）
2. 如果这是经改编的解决方案，请编辑 *Voltage and Current Sensing Parameters*（电压和电流感应参数）下的设置。用户可以参阅 *calculations.xlsx* 文件（位于 C2000Ware DigitalPower SDK 安装目录 $\langle install_location \rangle \backslash solutions \backslash tidm_02008 \backslash hardware$ 下），详细了解 powerSUITE 页面的检测电路以及如何计算最大范围
3. 在“Power Stage Parameters”（功率级参数）下，指定开关频率、死区和额定功率。保存该页面。

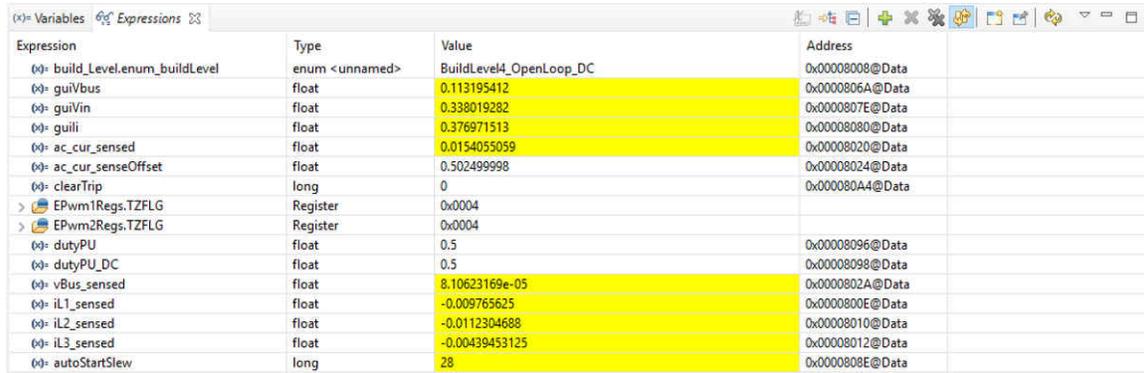
3.1.2.5.5.2 生成和加载工程

1. 右键点击工程名称，然后点击 *Rebuild Project*（重建工程）。
2. 随后将成功构建工程。

3. 在 *Project Explorer* 中，确保在 *targetconfigs* 项下将正确的目标配置文件设置为“Active”（有效）（图 3-4）。
4. 然后点击 *Run*（运行）→ *Debug*（调试）。此操作会启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。
5. 然后工程将加载到器件上，同时 *CCS* 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。

3.1.2.5.5.3 设置调试环境窗口

1. 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 *View*（视图）→ *Scripting Console*（脚本编写控制台）以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击“open”（打开），然后浏览到位于项目文件夹内的 *setupdebugenv_lab5.js* 脚本文件。该脚本文件会采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。点击观察窗口中的“Continuous Refresh”（持续刷新）按钮，以持续更新控制器中的值。



Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel4_OpenLoop_DC	0x00008008@Data
guiVbus	float	0.113195412	0x0000806A@Data
guiVin	float	0.338019282	0x0000807E@Data
guili	float	0.376971513	0x00008080@Data
ac_cur_sensed	float	0.0154055059	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
dutyPU	float	0.5	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
vBus_sensed	float	8.10623169e-05	0x0000802A@Data
il1_sensed	float	-0.009765625	0x0000800E@Data
il2_sensed	float	-0.0112304688	0x00008010@Data
il3_sensed	float	-0.00439453125	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	28	0x0000808E@Data

图 3-31. 实验 5 表达视图

2. 点击  以运行工程
3. 现在通过使用工具栏上的 *Halt*（暂停）按钮（）来暂停处理器

3.1.2.5.5.4 运行代码

1. 现在，点击  以再次运行工程。
2. 在几秒钟内，浪涌继电器发出咔嚓声，软件在具有直流的实验中被编程为执行此操作。跳闸清除，并施加 0.5 的占空比。
3. 在观察视图中，定期查看是否更新了 *guiVin*、*guiVbus*、*guili* 变量。
 - 注意：现在未通电，因此该值将接近于零。
4. 现在，从 0 到 240V 缓慢增大输入直流电压。输出电压显示电压下降（降压转换器操作），因为默认设置施加了一个 0.5 PU 的稳定占空比。如果消耗高电流，请验证电压端子是否交换。如果为真，请先将电压降至零并在恢复测试之前纠正问题
5. 验证电压感测：确保 *TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts* 和 *TTPLPFC_vBus_sensed_Volts* 显示正确的值，对于 240V 直流输入，*TTPLPFC_ac_vol_sensed_Volts* 接近 120V。这就以某种方式实现了对电路板电压感测的验证。
6. 验证电流感测：注意给定测试条件下的 *TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps*；此值接近于 1A。

Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel4_OpenLoop_DC	0x00008008@Data
guiVbus	float	238.919022	0x0000806A@Data
guiVin	float	115.81263	0x0000807E@Data
guili	float	-0.708986521	0x00008080@Data
ac_cur_sensed	float	-0.0313847065	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
dutyPU	float	0.5	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
vBus_sensed	float	0.516438842	0x0000802A@Data
il1_sensed	float	-0.0249023438	0x0000800E@Data
il2_sensed	float	-0.0302734375	0x00008010@Data
il3_sensed	float	-0.0341796875	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	101	0x0000808E@Data

图 3-32. 实验 5 “显示测量的电压和电流的观察表达式”

- 完成后，将输入电压降至零，然后等待总线电压降至零。
- 对该构建的检查到此就结束了，成功完成该构建后，会验证以下事项：
 - 电压和电流感测以及调节正确
 - 电流环路 ISR 和电压环路仪表 ISR 中实验 5 代码的中断生成和执行
 - PWM 驱动器和开关

如果观察到任何问题，则需要仔细检查硬件，以消除所有构建问题，等等。

- 现在可停止控制器并且终止调试连接。
- 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 () 或使用 **Target** (目标) → **Halt** (暂停) 来暂停处理器。然后单击  以使 MCU 退出实时模式。最后，单击  以对 MCU 进行复位。
- 单击 **Terminate Debug Session** (终止调试会话) (**Target** (目标) → **Terminate all** (终止全部)) 以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.6 实验 6：开环，交流 (逆变器)

在该构建中，电路板以开环方式激励 (采用正弦占空比)，用于逆变器模式操作。占空比通过 **dutyPU** 变量进行控制。该测试程序类似于实验 5。硬件设置与图 3-30 所示的实验 5 相同。

3.1.2.5.6.1 设置实验 6 的软件选项

设置 powerSUITE 设置的软件选项：在 powerSUITE 页面上的 **Project Options** (工程选项) 部分下：

- 选择“Lab” (实验) 选项下的“Lab 6” (实验 6)，
- 并禁用其他选项，例如 **Non Linear Voltage Loop**、**Adaptive Deadtime and Phase shedding** (非线性电压环路、自适应死区时间和切相)

3.1.2.5.6.2 生成和加载工程以及设置调试

- 右键单击工程名称，然后单击 **Rebuild Project** (重建工程)。随后将成功构建工程。单击 **Run** (运行) → **Debug** (调试)，这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
- 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，单击 **Open** (打开) 浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv_lab6.js** 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。单击观察窗口中的 **Continuous Refresh** (持续刷新) 按钮 ()，以持续更新控制器中的值。观察窗口将如 3 所示。

Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel4_OpenLoop_AC	0x00008008@Data
guiVbus	float	0.10148789	0x0000806A@Data
guiVIn	float	0.0376216695	0x0000807E@Data
guiI1	float	0.39333266	0x00008080@Data
ac_cur_sensed	float	0.0151254535	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
dutyPU	float	0.00999999978	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
vBus_sensed	float	8.12212675e-05	0x0000802A@Data
iL1_sensed	float	-0.0087890625	0x0000800E@Data
iL2_sensed	float	-0.00927734375	0x00008010@Data
iL3_sensed	float	-0.0087890625	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	0	0x0000808E@Data
guiVrms	float	0.0	0x00008076@Data

图 3-33. 实验 6 “表达视图”

3. 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。

3.1.2.5.6.3 运行代码

- 现在，点击  以再次运行工程。
- 当直流母线电压高于 110V 时，浪涌继电器闭合。跳闸清除，并应用正弦占空比。
- 在观察视图中，定期查看是否更新了 TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts、TTPLPFC_vBus_sensed_Volts、TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps 变量。
 - 注意：现在未通电，因此该值将接近于零。
- 现在，缓慢增大输入直流电压（从 0 到 240V）。
- 验证电压检测：确保 TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts 和 TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 显示正确的值，对于 240V 直流输入，TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts 接近 85V。这就以某种方式实现了对电路板电压感测的验证。
- 验证电流感测：注意给定测试条件下的 TTPLPFC_ac_curRms_sensed_Amps；此值接近于 0.65A。

Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel4_OpenLoop_AC	0x00008008@Data
guiVbus	float	239.066727	0x0000806A@Data
guiVIn	float	77.9790115	0x0000807E@Data
guiI1	float	-0.0527781695	0x00008080@Data
ac_cur_sensed	float	0.0417695045	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
dutyPU	float	-0.499840677	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
vBus_sensed	float	0.516113281	0x0000802A@Data
iL1_sensed	float	-0.00439453125	0x0000800E@Data
iL2_sensed	float	0.0190429688	0x00008010@Data
iL3_sensed	float	-0.00244140625	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	5	0x0000808E@Data
guiVrms	float	83.0027084	0x00008076@Data

图 3-34. 实验 6 “显示测量的电压和电流的观察表达式”

- 现在可停止控制器并且终止调试连接。
- 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt**（暂停）按钮 () 或使用 **Target**（目标）→ **Halt**（暂停）来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，点击  以对 MCU 进行复位。
- 点击 **Terminate Debug Session**（终止调试会话）（**Target**（目标）→ **Terminate all**（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.7 实验 7：闭合电流环路，直流（具有电阻负载的逆变器）

在该实验中，内侧电流环路是闭合的，也就是说，使用电流补偿器 G_i 控制电感器电流。电流环路模型与节 3.1.2.5.2 所示的 PFC 模式操作相同，但电流基准的极性与 PFC 模式（负电流基准）相反。

3.1.2.5.7.1 设置实验 7 的软件选项

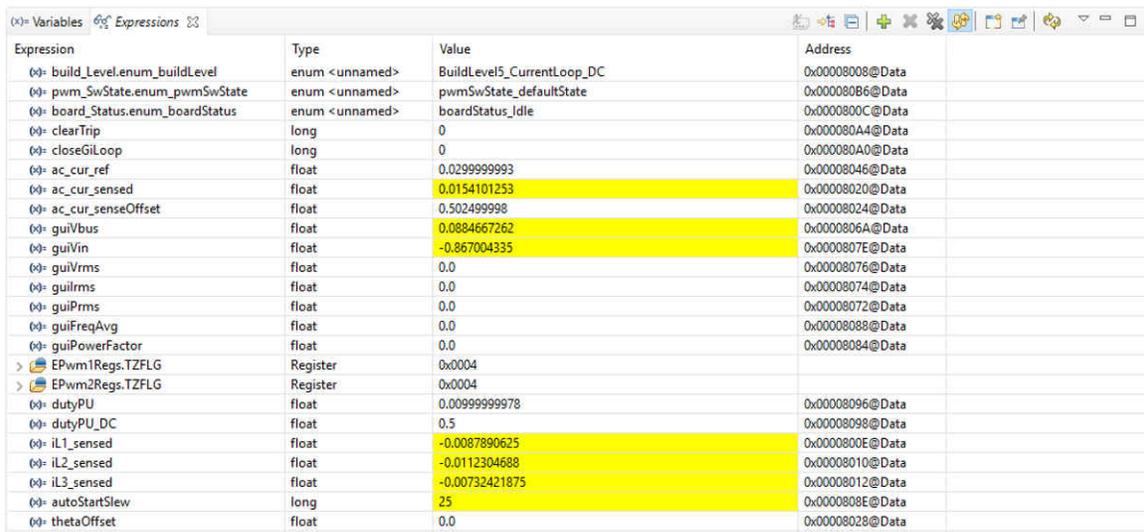
1. 确保如图 3-30 中所述设置硬件。先不要向电路板提供任何高压 (HV) 电源。
2. powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 *Project Options*（工程选项）部分下：
 - 选择“Lab”（实验）选项下的“Lab 7”（实验 7）。
 - 在“PFC INPUT/INV 输出”选项下将输入设为“DC”
 - 并禁用其他选项，例如 *Non Linear Voltage Loop*、*Adaptive Deadtime and Phase shedding*（非线性电压环路、自适应死区时间和切相）
3. 假设所有其他选项与之前节 3.1.2.5.5.1 中所指定的一样。
4. 在 *Control Loop Design*（控制环路设计）下，系统会自动选择用于电流环路调优的选项 (*Tuning*（调优）→ *Current Loop*（当前环路）→ *COMP1* → *DCL_PI_C1*)。现在点击 *Compensation Designer* 图标 ()。

3.1.2.5.7.2 设计电流环路补偿器

逆变器模式的补偿器设计与 PFC 模式相同。节 3.1.2.5.2.2 中介绍了补偿器设计过程。

3.1.2.5.7.3 生成和加载工程以及设置调试

1. 右键点击工程名称，然后点击 *Rebuild Project*（重建工程）。随后将成功构建工程。点击 *Run*（运行）→ *Debug*（调试），这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
2. 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 *View*（视图）→ *Scripting Console*（脚本编写控制台）以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，点击 *Open*（打开）浏览到位于工程文件夹内的 *setupdebugenv_lab7.js* 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。点击观察窗口中的 *Continuous Refresh*（持续刷新）按钮 ()，以持续更新控制器中的值。观察窗口将如图 3-35 所示。



