

100A 双相数字控制电池测试仪参考设计



说明

该参考设计阐述了一种使用 C2000™ 微控制器 (MCU) 和精密 ADC ADS131M08 来精确控制双向交错式降压转换器功率级电流和电压的方法。此设计利用 C2000 MCU 的高分辨率脉宽调制 (PWM) 生成外设, 实现了低于 $\pm 20\text{mA}$ 的电流调节误差和 $\pm 1\text{mV}$ 的电压调节误差。

资源

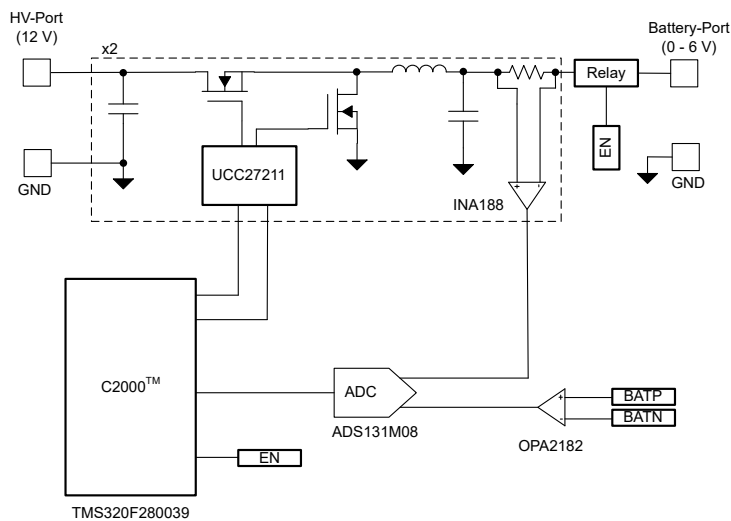
| | |
|--|-------|
| TIDA-010087 | 设计文件夹 |
| TMS320F280039 | 产品文件夹 |
| ADS131M08 、 REF35 、 INA188 | 产品文件夹 |
| OPA2182 、 LM321LV 、 TLV9102 、 UCC27211 | 产品文件夹 |
| CSD17556Q5B 、 CSD16570Q5B 、 LMR54410 | 产品文件夹 |
| TPSI3050 、 TVS0500 、 TPS7A20 | 产品文件夹 |
| TLV1117 、 LM2664 、 TPS736 | 产品文件夹 |
| C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK | 工具文件夹 |

特性

- 双相交错式 600W 双向降压功率级
- 在 100kHz 开关频率下具有 15.8 位 PWM 分辨率
- 外部 Δ - Σ ADC, 可实现闭环控制
- 恒流充电和放电, 调节误差 $< \pm 20\text{mA}$
- 充电和放电时均支持恒压模式, 调节误差 $< \pm 1\text{mV}$
- 软件频率响应分析器 (SFRA) 和补偿设计器便于控制环路调优
- 提供 powerSUITE 支持, 以使设计轻松满足用户要求

应用

- 电芯化成和测试设备
- 可编程直流电源



1 系统说明

电池测试仪设备包括各种用于测试单个电芯、电池模块和高压电池包的设备。测试设备包含精密电源和数据采集系统，用于给电池充电和放电，并可测量电芯的各种参数。

图 1-1 显示简化的锂离子电池制造工艺。最后阶段是下线调节，其中包括电芯化成和测试。化成是锂离子电池制造中的关键一步。在化成过程中，电芯会经历初始充电和放电的过程，从而形成固体电解质界面 (SEI) 层。SEI 层的质量影响电芯的容量和可靠性。为了控制化成过程，请使用精确的可编程电源对电芯进行充电和放电。这些电源称为电池化成系统或电池测试仪。电池测试仪所需的电压和电流精度通常在满量程的 $\pm 0.02\%$ 至 $\pm 0.05\%$ 之间。

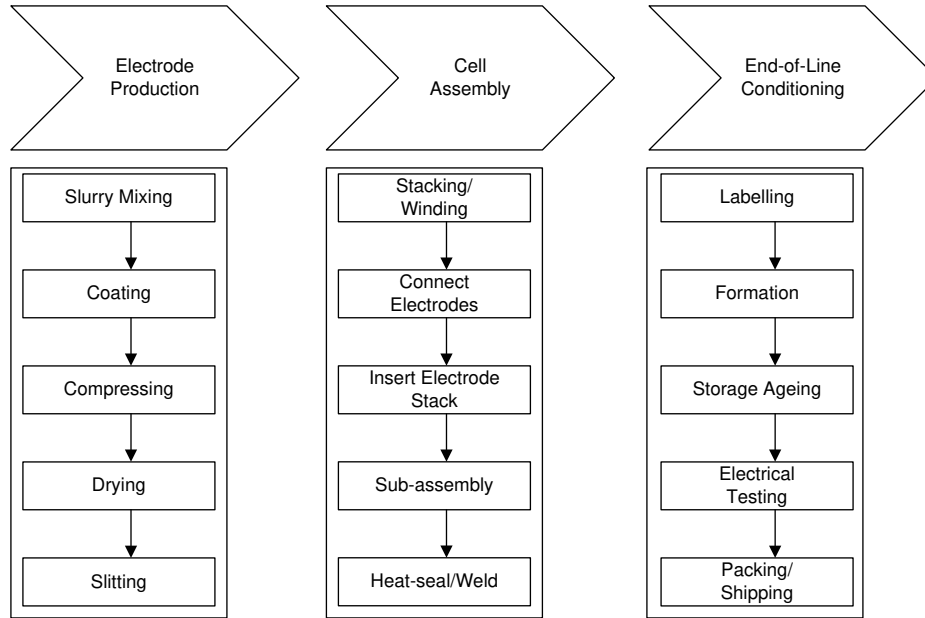


图 1-1. 简化的锂离子电池制造工艺

1.1 关键系统规格

| 参数 | 规格 |
|--------------|--------------------------------|
| LV 端口 - 电池端口 | 50 mV 至 6 V |
| HV 端口 - 总线电压 | 12V 至 15V |
| 最大输出电流 | $\pm 100\text{A}$ |
| 每相最大直流电流 | $\pm 50\text{A}$ |
| 相位数 | 2 |
| 开关频率 | 93.75 kHz |
| 电流调节误差 | $< \pm 20\text{mA}$ (0.02% FS) |
| 电压调节误差 | $< \pm 1\text{mV}$ (0.02% FS) |

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 是参考设计的方框图。TMS320F280039 MCU 为同步降压功率级生成高分辨率 16 位 PWM，并执行电流和电压控制功能。INA188 仪表放大器检测电流，而 OPA2182 运算放大器检测电压。电流和电压信号由外部 ADS131M08 ADC 转换为数字数据。C2000 片上窗口比较器用于实现过流电流保护。

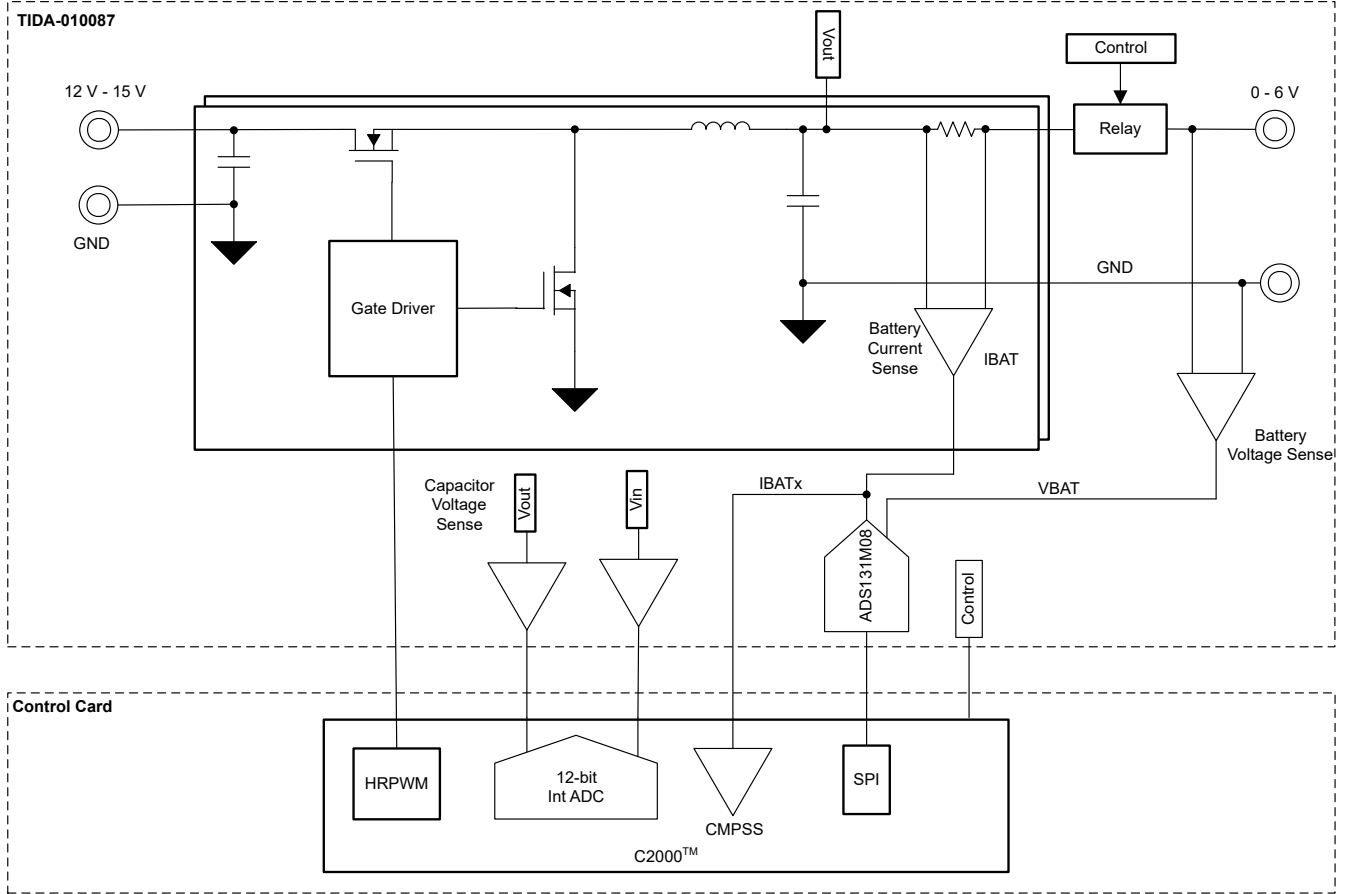


图 2-1. TIDA-010087 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 电流和电压控制器

图 2-2 显示了电流和电压控制环路的软件实现。电压环路与电流级联，以便在充电和放电模式下实现恒流和恒压。当电池电压远离恒压设置 (VSET) 时，电压环路饱和至恒流设置 (ISET)。当电池电压接近 VSET 时，电压环路闭合，并且 ISET 减少以确保电池电压不超过 VSET 限值。该控制器可在充电和放电模式下工作。在充电模式下，VSET 限制最大电池电压，从而停止充电。在放电模式下，VSET 限制旨在停止放电的最小电池电压。