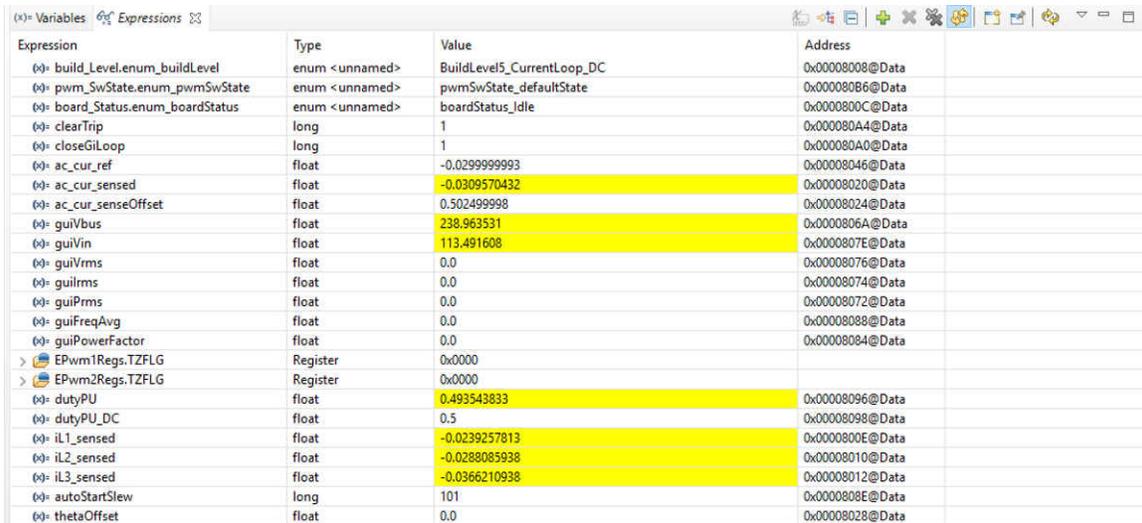
Expression	Type	Value	Address
(*) build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel5_CurrentLoop_DC	0x00008008@Data
(*) pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x000080B6@Data
(*) board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x0000800C@Data
(*) clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
(*) closeGilLoop	long	0	0x000080A0@Data
(*) ac_cur_ref	float	0.0299999993	0x00008046@Data
(*) ac_cur_sensed	float	0.0154101253	0x00008020@Data
(*) ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
(*) guiVbus	float	0.0884667262	0x0000806A@Data
(*) guiVin	float	-0.867004335	0x0000807E@Data
(*) guiVrms	float	0.0	0x00008076@Data
(*) guilrms	float	0.0	0x00008074@Data
(*) guiPrms	float	0.0	0x00008072@Data
(*) guiFreqAvg	float	0.0	0x00008088@Data
(*) guiPowerFactor	float	0.0	0x00008084@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
(*) dutyPU	float	0.00999999978	0x00008096@Data
(*) dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
(*) il1_sensed	float	-0.0087890625	0x0000800E@Data
(*) il2_sensed	float	-0.0112304688	0x00008010@Data
(*) il3_sensed	float	-0.00732421875	0x00008012@Data
(*) autoStartSlew	long	25	0x0000808E@Data
(*) thetaOffset	float	0.0	0x00008028@Data

图 3-35. 实验 7：闭合电流环路表达视图

3. 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。
4. 点击  以运行工程
5. 现在通过使用工具栏上的 *Halt*（暂停）按钮 () 来暂停处理器。

3.1.2.5.7.4 运行代码

1. 该工程被编程为驱动浪涌继电器并在设定的时间后清除跳闸，即 `TTPLPFC_autoStartSlew==100`。软件在具有直流的实验中被编程为执行此操作。必须在运行后和此自动压摆计数器达到 100 之前施加输入电压。如果计数器达到 100，在于输入端施加电压之前，必须将代码复位。对于必须使控制器退出实时模式的情况，执行复位并重新启动。
2. 现在，点击  以运行工程。
3. 在 `autoStartSlew` 达到 100 之前施加约 120V 的输入电压。一旦 `autoStartSlew` 达到 100，浪涌继电器即触发，PWM 跳闸被清除，同时关闭电流环路标志。
4. `TTPLPFC_ac_cur_ref` 默认设置为 -0.03，输出电压接近 120V，输出电流接近 1A。
5. 现在，缓慢增大 `Vbus=240V`，看看输出电压和电流是否保持在 120V 和 1A。



Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel5_CurrentLoop_DC	0x00008008@Data
pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x00008086@Data
board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_Idle	0x0000800C@Data
clearTrip	long	1	0x000080A4@Data
closeGilLoop	long	1	0x000080A0@Data
ac_cur_ref	float	-0.0299999993	0x00008046@Data
ac_cur_sensed	float	-0.0309570432	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
guiVbus	float	238.963531	0x0000806A@Data
guiVin	float	113.491608	0x0000807E@Data
guiVrms	float	0.0	0x00008076@Data
guilrms	float	0.0	0x00008074@Data
guiPrms	float	0.0	0x00008072@Data
guiFreqAvg	float	0.0	0x00008088@Data
guiPowerFactor	float	0.0	0x00008084@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
dutyPU	float	0.493543833	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
iL1_sensed	float	-0.0239257813	0x0000800E@Data
iL2_sensed	float	-0.0288085938	0x00008010@Data
iL3_sensed	float	-0.0366210938	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	101	0x0000808E@Data
thetaOffset	float	0.0	0x00008028@Data

图 3-36. 观察表达式、实验 7、闭合电流环路后的交流

6. 在此构建中，SFRA 可以测量频率响应。但是，阻性负载会改变受控体极位置，测量结果与图 3-24 不同。在实验 8 中，将重新访问逆变器模式的 SFRA。
7. 若要使系统安全停止，请将输入直流电压降至零，并且观察 `TTPLPFC_vBus_sensed_Volts` 也降至零。
8. 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 () 或使用 **Target** (目标) → **Halt** (暂停) 来暂停处理器。然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位 ()。
9. 点击 **Terminate Debug Session** (终止调试会话) (**Target** (目标) → **Terminate all** (终止全部)) 以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.8 实验 8：闭合电流环路，交流 (具有电阻负载的逆变器)

在该实验中，内侧电流环路是闭合的，也就是说，使用电流补偿器 `Gi` 控制电感器电流。对该电流补偿器的输出应用了直流总线和输出电压前馈，以生成逆变器的占空比，并在过零处对 PWM 进行软启动。除基准电流的方向外，电流环路模型与节 3.1.2.5.2 所示的 PFC 模式操作相同。

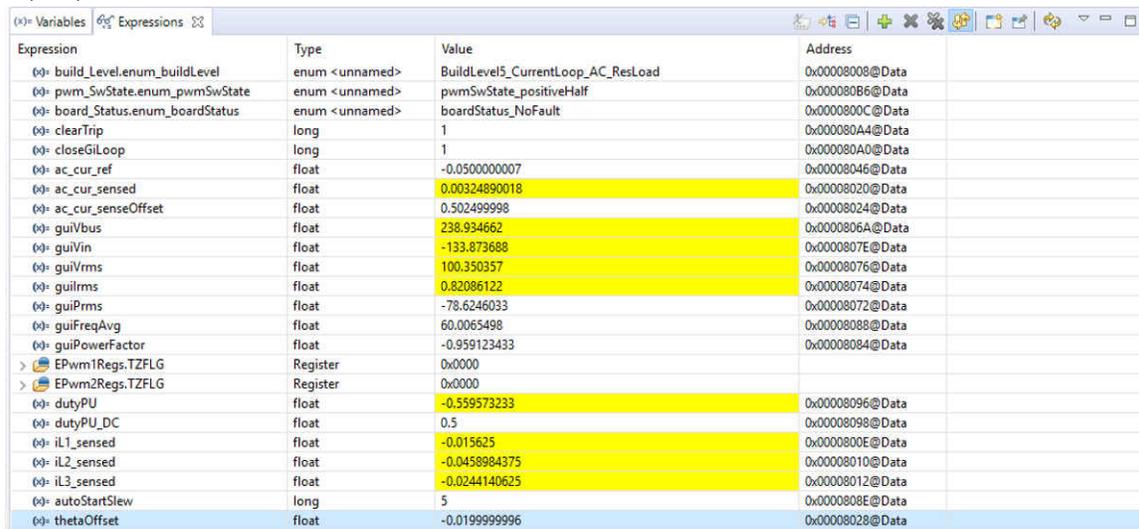
3.1.2.5.8.1 设置实验 8 的软件选项

1. 确保如图 3-10 中所述设置硬件。先不要向电路板提供任何高压 (HV) 电源。
2. **powerSUITE** 设置：在 **powerSUITE** 页面上的 **Project Options** (工程选项) 部分下：
 - 选择“Lab” (实验) 选项下的“Lab 8” (实验 8)，
 - 并禁用其他选项，例如 **Non Linear Voltage Loop**、**Adaptive Deadtime and Phase shedding** (非线性电压环路、自适应死区时间和切相)
3. 假设所有其他选项与节 3.1.2.5.5.1 中所指定的相同。

4. 在 *Control Loop Design* (控制环路设计) 下, 系统会自动选择用于电流环路调优的选项 (*Tuning* (调优) → *Current Loop* (当前环路) → *COMP1* → *DCL_PI_C1*)。现在点击 *Compensation Designer* 图标 ()。

3.1.2.5.8.2 生成和加载工程以及设置调试

- 右键点击工程名称, 然后点击 *Rebuild Project* (重建工程)。随后将成功构建工程。点击 *Run* (运行) → *Debug* (调试), 这将启动调试会话。对于双 CPU 器件, 可能会显示一个窗口, 可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中, 选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上, 同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
- 要在“Watch”和“Expressions”窗口中添加变量, 请点击 *View* → *Scripting Console* 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角, 点击 *Open* 浏览到位于工程文件夹内的 *setupdebugenv_lab8.js* 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充“Watch”窗口。点击观察窗口中的 *Continuous Refresh* (持续刷新) 按钮 () , 以持续更新控制器中的值。观察窗口将如图 3-35 所示。



Expression	Type	Value	Address
(*) build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	Build_Level5_CurrentLoop_AC_ResLoad	0x00008008@Data
(*) pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_positiveHalf	0x000080B6@Data
(*) board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_NoFault	0x0000800C@Data
(*) clearTrip	long	1	0x000080A4@Data
(*) closeGilLoop	long	1	0x000080A0@Data
(*) ac_cur_ref	float	-0.0500000007	0x00008046@Data
(*) ac_cur_sensed	float	0.00324890018	0x00008020@Data
(*) ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
(*) guiVbus	float	238.934662	0x0000806A@Data
(*) guiVin	float	-133.873688	0x0000807E@Data
(*) guiVrms	float	100.350357	0x00008076@Data
(*) guIrms	float	0.82086122	0x00008074@Data
(*) guiPrms	float	-78.6246033	0x00008072@Data
(*) guiFreqAvg	float	60.0065498	0x00008088@Data
(*) guiPowerFactor	float	-0.959123433	0x00008084@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
(*) dutyPU	float	-0.559573233	0x00008096@Data
(*) dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
(*) iL1_sensed	float	-0.015625	0x0000800E@Data
(*) iL2_sensed	float	-0.0458984375	0x00008010@Data
(*) iL3_sensed	float	-0.0244140625	0x00008012@Data
(*) autoStartSlew	long	5	0x0000808E@Data
(*) thetaOffset	float	-0.0199999996	0x00008028@Data

图 3-37. 实验 8 : 闭合电流环路表达视图

- 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。
- 点击  以运行工程
- 现在通过使用工具栏上的 *Halt* (暂停) 按钮 () 来暂停处理器。

3.1.2.5.8.3 运行代码

- 该工程被编程为等待直流总线电压超过 110V 以驱动浪涌继电器, 并清除跳闸。
- 点击  以运行工程。
- 现在施加约 120V 的输入电压, 电路板就会脱离欠压状态, 然后驱动浪涌继电器, 将 *TTPLPFC_pwmSwState* 从 *pwmSwState_defaultState* 更改为 *pwmSwState_normalOperation* 以启用 PWM 输出。默认情况下, **PWM 输出关闭, 如果不选择该选项, 逆变器将无法工作。**
- 缓慢增大总线电压至 240V, 并将 *TTPLPFC_ac_cur_ref* 设为 -0.05。观察窗口与图 3-22 类似。逆变器输出电压和电流的 RMS 值分别接近 100V 和 0.8A。

Expression	Type	Value	Address
0- build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel5_CurrentLoop_AC_ResLoad	0x00008008@Data
0- pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_positiveHalf	0x000080B6@Data
0- board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_NoFault	0x0000800C@Data
0- clearTrip	long	1	0x000080A4@Data
0- closeGilLoop	long	1	0x000080A0@Data
0- ac_cur_ref	float	-0.0500000007	0x00008046@Data
0- ac_cur_sensed	float	0.00324890018	0x00008020@Data
0- ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
0- guiVbus	float	238.934662	0x0000806A@Data
0- guiVin	float	-133.873688	0x0000807E@Data
0- guiVrms	float	100.350357	0x00008076@Data
0- guiIrms	float	0.82086122	0x00008074@Data
0- guiPrms	float	-78.6246033	0x00008072@Data
0- guiFreqAvg	float	60.0065498	0x00008088@Data
0- guiPowerFactor	float	-0.959123433	0x00008084@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
0- dutyPU	float	-0.559573233	0x00008096@Data
0- dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
0- iL1_sensed	float	-0.015625	0x0000800E@Data
0- iL2_sensed	float	-0.0458984375	0x00008010@Data
0- iL3_sensed	float	-0.0244140625	0x00008012@Data
0- autoStartSlew	long	5	0x0000808E@Data
0- thetaOffset	float	-0.0199999996	0x00008028@Data