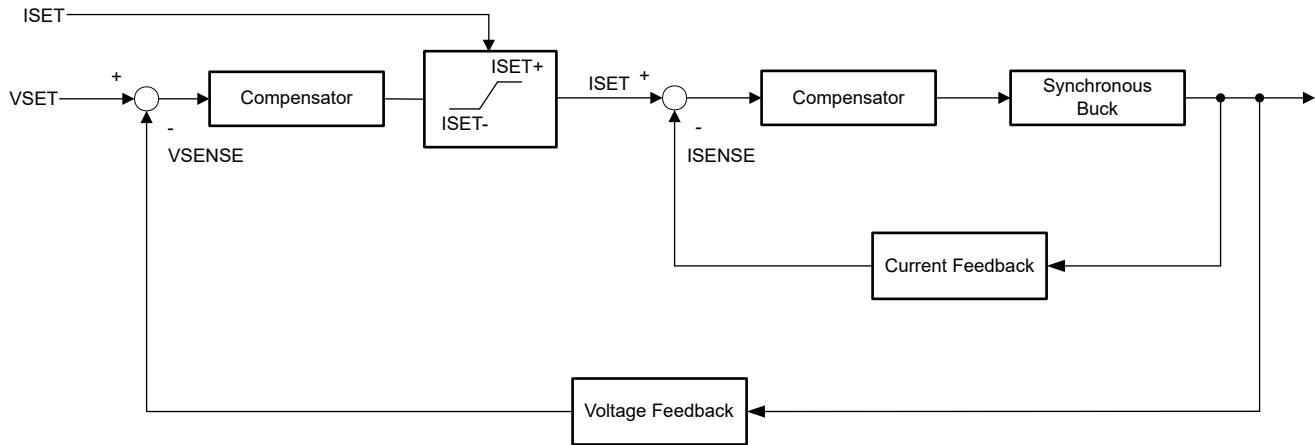


图 2-2. 电流和电压控制器

2.2.2 高分辨率 PWM 生成

为了生成高分辨率，使用具有高分辨率 PWM 输出能力的 C2000。高分辨率计数器能够实现 150ps 的时间阶跃，这相当于 100MHz CPU 时钟在 100kHz PWM 频率下的 16 位分辨率。表 2-1 显示不同开关频率下的 PWM 分辨率。

表 2-1. PWM 和 HRPWM 的 C2000™ MCU 分辨率

| PWM 频率 (kHz) | 常规分辨率 (PWM) | | 高分辨率 PWM | |
|--------------------|----------------|------|----------|-------|
| | 100MHz EPWMCLK | | | |
| | 位 | % | 位 | % |
| 20 | 12.3 | 0.02 | 18.1 | 0 |
| 50 | 11 | 0.05 | 16.8 | 0.001 |
| 100 | 10 | 0.1 | 15.8 | 0.002 |
| 150 | 9.5 | 0.15 | 15.2 | 0.003 |
| 200 | 9 | 0.2 | 14.8 | 0.004 |
| 250 | 8.6 | 0.25 | 14.4 | 0.005 |

2.3 重点产品

2.3.1 TMS320F280039

TMS320F280039 C2000 器件用于控制同步降压功率级。该器件具有八个 HRPWM 通道和四个窗口比较器，足以控制四个电池测试通道或降压转换器。有关更多信息，请参阅 [TMS320F28003x 实时微控制器](#) 数据表。

2.3.2 ADS131M08

ADS131M08 是一款八通道、同步采样、24 位、 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)，允许的最大采样率高达 32ksps，足以实现 $\pm 0.01\%$ 的精度和 1kHz 环路带宽。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