图 3-38. 观察表达式、实验 8、闭合电流环路后的交流

- 若要使系统安全停止，请先关闭交流电源的输出，从而将输入交流电压降至零，并且观察 TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts 也降至零。
- 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 () 或使用 **Target** (目标) → **Halt** (暂停) 来暂停处理器。然后单击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位 ()。
- 单击 **Terminate Debug Session** (终止调试会话) (**Target** (目标) → **Terminate all** (终止全部)) 以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.9 实验 9：闭合电流环路 (并网逆变器)

在该实验中，在并网条件下，内侧电流环路是闭合的。对该电流补偿器的输出应用了直流总线和输出电压前馈，以生成逆变器的占空比，并在过零处对 PWM 进行软启动。电流环路模型与节 3.1.2.5.2 所示的 PFC 模式操作相同。

3.1.2.5.9.1 设置实验 9 的软件选项

- powerSUITE 设置：在 powerSUITE 页面上的 **Project Options** (工程选项) 部分下：
 - 选择“Lab” (实验) 选项下的“Lab 9” (实验 9)
 - 并禁用其他选项，例如 **Non Linear Voltage Loop**、**Adaptive Deadtime and Phase shedding** (非线性电压环路、自适应死区时间和切相)
- 假设所有其他选项与节 3.1.2.5.5.1 中所指定的一样。
- 在 **Control Loop Design** (控制环路设计) 下，系统会自动选择用于电流环路调优的选项 (**Tuning** (调优) → **Current Loop** (当前环路) → **COMP1** → **DCL_PI_C1**)。现在单击 **Compensation Designer** 图标 ()。

3.1.2.5.9.2 生成和加载工程以及设置调试

- 右键单击工程名称，然后单击 **Rebuild Project** (重建工程)。随后将成功构建工程。单击 **Run** (运行) → **Debug** (调试)，这将启动调试会话。对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，可以在其中选择必须执行调试的 CPU。在本例中，选择“CPU1”。然后工程将加载到器件上，同时 CCS 调试视图将变为有效状态。代码将在主例程开始处停止。
- 要在观察和表达窗口中添加变量，请点击 **View** (视图) → **Scripting Console** (脚本编写控制台) 以打开脚本控制台对话框。在该控制台的右上角，单击 **Open** (打开) 浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv_lab9.js** 脚本文件。该文件将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。单击观察窗口中的 **Continuous Refresh** (持续刷新) 按钮 ()，以持续更新控制器中的值。观察窗口将如图 3-35 所示。

Expression	Type	Value	Address
(*) build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel6_CurrentLoop_GridConnected	0x00008008@Data
(*) pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_defaultState	0x000080B6@Data
(*) board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_InputUnderVoltageTrip	0x0000800C@Data
(*) clearTrip	long	0	0x000080A4@Data
(*) closeGilLoop	long	0	0x000080A0@Data
(*) ac_cur_ref	float	0.0299999993	0x00008046@Data
(*) ac_cur_sensed	float	0.0174335241	0x00008020@Data
(*) ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
(*) guiVbus	float	0.0863133222	0x0000806A@Data
(*) guiVin	float	0.0752274767	0x0000807E@Data
(*) guiVrms	float	0.0	0x00008076@Data
(*) guilrms	float	0.0	0x00008074@Data
(*) guiPrms	float	0.0	0x00008072@Data
(*) guiFreqAvg	float	0.0	0x00008088@Data
(*) guiPowerFactor	float	0.0	0x00008084@Data
> EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0004	
> EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0004	
(*) dutyPU	float	0.00999999978	0x00008096@Data
(*) dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
(*) il1_sensed	float	-0.0068359375	0x0000800E@Data
(*) il2_sensed	float	-0.00927734375	0x00008010@Data
(*) il3_sensed	float	-0.00537109375	0x00008012@Data
(*) autoStartSlew	long	0	0x0000808E@Data
(*) thetaOffset	float	0.0	0x00008028@Data

图 3-39. 实验 9：闭合电流环路（电网连接）表达视图

- 将鼠标悬停在水平工具栏中的按钮上并点击  按钮以启用实时模式。
- 点击  以运行工程
- 现在通过使用工具栏上的 *Halt*（暂停）按钮 () 来暂停处理器。

3.1.2.5.9.3 运行代码：仿真并网条件（仅限验证目的）

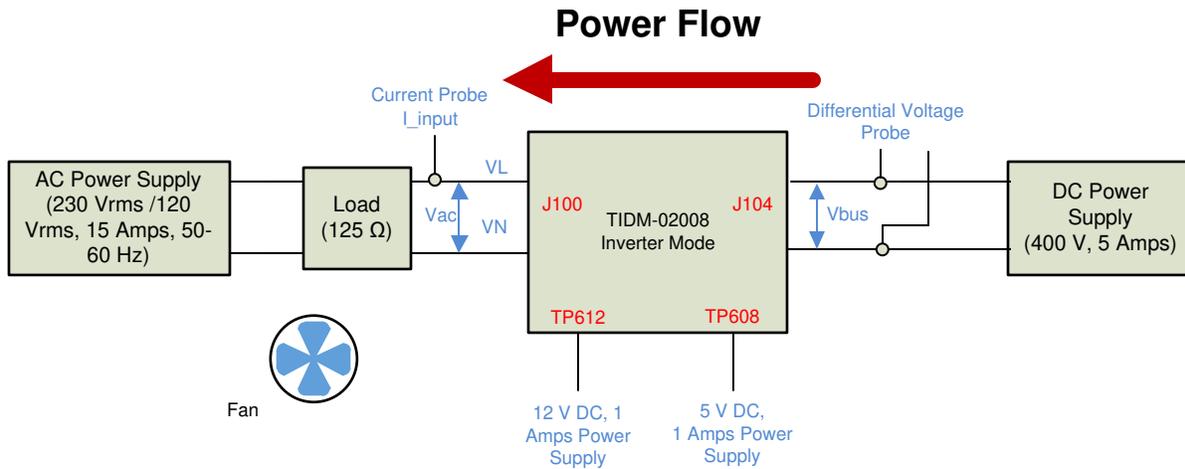


图 3-40. 构建 6 仿真电网条件的硬件设置

- 该工程被编程为等待直流总线电压和交流电源电压超过 340V 和 75Vrms 以驱动浪涌继电器，并清除跳闸。
- 点击  以运行工程。
- 现在施加大约 340V 的输入电压，电路板就会脱离欠压状态。若要运行该解决方案，逆变器输出中的交流电压必须高于 75Vrms，然后驱动浪涌继电器。默认情况下，TTPLPFC_ac_cur_ref 设置为 -0.03。
- 将 TTPLPFC_pwmSwState 从 pwmSwState_defaultState 更改为 pwmSwState_normalOperation 以启用 PWM 输出。默认情况下，PWM 输出关闭，如果不选择该选项，逆变器将无法工作。
- 慢慢地将 TTPLPFC_ac_cur_ref 增加到 -0.05，逆变器输出电流的 RMS 值接近 0.8A。逆变器输出电压由交流电压源决定。
- 由于仿真电网条件的源阻抗不像实际电网那么小，电流环路的带宽远低于设计目标，并且系统在过零点附近遭受巨大的电流尖峰。

Expression	Type	Value	Address
build_Level.enum_buildLevel	enum <unnamed>	BuildLevel6_CurrentLoop_GridConnected	0x00008008@Data
pwm_SwState.enum_pwmSwState	enum <unnamed>	pwmSwState_negativeHalf	0x000080B6@Data
board_Status.enum_boardStatus	enum <unnamed>	boardStatus_NoFault	0x0000800C@Data
clearTrip	long	1	0x000080A4@Data
closeGilLoop	long	1	0x000080A0@Data
ac_cur_ref	float	-0.0299999993	0x00008046@Data
ac_cur_sensed	float	0.0243725181	0x00008020@Data
ac_cur_senseOffset	float	0.502499998	0x00008024@Data
guiVbus	float	378.007446	0x0000806A@Data
guiVin	float	-63.893631	0x0000807E@Data
guiVrms	float	118.721397	0x00008076@Data
guiIrms	float	0.476669252	0x00008074@Data
guiPrms	float	-51.2441063	0x00008072@Data
guiFreqAvg	float	60.0667419	0x00008088@Data
guiPowerFactor	float	-0.880266964	0x00008084@Data
EPwm1Regs.TZFLG	Register	0x0000	
EPwm2Regs.TZFLG	Register	0x0000	
dutyPU	float	-0.0921395048	0x00008096@Data
dutyPU_DC	float	0.5	0x00008098@Data
iL1_sensed	float	-0.0190429688	0x0000800E@Data
iL2_sensed	float	0.00927734375	0x00008010@Data
iL3_sensed	float	0.0078125	0x00008012@Data
autoStartSlew	long	5	0x0000808E@Data
thetaOffset	float	-0.00999999978	0x00008028@Data

图 3-41. 实验 9：闭合电流环路后的闭合电流环路

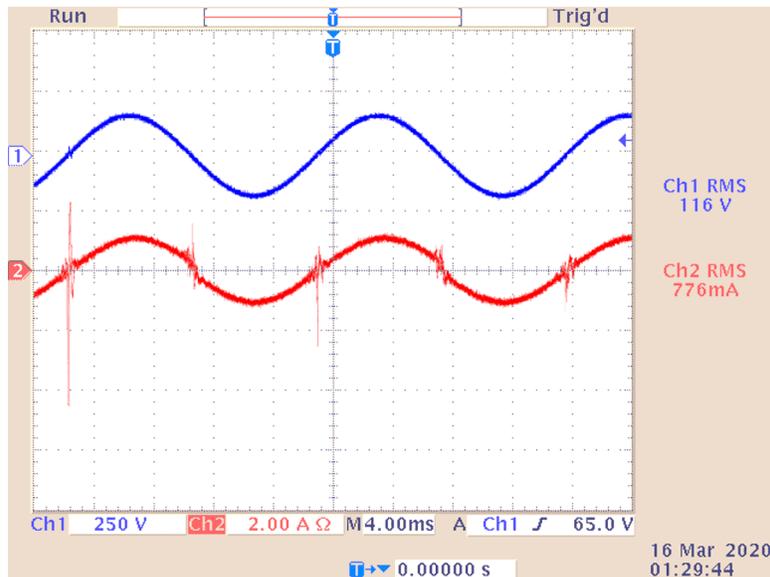


图 3-42. 电压和电流波形 (实验 9 仿真电网条件)

- 若要使系统安全停止，请先关闭交流电源的输出，然后关闭直流电源的输入。这将消除逆变器模式下不希望出现的反向功率流的风险。将输入交流电压降至零，并观察 TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts 也降至零。交流电压完全关闭后，输入直流电压必须降至零，观察 TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 变为零。
- 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt** (暂停) 按钮 () 或使用 **Target** (目标) → **Halt** (暂停) 来暂停处理器。然后单击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位 ()。
- 单击 **Terminate Debug Session** (终止调试会话) (**Target** (目标) → **Terminate all** (终止全部)) 以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.5.9.4 运行代码：并网条件

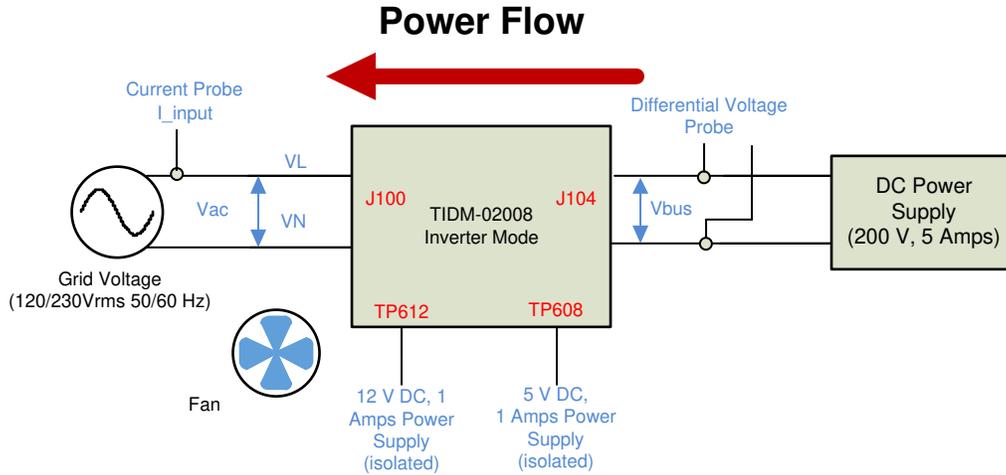


图 3-43. 实验 9 并网条件

1. 该工程被编程为等待直流总线电压和交流电源电压超过 340V 和 75Vrms 以驱动浪涌继电器，并清除跳闸。
2. 点击  以运行工程。
3. 现在施加约 340V 的输入电压，电路板就会脱离欠压状态。若要运行该解决方案，交流电压必须高于 75Vrms，并且驱动浪涌继电器。
4. 将 pwmSwState 从 pwmSwState_defaultState 更改为 pwmSwState_normalOperation 以启用 PWM 输出。默认情况下，PWM 输出关闭，如果不选择该选项，逆变器将无法工作。
5. 然后慢慢地将 TTPLPFC_ac_cur_ref 增加到 -0.3，逆变器输出电流的 RMS 值接近 5.3A。逆变器输出电压由电网决定。
6. SFRA 集成在该生成的软件中，通过在硬件上进行测量来验证所设计的补偿器是否能够提供足够的增益裕量和相位裕度。若要运行 SFRA，请使工程保持在运行状态，然后在 cfg 页面中点击 SFRA 图标。此时显示 SFRA GUI。

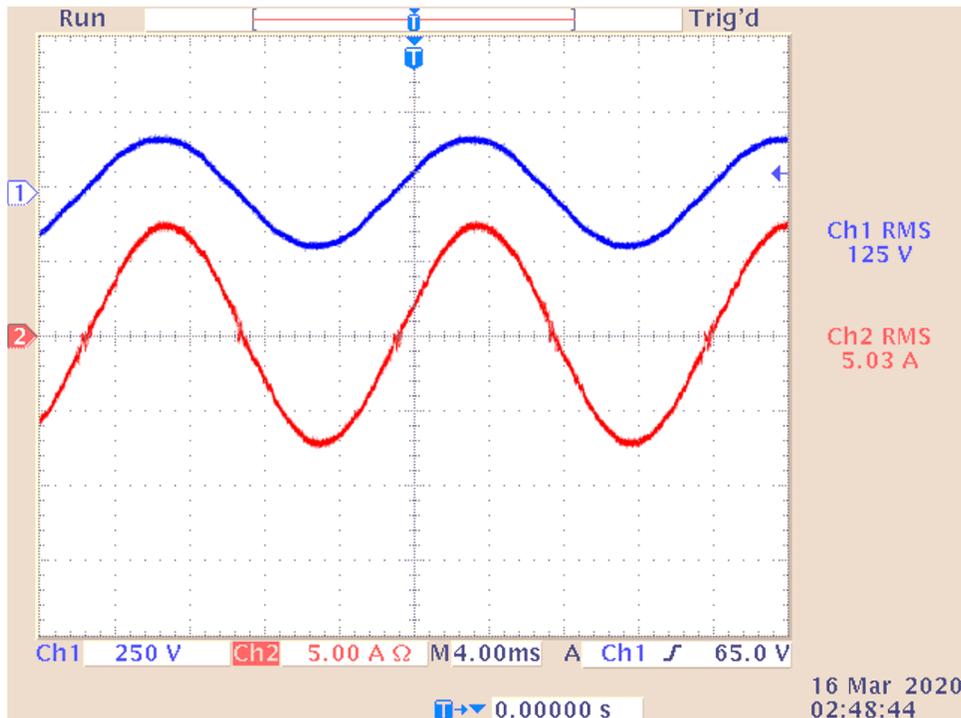


图 3-44. 电压和电流波形 (实验 9 并网条件)

7. 在 SFRA GUI 上选择器件的相应选项。例如，对于 F28377D，选择“Floating Point”（浮点）。点击 **Setup Connection**（设置连接）。在弹出窗口中取消选中“boot on connect”（连接时启动）选项，然后选择相应的 COM 端口。点击 **OK**（确认）。返回到 SFRA GUI，然后点击 **Connect**（连接）。

8. SFRA GUI 将连接到器件。现在可以通过点击“Start Sweep”（启动扫描）来启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。可以通过查看 SFRA GUI 上的进度条以及检查控制卡背面用于指示 UART 活动的蓝色 LED 的闪烁情况来监视活动。完成之后，将立即显示一个包含开环图的图，如图 3-24 所示。这类类似于直流条件下看到的图；但交流谐波频率接近测量频率，因此可以看到一些额外的噪声。BW、PM 和 GM 数字与直流情况非常相似。注意，图 3-24 所示的图是使用直接网格交流输入获得的。当使用交流电源输出的交流电源交互时，可以观察到阻抗，这会影响到控制裕度。

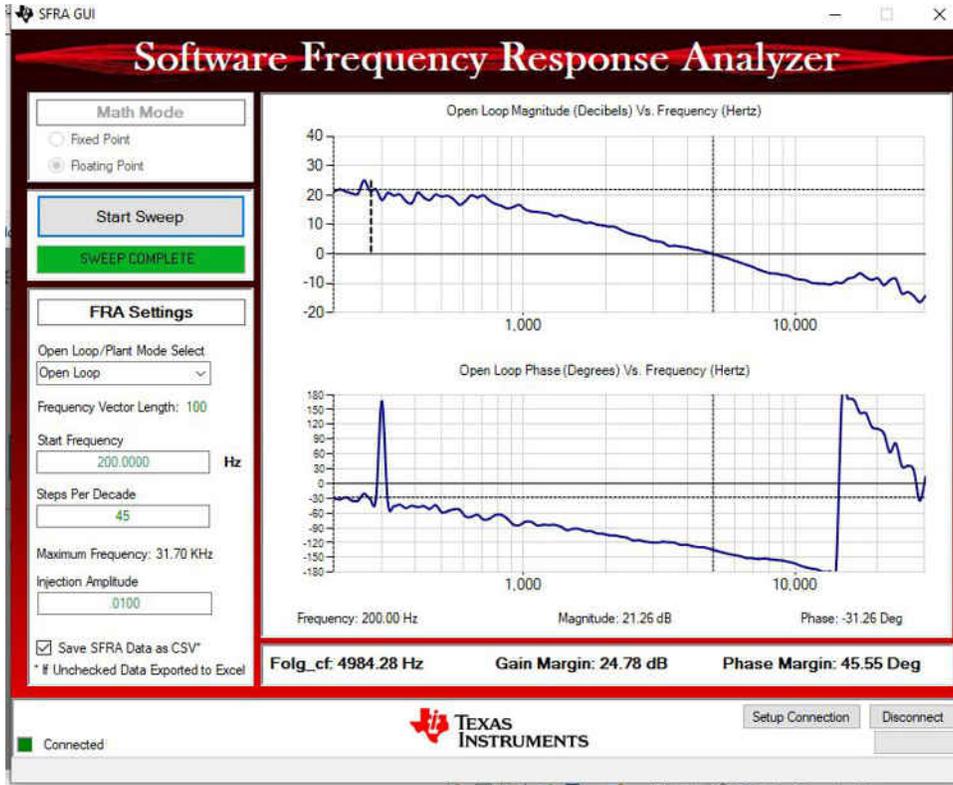


图 3-45. SFRA 运行、闭合电流环路、开环增益（逆变器模式）

9. 若要使系统安全停止，请先关闭交流电网的输出，然后关闭直流电源的输入。这将消除逆变器模式下不希望出现的反向功率流的风险。关闭电网电压，并观察 TTPLPFC_ac_volRms_sensed_Volts 也降至零。电网电压完全关闭后，输入直流电压必须降至零，观察 TTPLPFC_vBus_sensed_Volts 变为零。
10. 在实时模式下，完全停止 MCU 需要执行两个步骤。首先，通过使用工具栏上的 **Halt**（暂停）按钮（）或使用 **Target**（目标）→ **Halt**（暂停）来暂停处理器然后点击  以使 MCU 退出实时模式。最后，将 MCU 复位（）。
11. 点击 **Terminate Debug Session**（终止调试会话）（**Target**（目标）→ **Terminate all**（终止全部））以关闭 CCS 调试会话。



3.1.2.6 基于 CLA 运行代码

该解决方案提供了基于 CLA 运行代码的选项。可以通过使用 powerSUITE main.cfg 页面上工程选项下的下拉框来选择该选项。对于任何实验选项，均可选择基于 CLA 运行。

NOTE

SFRA 库不支持 CLA，因此在使用 CLA 时无法运行 SFRA。

在使用 CLA 时也不使用 DLOG，因此在使用 CLA 时数据记录图将不起作用。

更改选项后，必须保存 CFG 文件并且必须重新编译工程。重新编译之后，执行特定实验文档中所述的步骤。

100kHz ISR 和 10kHz ISR 均可卸载到 CLA 上，具体取决于器件（例如对于 F28004x，CLA 支持 CLA 任务和后台任务）。默认情况下，如果从 powerSUITE 页面进行选择，则较快的 ISR 会移至 CLA 任务，较慢的 ISR 会移至后台任务。如果用户不想在 CLA 上运行 10kHz ISR，那么可利用 <solution>_user_settings.h 文件下提供的相关选项。

```
#if TTPLPFC_CONTROL_RUNNING_ON == CLA_CORE
#define TTPLPFC_INSTRUMENTATION_ISR_RUNNING_ON CLA_CORE
#else
#define TTPLPFC_INSTRUMENTATION_ISR_RUNNING_ON C28x_CORE
#endif
```

3.1.2.7 高级选项

本节将逐一介绍一些可改善功率因数的高级设置，并用测试结果量化这些设置产生的相对影响

3.1.2.7.1 用于改善轻负载条件下 PF 的输入电容补偿

如果电流基准与方程 8 和图 3-46(a) 所示的电压保持完全同步，则输入电容会导致 PF 下降。

$$i_{ref_dplvc} = i_{ref}^* \sin(\omega t) - i_{input_cap_comp} \cos(\omega t) \quad (8)$$

可使用矢量来调整电流基准，以抵消 PF 下降，如方程 9、图 3-46(b) 所示。由于使用锁相环的角度计算矢量，这项技术被称为数字锁相环矢量消除 (DPLLVC) 技术。这显著提高了轻负载和高压线条件下的 PF。

$$i_{ref_DPLLVC} = i_{ref}^* \sin(\omega t) - i_{input_cap_comp} \cos(\omega t) \quad (9)$$

应用的校正量取决于输入电容值，例如在该设计中，输入电容为 2.2μF。这意味着，在高压线条件下会产生一个等

$$\frac{220}{\frac{1}{2} \times \pi \times 60 \times 2.2 \mu F} = 0.1823 \text{ A}$$

于 0.1823 A 的电容电流。在轻负载条件下，这是相当大的电流量，会导致功率因数损失。该设计中的电流传感器增益大约为 24A，这相当于在高压线条件下调整 0.01pu 左右。

此外，低功耗条件下存在跟踪误差。可通过调整电流命令来抵消该跟踪误差，如图 3-46 (c) 所示。凭经验调整该跟踪误差的量，以使系统发挥卓越性能。因此，根据方程式 10 得出总电流基准。

$$i_{ref_DPLLVC_TC} = i_{ref}^* \sin(\omega t) - i_{input_cap_comp} \cos(\omega t) - i_{tracking_error} |_{power_dependent} \cos(\omega t) \quad (10)$$

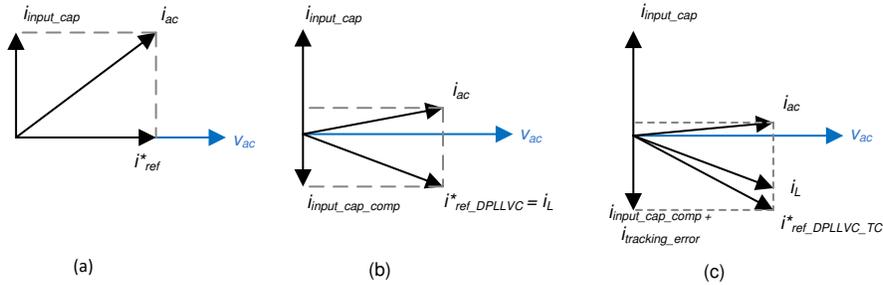


图 3-46. 功率因数 (a) 无调整 (b) DPLLVC (c) DPLLVC 加上跟踪误差补偿

PF 改善的结果如图 3-47 所示。

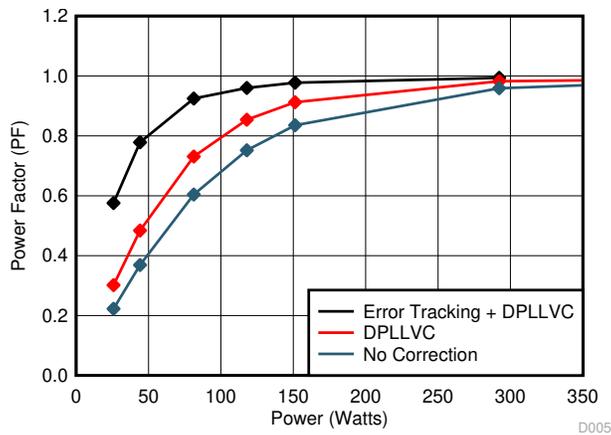


图 3-47. 220Vrms 下的 PF 与功率关系图，强调了输入电容电流补偿的改善

3.1.2.7.2

可通过写入 <solution>_user_settings.h 文件中的 TTPLPFC_INPUT_CAP_COMPENSATION #define 变量来关闭或打开该功能。用户可修改该设置。使用 #define TTPLPFC_HIGH_LINE_INPUT_CAP_COMP_ADJUST 和 #define TTPLPFC_LOW_LINE_INPUT_CAP_COMP_ADJUST 来控制调整值。这些是标么值，本节前面部分介绍了如何确定该值。

```
#define TTPLPFC_INPUT_CAP_COMPENSATION 1
#define TTPLPFC_HIGH_LINE_INPUT_CAP_COMP_ADJUST -0.02
#define TTPLPFC_LOW_LINE_INPUT_CAP_COMP_ADJUST -0.01
```