图 3-1 显示了 TIDA-010087 硬件。TIDA-010087 板需要 F280039C controlCARD 评估模块才能运行。

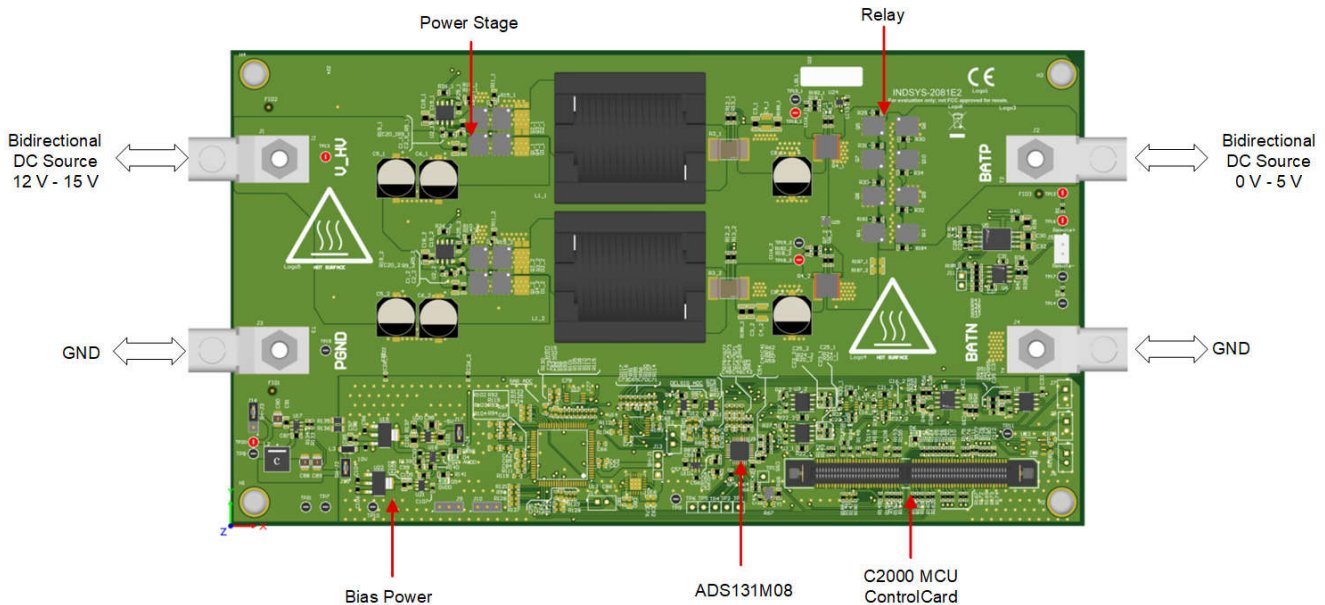


图 3-1. 电路板概述

3.2 软件要求

该设计软件在适用于 C2000 MCU 的 DigitalPower 软件开发套件 (SDK) (C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK) 中提供，并在 powerSUITE 框架内得到支持。

3.2.1 在 Code Composer Studio 中打开工程

使用以下步骤在 CCS 中启动工程：

1. 从 [Code Composer Studio \(CCS\) 集成开发环境 \(IDE\)](#) 工具文件夹安装 Code Composer Studio。建议使用版本 12.3 或更高版本。
2. 通过以下两种方式之一安装 [C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#)：
 - a. 转至 CCS 并点击 *View* → *Resource Explorer*。在 TI Resource Explorer 下，转至 C2000WARE-DIGITAL-POWER-SDK，然后点击安装按钮。
 - b. 通过 C2000Ware Digital Power SDK 工具文件夹。
3. 安装完成后，关闭 CCS，然后打开一个新的工作区。CCS 自动检测 powerSUITE。有时必须重新启动 CCS 才能使更改生效。

备注

默认情况下，powerSUITE 随 SDK 一起安装。

现在，可以使用以下方法之一导入固件工程：

• 使用 *Resource Explorer*

1. 在 *Resource Explorer* 中的 C2000WARE-DIGITAL-POWER-SDK 下，点击 *powerSUITE* → *Solution Adapter Tool*。
2. 从直流/直流部分下提供的设计列表中选择 TIDA-010087。
3. 将显示开发套件页面。用于运行工程的图标显示在顶部栏中。点击 *Run Project*。
4. 此操作将工程导入到工作区环境中，并显示具有与图 3-2 类似的 GUI 的配置页面。

5. 如果不显示该 GUI 页面，请参阅 C2000WAREDIGITAL-POWER-SDK 资源浏览器中 powerSUITE 下的“常见问题解答”部分。
- 直接从解决方案文件夹导入
 1. 用户还可以执行以下操作来直接导入工程：进入 CCS 内部以点击 Project → *Import CCS Projects*，并浏览到位于 /solutions/tida_010087/f28003x/ccs 中的解决方案文件夹。
 2. 出现两个工程规范：一个工程规范带有 powerSUITE，另一个工程规范不带 powerSUITE。点击任一规范都会创建该工程的一个自包含文件夹，其中包含所有依赖项。
 3. 为发现 powerSUITE GUI 限制或希望为生产代码移除 powerSUITE 的客户提供了非 powerSUITE 工程。
 4. 本文档将指导用户完成 powerSUITE 工程，但可通过修改 powerSUITE settings.h 文件中的相关 #defines 并使用非 powerSUITE 工程重复所有步骤，本设计指南对此进行了介绍。