3.1.2.7.3 用于提升效率的自适应死区时间

在连续导通模式下，同步整流的死区时间控制对于短路保护和效率至关重要。使用理想的死区时间，可以消除击穿风险，而且还可以防止同步 FET 体二极管导通导致过多的导通损耗。因此，理想的死区时间旨在不同时导通有源 FET 和同步 FET，同时尽可能防止同步 FET 的冗余第三象限导通。

此理想死区时间可根据测得的电流和器件输出电容计算得出，方程式 11 给出了计算公式。

$$t_{\text{deadtime_optimal}} = \frac{2C_{\text{oss}}V_{\text{out}}}{i_{\text{L_peak}}} \quad (11)$$

图 3-48 所示为此实现方案的方框图。

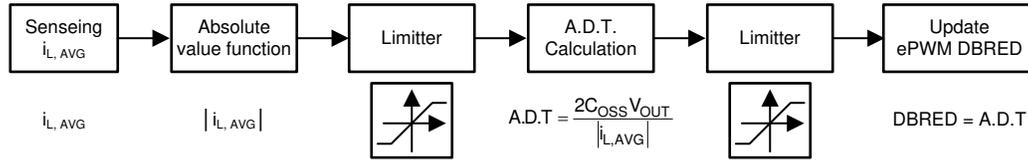


图 3-48. 自适应死区时间实现方案

与固定死区时间相比，自适应死区时间可实现节能，如图 3-49 中的高压线路案例所示，由此可见，避免在低功率水平下出现击穿可显著节省功耗。然而，避免发生击穿后，节省的功耗首先会下降，然后随着功率的增加而逐渐增加，并且通过实施自适应死区时间调整，二极管导通时间会减少。

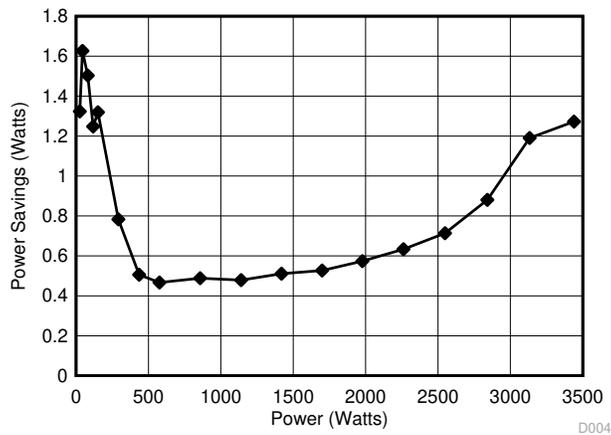


图 3-49. 在高压线路 230Vrms 下使用自适应死区时间时节省的功耗

若要启用自适应死区时间，请在解决方案 *powerSUITE* 页面上的 *Project Options* (工程选项) 下选择下拉框。对于 FED，使用在 *main.syscfg* 中指定的固定值。当启用自适应死区时间时，RED 会经过调制，并在 *<solution>_user_settings.h* 中指定最小值和最大值。以下是可调整的 *#define*：

```
#define TTPLPFC_HF_FET_COSS (float32_t) 0.000000000145
#define TTPLPFC_PFC_DEADBAND_RED_MIN_US (float32_t) 0.020
#define TTPLPFC_PFC_DEADBAND_RED_MAX_US (float32_t) 0.200
```

完成上述调整后，必须保存工程，并在该选项更改时重新编译工程，然后将其加载到控制器上。可按照节 3.1.2.5.4 中概述的硬件设置和软件说明来查看电路板的行为并测量效率。

3.1.2.7.4 用于提升效率的切相技术

通过优化导通损耗和开关损耗，切相有助于有效地提高交错式应用的效率。该设计中三个相位，因此可能有三种不同的配置，如图 3-50 所示。

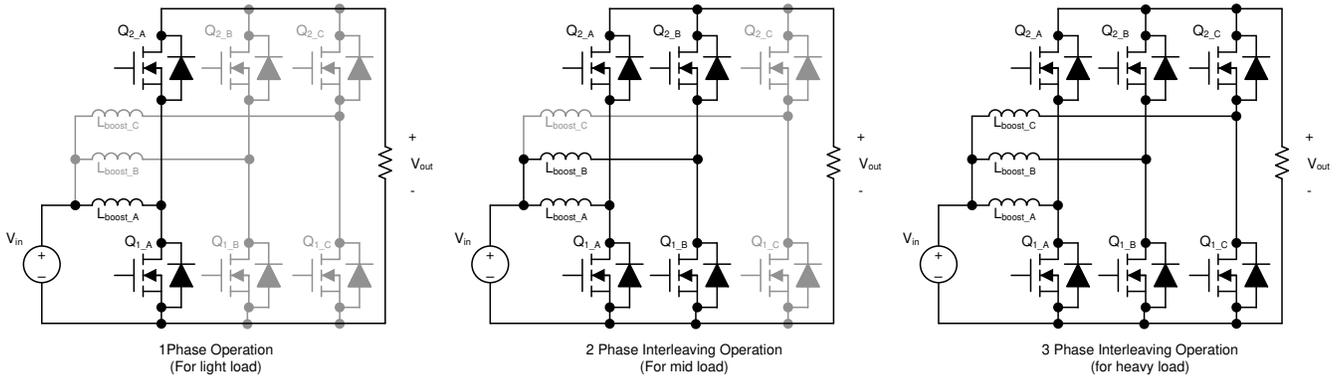


图 3-50. TTPL PFC 上的切相选项

在这些模式中，必须调整每个模式之间的相移。在两相模式下，PWM 之间需要 180° 相移；在三相模式下，则需要 120° 相移。

可根据不同的参数（如均方根电流、功率、峰值电感器电流等）来决定是否进行切相。当使用均方根电流时，相位变化会显著延迟。图 3-51 所示为当决策基于均方根电流时的切相。添加相位之前，代码需要多个交流周期。

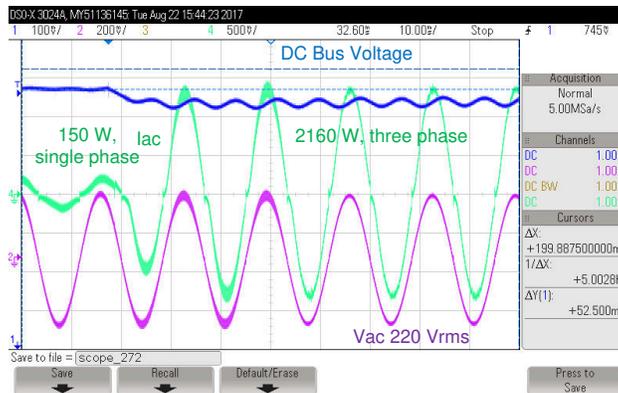


图 3-51. 添加相位的决策基于进行均方根计算时的波形

这种延迟对许多应用来说可能无法接受。因此，选择电压控制器输出作为减相或增相的决策点。状态机的构造如图 3-52 所示，在切相点周围产生了一些迟滞。

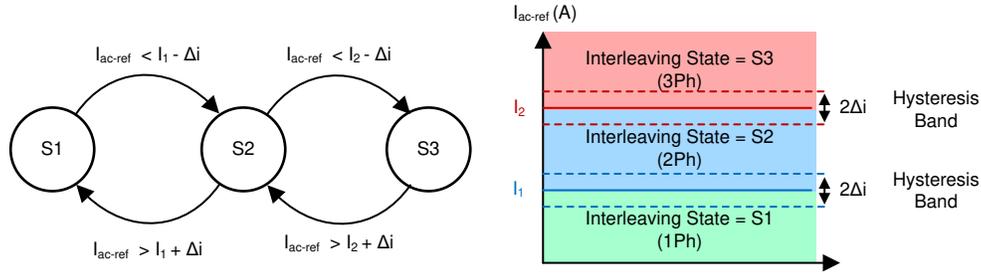


图 3-52. 用于切相控制的状态机

引入和引出相位会导致无意中生成脉冲。因此，使用 GPIO 引脚多路复用器寄存器并通过 GPIO 和 PWM 外设开关实现减相和增相。已配置所有支持 PWM 的引脚，并将 GPIO 输出引脚驱动为低电平。现在，根据必须应用的相数，相应地更改 GPIO 引脚多路复用器。PWM 中的寄存器经过影子化，因此在交流周期的任意点使用 GPIO 引脚多路复用开关启用和禁用相位都是安全的。图 3-53 所示为在 C2000 MCU 上实现切相的详细信息。

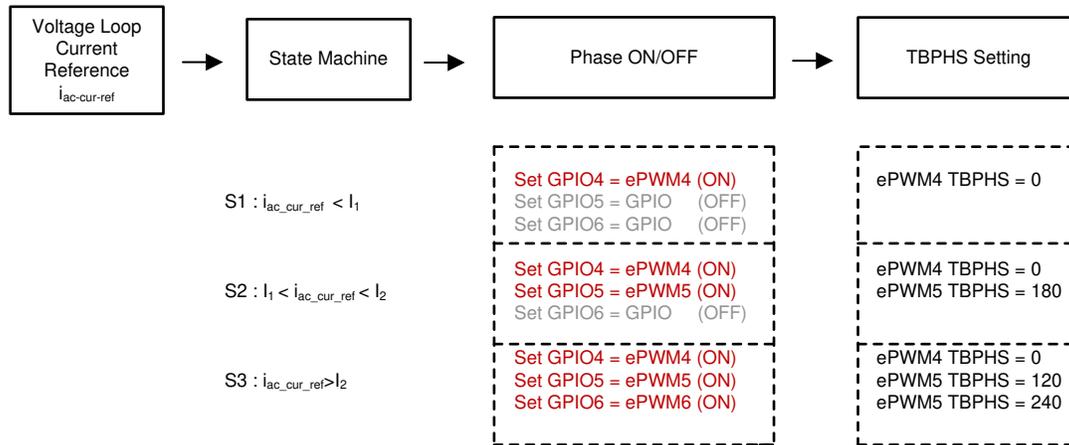


图 3-53. 使用 C2000™ MCU 在 TTPL PFC 上实现切相

可以通过在 powerSuite 页面中选择“Phase shedding”（切相）选项下的“enable”（启用）来设置切相。通过更改 PHASE_SHEDDING_1PH_2PH_TRANSITION_CURRENT 和 PHASE_SHEDDING_2PH_3PH_TRANSITION_CURRENT define（对应于图 3-53 所示的 I1 和 I2）来设置引入和引出相位的点。重新编译代码，加载代码，并重复节 3.1.2.5.4 中所述的步骤以测试该功能。实现该功能后，在瞬态条件下，相位会快速减少和增加。

图 3-54 和图 3-55 展示了 110Vrms 下 1.3KW 至 150W 的瞬态，反之亦然。决策基于电压环路生成的电流基准，因此在瞬态条件下，相位会快速加回并快速减少。

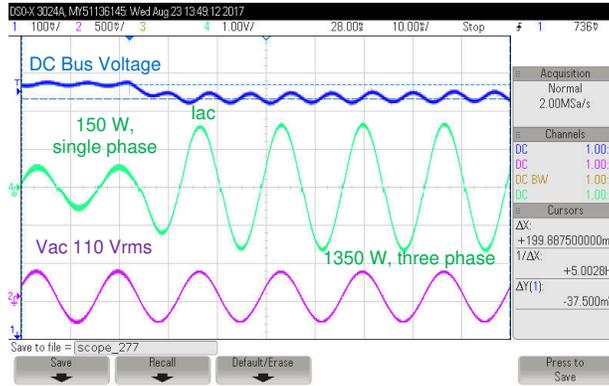


图 3-54. 120Vrms、60Hz 时在瞬态条件下的快速增相

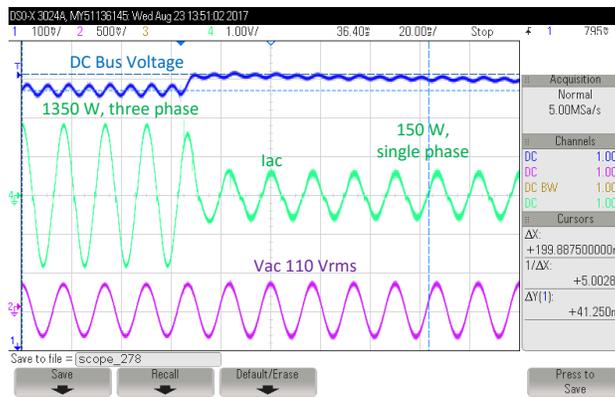


图 3-55. 120Vrms、60Hz 时在瞬态条件下的切相

同样，在高压线条件下，施加大于 2KW 的瞬态，相位几乎瞬间从单相变为三相。图 3-56 和图 3-56 展示了 2.16KW 至 150W 瞬态下高压线的测试波形，反之亦然。