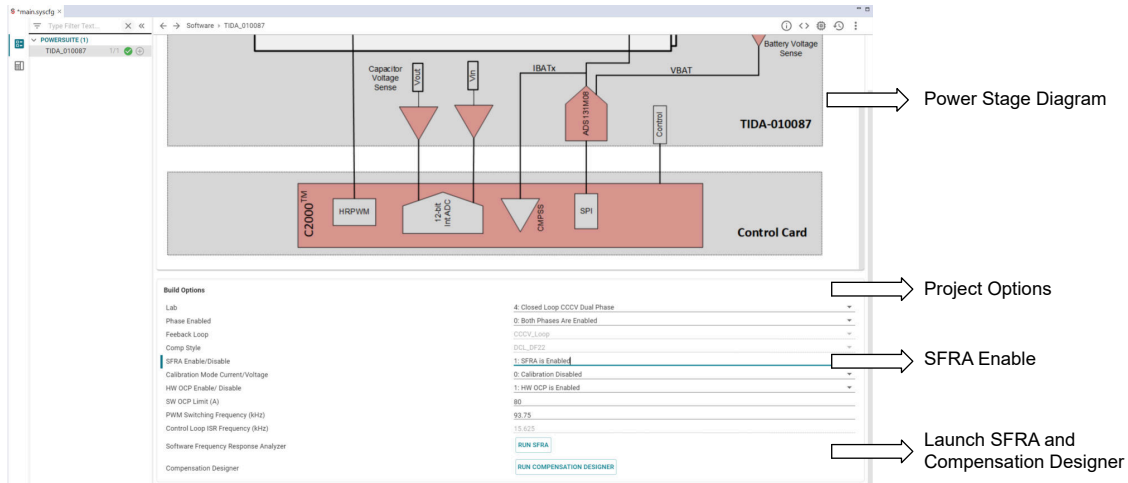


图 3-2. 本设计的 powerSUITE 页面

3.2.2 工程结构

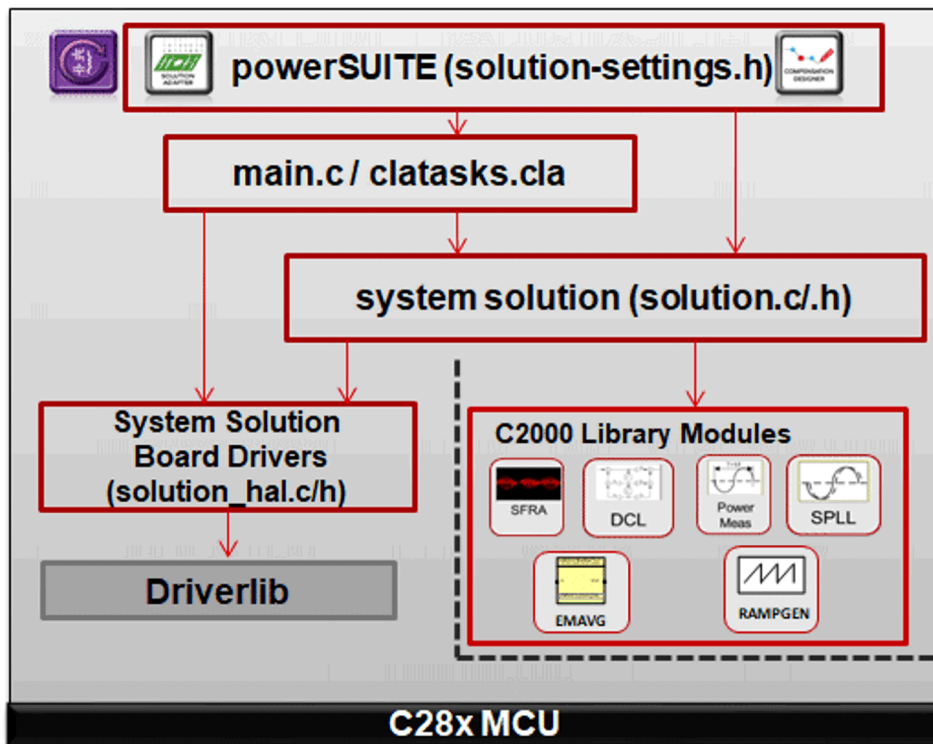


图 3-3. 工程结构概览

图 3-3 显示了工程的总体结构。导入工程后，CCS 内将显示 Project Explorer，如图 3-4 所示。

备注

图 3-4 展示了 F28003x 的工程；不过，如果从 powerSUITE 页面中选择不同的器件，则结构是类似的。

特定于解决方案并且独立于器件的文件位于 `.c/h` 中，其中含有核心算法代码。

特定于电路板且特定于器件的文件位于 `_hal.c/h` 中。该文件由特定于器件的驱动程序组成，以用于运行解决方案。如果用户想要使用不同的调制方案或不同的器件，除了更改工程中的器件支持文件，用户只需要对这些文件进行更改。

`-main.c` 文件包含工程的主要框架。该文件由对电路板和解决方案文件的调用（有助于构建系统框架）以及中断服务例程 (ISR) 和慢速后台任务组成。

对于该设计，解决方案为 `bt2ph`。

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 `_settings.h` 文件。该文件是由 powerSUITE 页面生成的用于工程编译的唯一 C 文件。用户不得手动修改该文件，因为每次保存工程时，powerSUITE 都会覆盖更改。`_user_settings.h` 包含在 `_settings.h` 中，可用于保留 powerSUITE 工具范围之外的任何设置，例如 ADC 映射的 `#defines`、GPIO 等。

`_cal.h` 文件包含用于电流和电压测量的增益和偏移量值。

`Kit.json` 和 `solution.js` 文件由 powerSUITE 在内部使用，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。

解决方案名称也用作解决方案中使用的所有变量和定义的模块名称。因此，所有变量和函数调用都以 `BT2PH` 名称开头（例如，`BT2PH_userParam_V_I_ch1`）。这种命名规则使用户组合不同的解决方案，同时避免命名冲突。

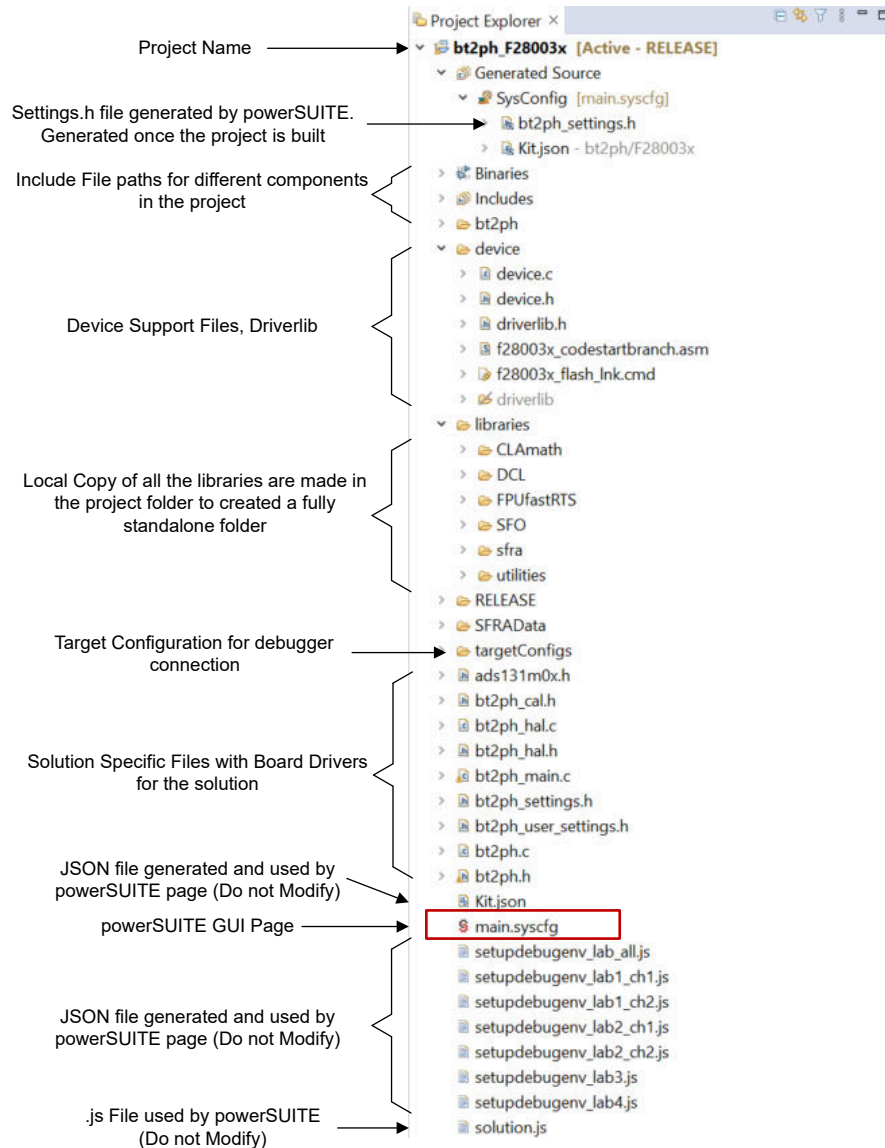


图 3-4. BT2PH 工程的 Project Explorer 视图

BT2PH 工程由三个 ISR (ISR3、ISR4 和 ISR7) 组成。ISR1、ISR2、ISR5 和 ISR6 保留供将来使用。

ISR3 用于检测降压转换器的输入电压和电容器电压。ISR3 由 ADCC 转换完成进行触发。ADCC 用于检测转换器的输入电压和输出电压，以实现直流/直流的软启动。

ISR4 由 ADS131M08 的 DRDY (数据就绪) 信号触发。外部 ADC 编程为 15.625kHz 采样率，该采样率设置 ISR 频率。ISR 运行电流和电压控制环路函数。

ISR7 由 SPI 接收 FIFO 中断来触发。ISR 用于从 FIFO 寄存器中读取外部 ADC 数据。

图 3-5 和图 3-6 显示了 ISR3、ISR4 和 ISR7 所用的时间。三个 ISR 所花费的总时间不到 8μs。对于 15.625kHz ISR 频率，ISR 占用 12.5% 的 CPU 资源。