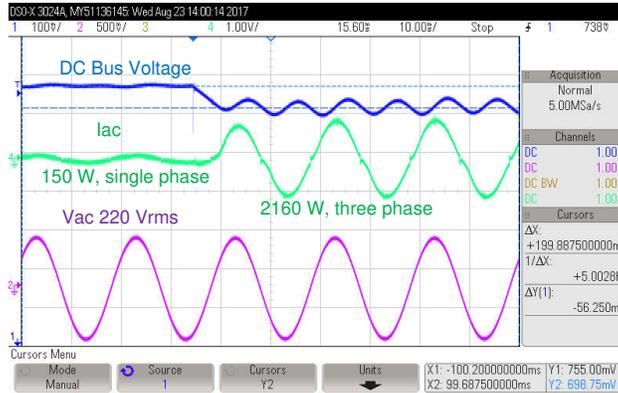


图 3-56. 230Vrms、50Hz 时在瞬态条件下的快速增相

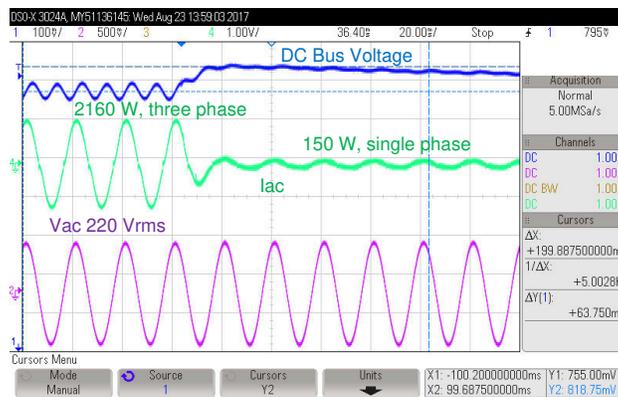


图 3-57. 230Vrms、50Hz 时在瞬态条件下的切相

图 3-58 所示为 230Vrms 时通过切相实现的效率提升

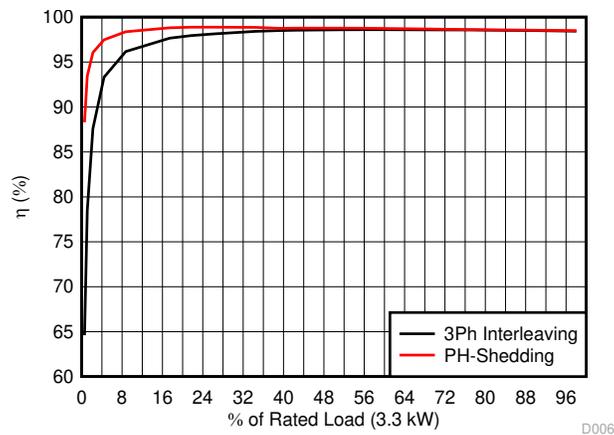


图 3-58. 230Vrms 时应用切相和不应用切相的效率比较

3.1.2.7.5 用于降低瞬态的非线性电压环路

PFC 级控制包含一个尝试跟随输入电压的内侧电流环路，以及一个尝试在输出端保持恒定直流总线电压的外侧电压环路。因此，电压环路会与电流环路发生冲突，所以必须将电压环路设计为具有很低的带宽（大约 10Hz），以实现出色的功率因数。慢电压环路会在瞬态条件下导致显著的过冲和下冲，请参阅图 3-59。

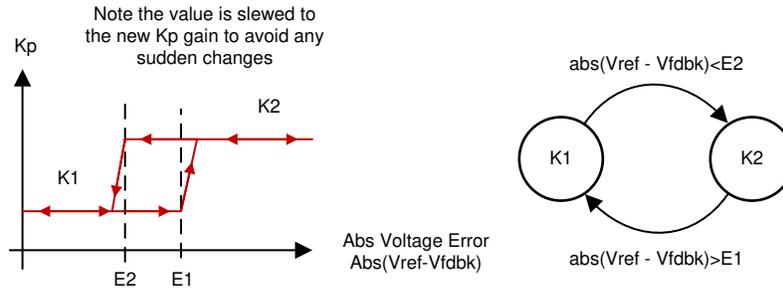


图 3-59. 具有迟滞功能的非线性电压环路

为了改善电压过冲和下冲，同时保持出色的功率因数，实施了非线性电压控制环路，如图 3-60 所示。在该非线性电压环路中添加了一个滞环，以避免在高增益和低增益模式之间产生振荡。此外，转换了增益更改，以避免任何突然变化。图 3-61 所示为具有非线性电压环路时的结果。

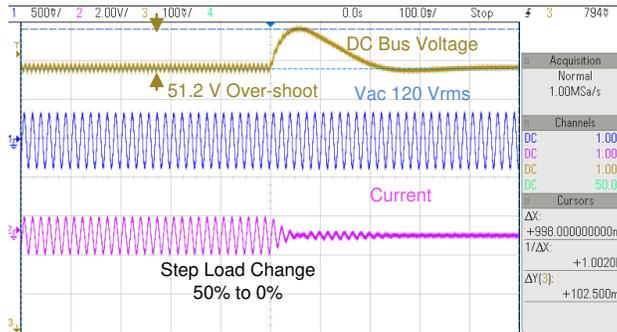


图 3-60. 不具有非线性电压环路时的电压瞬态，Vin 120Vrms，880W 至 0W 瞬态，过冲 51.2V

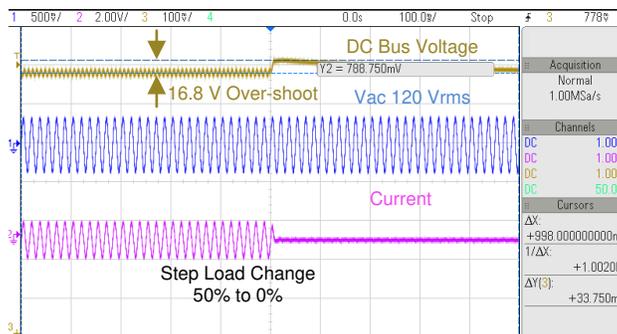


图 3-61. 具有非线性电压环路时的电压瞬态，Vin 120Vrms，880W 至 0W 瞬态，过冲 16.8V

若要启用非线性电压环路，请在解决方案 *powerSUITE* 页面上的 *Project Options*（工程选项）下选择下拉框。瞬态条件下，比例项采用五倍增益的默认值。可通过修改 *NON_LINEAR_V_LOOP_KP_MULTIPLIER* 定义，在 *<solution>_user_settings.h* 文件中调整该值。更改该选项后，必须将工程保存、重新编译并加载到控制器上。可按照实验 4 的硬件设置和软件说明来查看瞬态条件下的电路板行为。

3.1.2.7.6 软件锁相环方法：SOGI - FLL

为了满足行业标准，设计必须经过瞬态频率测试。如果 PLL 无法适应频率变化，那么在以 PLL 角度驱动 PWM 信号时就会出现。采用 *Grid Synchronization of Power Converters Using Multiple Second Order Generalized*

Integrators [1] (使用多个二阶广义积分器的电源转换器的电网同步) 中建议的锁频环方案, 可使软件锁相环频率具有自适应性。

该模块与 SOGI PLL 模块遵循同样的基本结构, 《采用 C2000 MCU 单相并网逆变器的软件 PLL 设计》 [2] 中讨论了具体实现方案。增加了通过锁频环的频率自适应特性, 如图 3-62 所示。

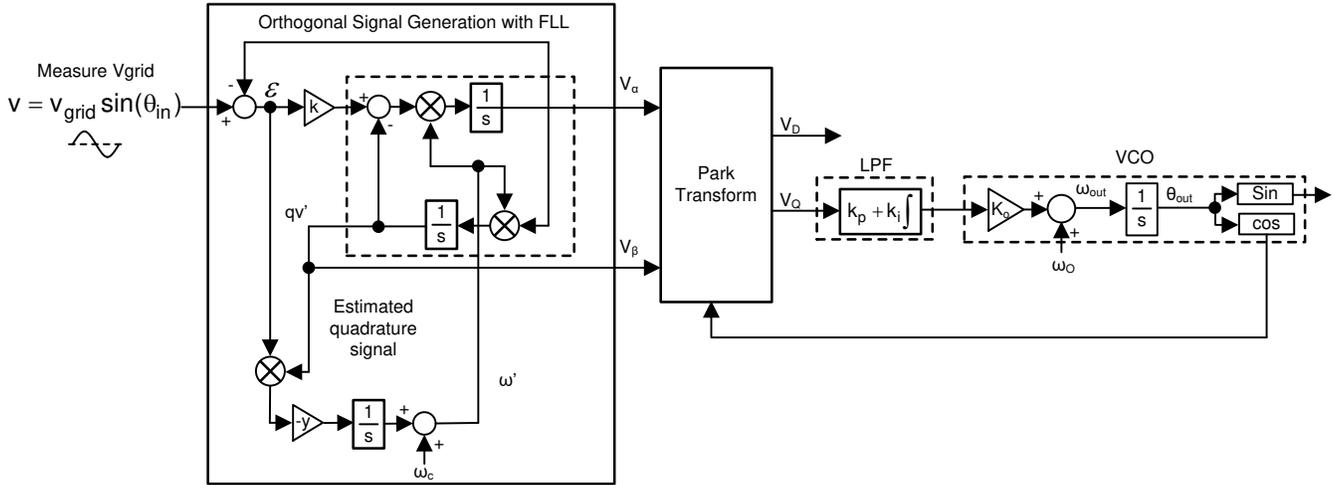


图 3-62. 基于二阶广义积分器和锁频环的软件锁相环结构

若要选择 PLL 方法, 请转到 <solution>_user_settings.h。以下是可调整的 #define :

```
#define TTPLPFC_SPLL_METHOD_SELECT TTPLPFC_SPLL_1PH_SOGI_FLL_SEL
```

进行此调整后, 必须保存、重新编译工程并将其加载到控制器上。可以按照实验 4 的硬件设置和软件说明进行操作, 以了解采用新 PLL 方案的电路板行为

3.2 测试和结果

3.2.1 120Vrms 输入、60Hz、380V 直流输出时的测试结果

3.2.1.1 启动

图 3-63 所示为功率级的启动序列，其中输入为单相 120Vrms VL-N，输出总线稳定在 380V，负载为 1.6KW 和空载。

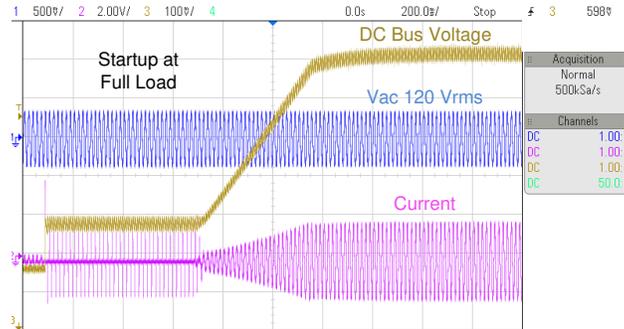


图 3-63. 120V 交流输入、380V 直流输出和 1.6KW 负载下的 PFC 启动操作

图 3-64 所示为空载下的启动。

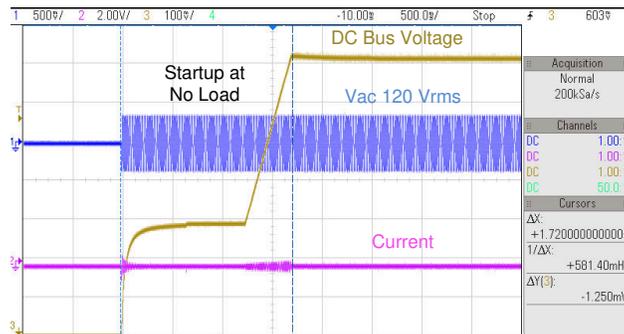


图 3-64. 120V 交流输入、380V 直流输出和 0% 负载下的 PFC 启动

3.2.1.2 稳态条件

不同负载条件下的稳态电流波形如图 3-65、图 3-66 和图 3-67 所示。针对这些读数，已禁用切相。

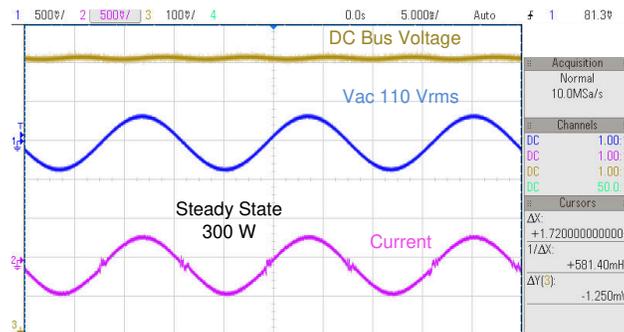


图 3-65. 稳态 120V 交流输入，380V 直流输出，300W，iTHD 5.5%

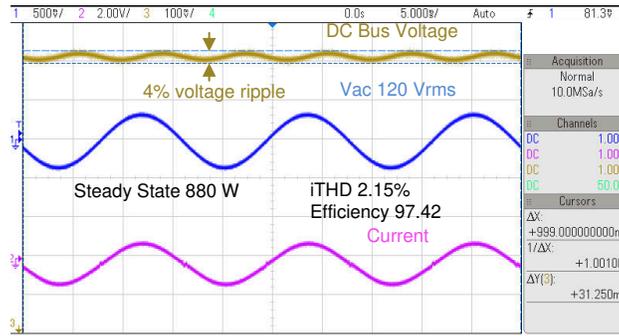


图 3-66. 稳态 120V 交流输入，380V 直流输出，880W，iTHD 2.15%

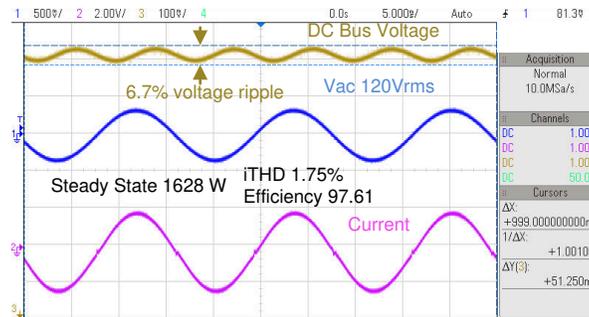


图 3-67. 稳态 120V 交流输入，380V 直流输出，1.674KW，iTHD 1.75%

表 3-3 列出了该设计在 120V 交流输入、380V 直流输出且负载不断变化条件下的详细测试结果。对于该数据，已禁用切相，并启用自适应死区时间。选择 100ns 作为硬开关边沿的固定死区时间，软开关边沿死区时间在 20ns 和 200ns 之间变化。