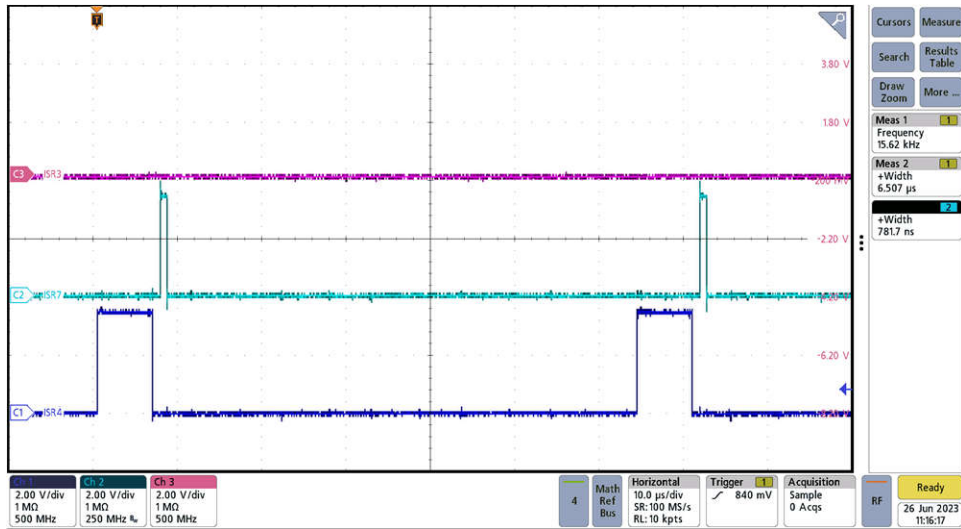


图 3-5. ISR4 和 ISR7 执行时间测量

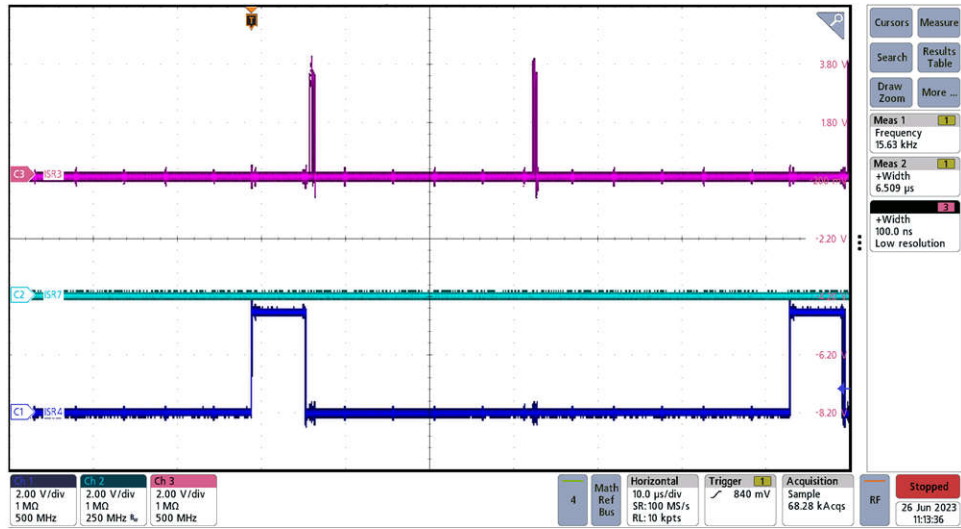


图 3-6. ISR4 和 ISR3 执行时间测量

3.2.3 软件流程图

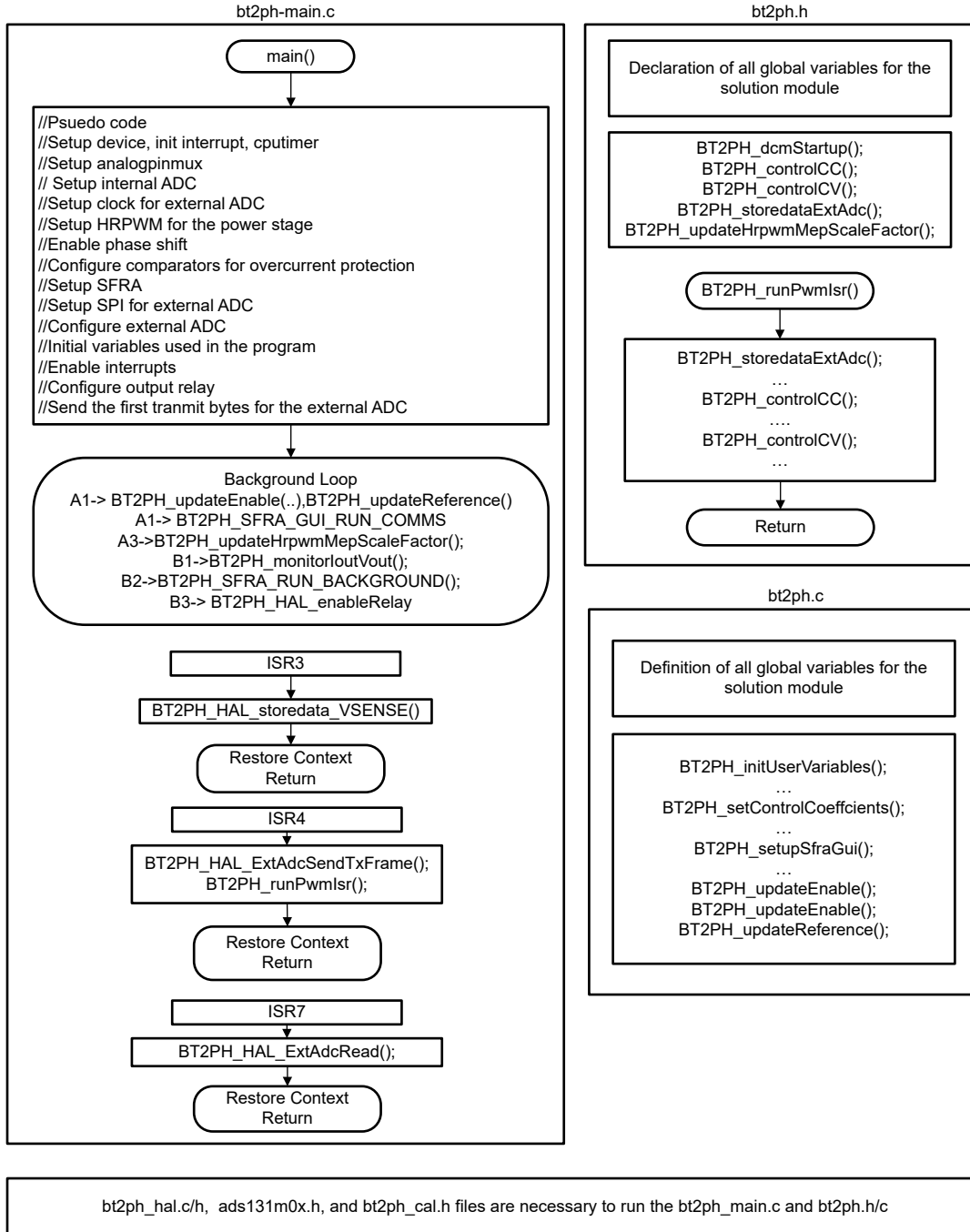


图 3-7. 软件流程图

3.3 测试设置

3.3.1 用于对电流和电压环路进行调优的硬件设置

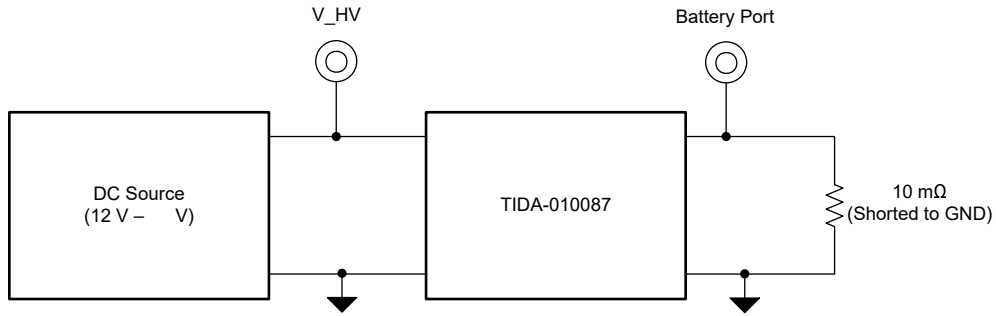


图 3-8. 用于对电流和电压环路进行调优的硬件设置

3.3.2 用于测试双向功率流的硬件设置

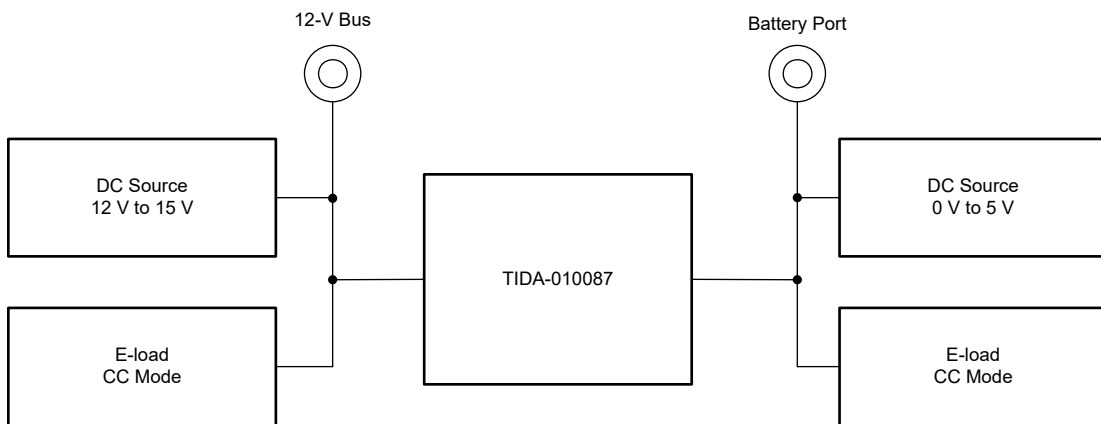


图 3-9. 用于测试双向功率流的硬件设置

3.3.3 用于电流和电压校准的硬件设置

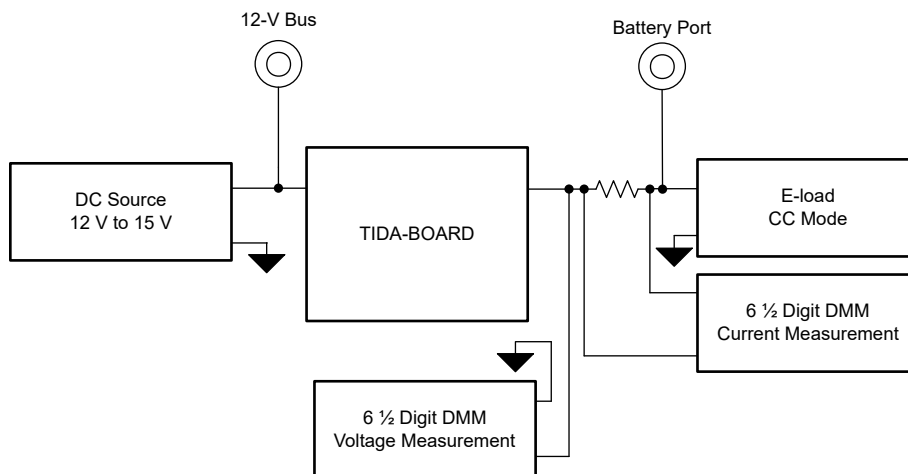


图 3-10. 用于电流和电压校准的硬件设置

3.4 测试步骤

3.4.1 实验变量定义

BT2PH_userParam_V_I_chx 参数用于在不同的实验中控制功率级。BT2PH_userParam_V_I_ch1 和 BT2PH_userParam_V_I_ch2 用于实验 1 和实验 2 中，以控制直流/直流转换器的相位 1 和相位 2。实验 3 和实验 4 使用 BT2PH_userParam_V_I_chm 变量。有关参数定义，请参阅表 3-1。

表 3-1. BT2PH_userParam 定义

| BT2PH_userParam | 数据类型 | 注释 |