表 3-3. 120V 交流输入、380V 直流输出和不同功率级别下的详细测试结果

输入电压 (V RMS)	输出电压 (V)	输入功率 (W)	输出电流 (A)	输出功率 (W)	效率 (%)	iTHD%	PF	% 额定负载	θ 偏移	GI KP
120.05	382.02	154.27	0.375	143.47	92.98	10.54	0.9927	9.0	-0.014	0.35
119.86	382.01	301.30	0.750	286.36	95.14	5.50	0.9974	17.9	-0.01	0.35
119.49	382.01	444.40	1.120	427.76	96.30	4.16	0.9987	26.7	-0.01	0.35
119.42	382.03	579.10	1.469	561.40	96.94	2.89	0.9950	35.1	-0.01	0.35
119.16	382.02	721.30	1.837	701.80	97.30	2.42	0.9995	43.9	-0.01	0.35
119.02	382.05	863.00	2.202	841.50	97.52	2.15	0.9995	52.6	0	0.35
118.78	381.96	1007.20	2.573	983.30	97.64	1.92	0.9995	61.5	0	0.35
118.63	382.08	1152.00	2.944	1125.30	97.69	1.82	0.9995	70.3	0	0.35
118.40	382.08	1298.40	3.319	1268.20	97.70	1.72	0.9994	79.3	0	0.35
118.25	382.08	1442.00	3.685	1408.30	97.69	1.87	0.9991	88.0	0	0.3
118.03	382.08	1593.80	4.071	1555.50	97.65	1.80	0.9991	97.2	0	0.3
117.98	382.05	1716.40	4.449	1674.80	97.61	1.75	0.9991	104.7	0	0.3

3.2.1.3 阶跃负载变化时的瞬态测试

3.2.1.3.1 0% 至 50% 的负载阶跃变化

图 3-68 所示为当输入为 120Vrms 并将 50% 的负载阶跃应用于功率级时的瞬态响应

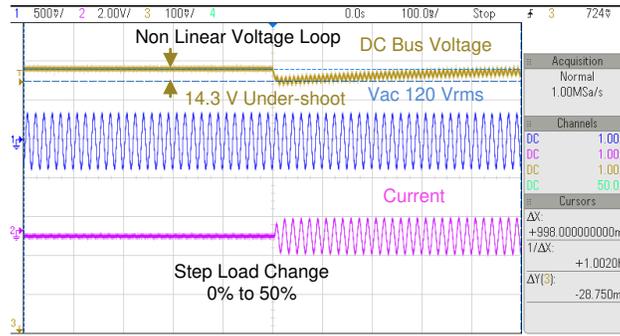


图 3-68. 在 120Vrms、60Hz、0% 至 50% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.1.3.2 50% 至 100% 的负载阶跃变化

图 3-69 所示为当输入为 120Vrms 且负载从 50% 上升到 100% 时的瞬态响应

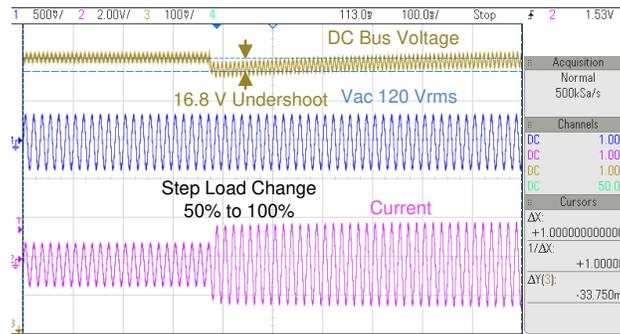


图 3-69. 在 120Vrms、60Hz、50% 至 100% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.1.3.3 100% 至 50% 的负载阶跃变化

图 3-70 所示为当输入为 120Vrms 且负载从 100% 下降到 50% 时的瞬态响应。

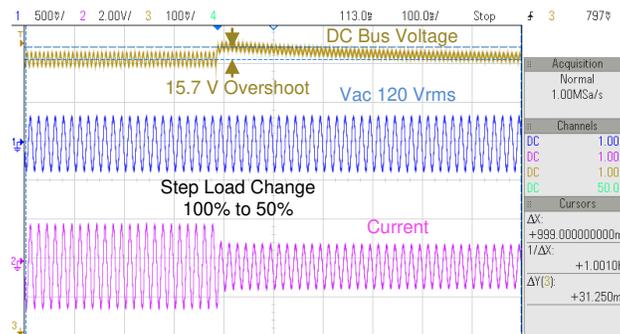


图 3-70. 在 120Vrms、60Hz、100% 至 50% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.1.3.4 50% 至 100% 的负载阶跃变化

图 3-71 所示为当输入为 120Vrms 且负载从 50% 下降到 0% 时的瞬态响应。

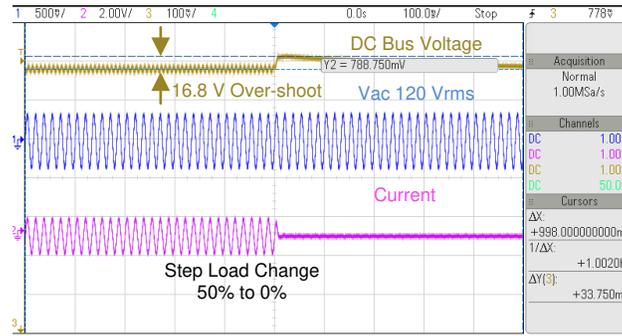


图 3-71. 在 120Vrms、60Hz、50% 至 0% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.2 230Vrms 输入、50Hz、380V 直流输出时的测试结果

3.2.2.1 启动

图 3-72 所示为功率级的启动序列，其中输入为单相 230Vrms VL-N，输出总线稳定在 380V，负载为 880W。

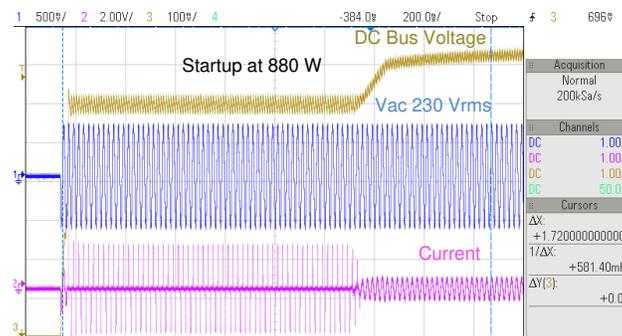


图 3-72. 230V 交流输入、380V 直流输出和 880W 负载下的 PFC 启动操作

图 3-73 所示为 230Vrms 下空载时的 PFC 启动。

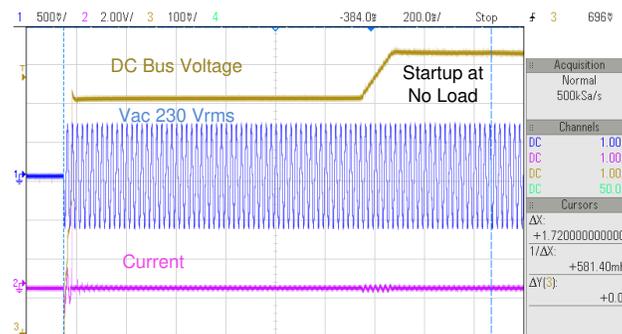


图 3-73. 230V 交流输入、380V 直流输出和空载下的 PFC 启动操作

3.2.2.2 稳态条件

图 3-74、图 3-75 和图 3-76 展示了不同负载条件下的稳态电流波形。对于这些读数，已禁用切相。

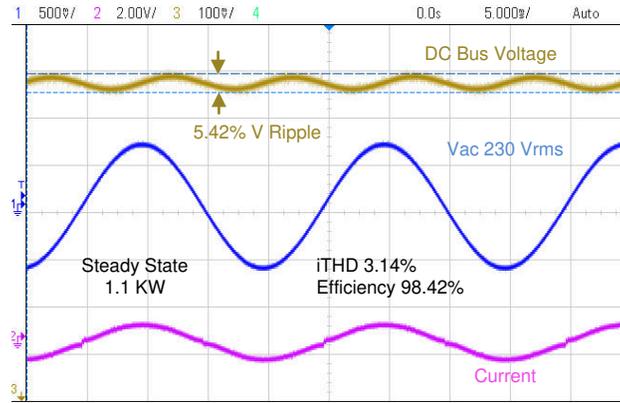


图 3-74. 稳态 230V 交流输入，380V 直流输出，1.1KW，iTHD 3.14%

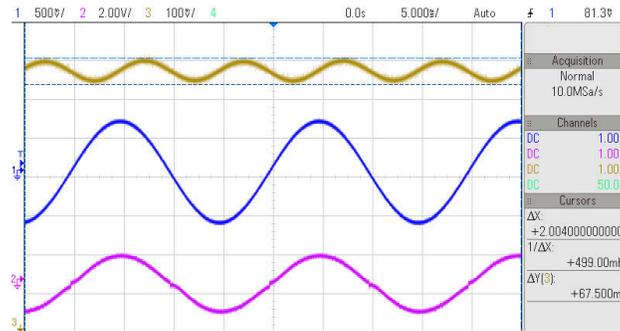


图 3-75. 稳态 230V 交流输入，380V 直流输出，2.2KW，iTHD 2.62%

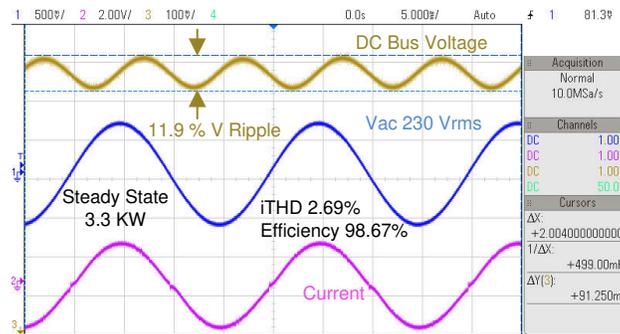


图 3-76. 稳态 230V 交流输入，380V 直流输出，3.3KW，iTHD 2.69%

表 3-4 列出了该设计在 230V 交流输入、380V 直流输出且负载不断变化条件下的详细测试结果。对于以下数据，已禁用切相，并启用自适应死区时间。选择 100ns 作为硬开关边沿的固定死区时间，软开关边沿死区时间在 20ns 和 200ns 之间变化。

表 3-4. 230V 交流输入、380V 直流输出和不同功率级别下的详细测试结果

输入电压 (V RMS)	输出电压 (V)	输入功率 (W)	输出电流 (A)	输出功率 (W)	效率 (%)	iTHD%	PF	% 额定负载	θ 偏移	Gi Kp
230.68	381.98	151.28	0.372	142.16	94.03	18.20	0.9775	4.4	-0.025	0.35
230.43	382.00	292.24	0.736	281.41	96.29	9.15	0.9936	8.8	-0.02	0.35
230.25	382.03	435.90	1.109	423.62	97.18	6.12	0.9938	13.2	-0.01	0.35
230.06	382.06	576.40	1.473	562.86	97.66	4.85	0.9972	17.6	-0.01	0.35
229.80	382.05	856.80	2.201	841.00	98.15	4.16	0.9974	26.3	0	0.35
229.70	382.11	1140.10	2.935	1121.90	98.42	3.14	0.9989	35.1	0	0.35
229.52	382.08	1418.80	3.659	1398.40	98.57	2.42	0.9993	43.7	0	0.3
229.28	382.08	1699.20	4.386	1676.40	98.66	2.74	0.9995	52.4	0	0.3
229.06	382.09	1977.70	5.106	1951.90	98.71	2.56	0.9996	61.0	0	0.3
229.09	382.11	2261.50	5.840	2232.40	98.73	2.62	0.9995	69.8	0	0.25
228.91	382.11	2548.30	6.580	2515.60	98.73	2.50	0.9994	78.6	0	0.25
228.86	382.14	2840.60	7.332	2803.20	98.71	2.89	0.9990	87.6	0	0.2
228.51	382.12	3132.80	8.083	3091.10	98.69	2.80	0.9989	96.6	0	0.2
228.22	382.03	3439.10	8.873	3392.30	98.65	2.69	0.9988	106.0	0	0.2

3.2.2.3 阶跃负载变化时的瞬态测试

以下部分显示了阶跃负载变化的瞬态测试结果。

3.2.2.3.1 33% 至 100% 的负载阶跃变化

图 3-77 所示为当输入为 230Vrms 且负载从 100% 下降到 33% 时的瞬态响应。

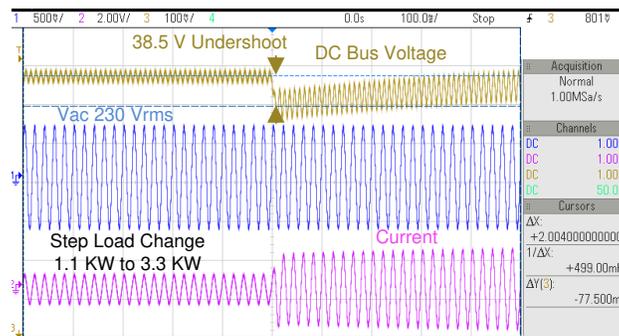


图 3-77. 在 230Vrms、50Hz、33% 至 100% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.2.3.2 100% 至 33% 的负载阶跃变化

图 3-78 所示为当输入为 230Vrms 且负载从 100% 下降到 33% 时的瞬态响应。

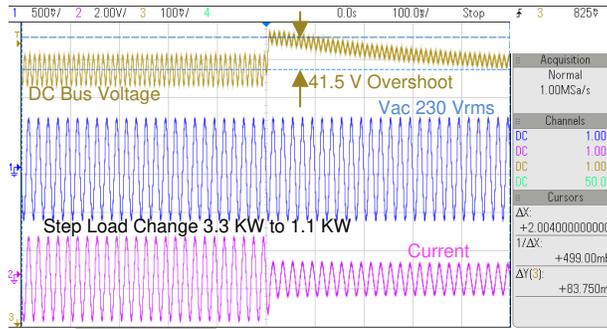


图 3-78. 在 230Vrms、50Hz、100% 至 33% 负载阶跃条件下的瞬态响应

3.2.3 测试结果图

图 3-79 所示为此设计在不同测试条件下绘制的效率数据。

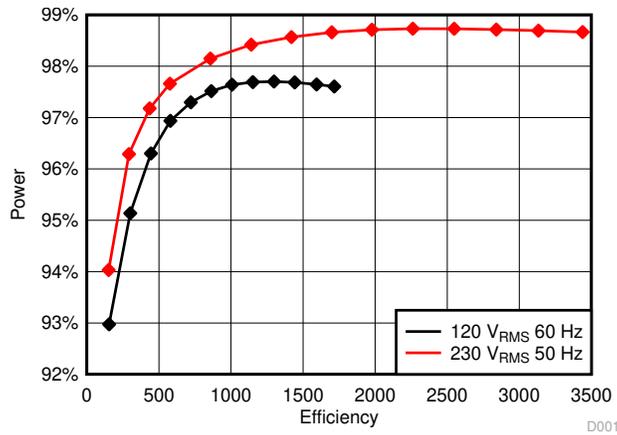


图 3-79. 230Vrms 输入和 120Vrms 输入下的效率

图 3-80 所示为在上述测试条件下绘制的 THD 数据。

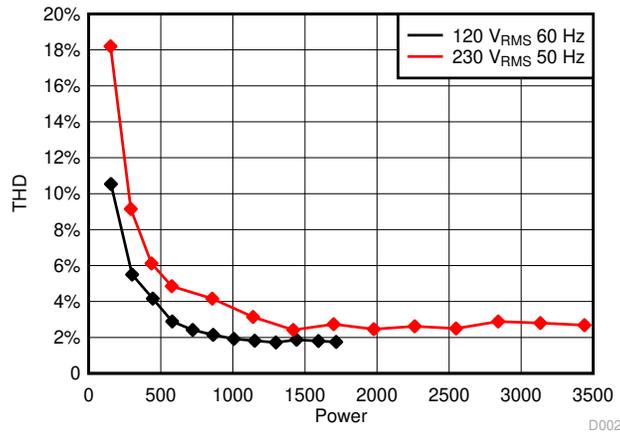


图 3-80. 230Vrms 输入和 120Vrms 输入下的 THD

图 3-81 所示为在上述测试条件下绘制的 PF 数据。

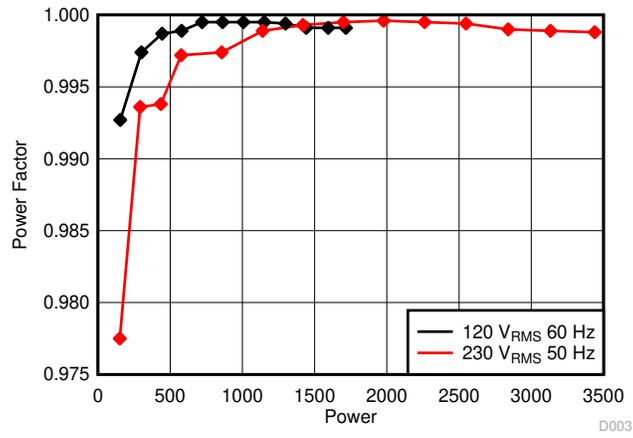


图 3-81. 230Vrms 和 120Vrms 下负载变化时的 PF

4 设计文件

4.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

若要下载物料清单 (BOM)，请参见 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 布局图

若要下载层图，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

若要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

4.5 光绘文件

若要下载光绘文件，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

若要下载装配图，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

5 软件文件

若要下载软件文件，请参阅 [TIDM-1007](#) 中的设计文件。

6 相关文档

- 德州仪器 (TI)，《[如何降低图腾柱 PFC 交流过零点处的电流尖峰 PFC](#)》技术简报
- Z. Ye、A. Aguilar、Y. Bolurian 和 B. Daugherty，《[基于 GaN FET 的高密度 CCM 图腾柱无桥 PFC](#)》，德州仪器 (TI) 电源设计研讨会，2014 至 2015 年。
- L. Xue, Z. Shen, D. Boroyevich and P. Mattavelli, *GaN-based High Frequency Totem-Pole Bridgeless PFC Design with Digital Implementation*, IEEE 2015 Applied Power Electronics Conference, 2015, pp. 759-766.
- H.-S. Youn, J.-B. Lee, J.-I. Black and G.-W. Moon, *A Digital Phase Leading Filter Current Compensation (PLFCC) Technique for CCM Boost PFC Converter to Improve PF in High Ligne Voltage and Light Load Condition*, IEEE Transactions on Power Eelectronics , vol. 31, no. 9, pp. 6596-6606, 2016.
- D. M. V. d. Sype, K. D. Gusseme, A. P. M. V. d. Bossche and J. A. Melkebeek, *Duty-Ratio Feedforward for Digitally Controlled Boost PFC Converters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 1, pp. 108-115, February 2005.
- "Rodriguez, P.,Luna, A., Candela, I., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. *Grid Synchronization of Power Converters Using Multiple Second Order Generalized Integrators* , In Proceedings of IEEE industrial Electronics Conference (IECON' 08), November 2008, pp 755-760"
- 德州仪器 (TI)，《[面向单相并网逆变器、采用 C2000 MCU 的软件 PLL 设计](#)》应用报告
- 德州仪器 (TI)，《[TMS320F28004x Piccolo™ 微控制器](#)》数据表
- 德州仪器 (TI)，《[LMG3410 600V 12A 单通道 GaN 功率级](#)》数据表

6.1 商标

C2000™, TI E2E™, powerSUITE™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments. 所有商标均为其各自所有者的财产。

7 关于作者

MANISH BHARDWAJ 是德州仪器 (TI) C2000 微控制器系统解决方案组的系统应用工程师，负责开发面向数字电源、电机控制和太阳能应用的参考设计解决方案。在 2009 年加入 TI 前，Manish 于 2007 年获得印度德里 Netaji Subhash 理工学院工程学士学位，并于 2008 年获得亚特兰大佐治亚理工学院电气和计算机工程专业理学硕士学位。

Jongwan Kim 是德州仪器 (TI) C2000 微控制器系统解决方案组的系统应用工程师，负责开发面向数字电源应用的参考设计解决方案。在 2019 年加入 TI 前，Jongwan 分别于 2013 年和 2015 年获得韩国首尔高丽大学的电气工程学士学位和硕士学位，并于 2019 年获得布莱克斯堡弗吉尼亚理工大学电气工程博士学位。

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision D (October 2020) to Revision E (April 2021)	Page
• 增加了“交流中断测试”主题.....	10

Changes from Revision C (March 2020) to Revision D (October 2020)	Page
• 通篇将增量构建更改为实验	2
• 通篇将构建级别更改为实验	2
• 通篇将构建级别 3 更改为实验 4	2
• 更改了“CCM TTPL PFC 解决方案的 powerSUITE 页面”图像	17
• 更改了“解决方案工程的 Project Explorer 视图”图像	20
• 更改了工程的“工程结构概览”图像	20
• 通篇将 pfc1ph3ilttpl 更改为 ttplpfc	20
• 将增量构建更改为实验	20
• 添加了 CPU 和 CLU 利用率及内存分配部分	23
• 更改了“实验 1 表达视图”图像	28
• 更改了实验 1：“显示测量的电压和电流的观察表达式”图像	29
• 更改了实验 2：闭合电流环路“表达视图”图像	32
• 更改了观察表达式，实验 2：闭合电流环路操作开始后图像	32
• 更改了观察表达式，实验 2：闭合电流环路操作以全电压开始后图像	32
• 更改了实验 3：闭合电流环路“表达视图”图像	37
• 更改了“观察表达式、实验 3、闭合电流环路后的交流操作开始”图像	38
• 更改了实验 4：表达视图图像	42
• 更改了实验 4：“应用交流电压后的“表达视图”图像	43
• 更改了“实验 5 表达视图”图像	46
• 更改了实验 5“显示测量的电压和电流的观察表达式”图像	46
• 更改了实验 6“表达视图”图像	47
• 更改了实验 6“显示测量的电压和电流的观察表达式”图像	48
• 更改了实验 7：闭合电流环路“表达视图”图像	49
• 更改了“观察表达式、实验 8、闭合电流环路后的交流”图像	50
• 更改了实验 9：闭合电流环路（电网连接）“表达视图”图像	51

Changes from Revision B (June 2018) to Revision C (March 2020)	Page
• 通篇将 LMG34310 更改为 LMG3410R070	1
• 添加了“...支持双向潮流（PFC 和并网逆变器）”	1
• 将 TIDM-01007 更改为 TIDM-020008	1
• 添加了双向	1
• 添加了“能源存储系统 (ESS)”	1
• 向“表 1”添加了“逆变器模式”列	2
• 增加了“公式 2”列表项	6
• 将“仅适用于 PFC 模式”添加至小节标题	8
• 更改了图 15：用于运行软件的硬件设置（PFC 和逆变器模式）	15
• 更改了 main.syscfg 支持	17
• 将 7.4 版更改为 CCSV9.3	17
• 更改了图 16：CCM TTPL PFC 解决方案的 powerSUITE 页面	17
• 更改了图 17：解决方案工程的 Project Explorer 视图	20
• 添加了 INCR_BUILD 4、5 和 6 用于逆变器操作	20
• 更改了图 21：构建级别 1 的硬件设置	25
• 更改了图 31：交流输入的硬件设置	35
• 添加了运行 INCR_BUILD4（直流）的指令	45
• 更改了图 41：构建级别 4 的硬件设置	45
• 更改了图 42：构建级别 4 直流表达视图	46
• 更改了图 43：构建级别 4 直流：显示测量的电压和电流的观察表达式	46
• 添加了运行 INCR_BUILD4（交流）的指令	47
• 更改了图 44：构建级别 4 交流：表达视图	47
• 更改了图 45：构建级别 4 交流：显示测量的电压和电流的观察表达式	48
• 添加了运行 INCR_BUILD5（直流）的指令	49

• 更改了图 46：构建级别 5 直流：闭合电流环路表达视图.....	49
• 更改了图 47：观察表达式、构建级别 5、闭合电流环路后的直流.....	50
• 添加了运行 INCR_BUILD5 (交流) 的指令.....	50
• 更改了图 48：构建级别 5：闭合电流环路表达视图.....	51
• 更改了图 49：观察表达式、构建级别 5、闭合电流环路后的交流.....	51
• 添加了运行 INCR_BUILD6 的指令.....	52
• 更改了图 50：构建级别 6：闭合电流环路 (电网连接) 表达视图.....	52
• 更改了图 51：构建 6 仿真电网条件的硬件设置.....	53
• 更改了图 53：构建级别 6：闭合电流环路后的闭合电流环路 (并网)	53
• 更改了图 53：电压和电流波形 (构建级别 6 仿真电网条件)	53
• 更改了图 54：构建 6 并网条件的硬件设置.....	55
• 更改了图 55：电压和电流波形 (构建级别 6 并网条件)	55
• 更改了图 56：SFRA 运行、闭合电流环路、开环增益 (逆变器模式)	55

Changes from Revision A (March 2018) to Revision B (May 2018)	Page
--	-------------

• 向节 特性添加了条目.....	1
• 将 F28004x 添加到节 2.3.1 并更新了文本.....	6
• 将表 3-2 中的电源连接从 TP612 更改为 TP604.....	15
• 将表 3-2 中的电源连接从 TP609 更改为 TP606/TP609.....	15
• 添加了节 3.1.2.3	23
• 添加了节 3.1.2.6	57

Changes from Revision * (November 2017) to Revision A (March 2018)	Page
---	-------------

• 添加了双向.....	1
• 更改了图 9：电流环路控制模型	6
• 更改了图 11：直流电压环路控制模型	8
• 将第 3.1.1.1 节的电源连接从 TP612 更改为 TP604：基板设置	15
• 更改了图 36：构建级别 3 控制图：使用内侧电流环路进行输出电压控制	40
• 更改了图 39：构建级别 3：应用交流电压后的“表达视图”	43
• 更改了实验 9：“闭合电流环路后的闭合电流环路”图像.....	53

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司