|-----------------|--------------|--------------------------------|
| iref_A | float | 设置充电和放电模式的电流 [0, 100] |
| vrefCharge_V | float | 设置充电模式下的电压 [0, 5] |
| vrefDischarge_V | float | 设置放电模式下的电压 [0, 5] |
| dir_bool | unsigned int | 对于充电模式，将此参数设置为 1 |
| | | 对于放电模式，将此参数设置为 0 |
| en_bool | unsigned int | 将此参数设置为 1 以启用该通道 |
| dutyRef_pu | float | 开环模式的基准占空比。范围 = 0 至 1.0 |
| ibatCal_pu | float | 在校准模式下使用此参数设置输出电流。范围 = 0 至 1.0 |
| vbatCal_pu | float | 在校准模式下使用此参数设置输出电压。范围 = 0 至 1.0 |
| loutGain_pu | float | 该变量存储电流增益校准数据 |
| ioutOffset_pu | float | 该变量存储电流偏移量校准数据 |
| loutGain_A | float | 该变量存储电流增益校准数据 |
| loutOffset_A | float | 该变量存储电流偏移量校准数据 |
| vbatGain_pu | float | 该变量存储电压增益校准数据 |
| vbatOffset_pu | float | 该变量存储电压偏移量校准数据 |
| vbatGain_V | float | 该变量存储电压增益校准数据 |
| vbatOffset_V | float | 该变量存储电压偏移量校准数据 |

3.4.2 实验 1. 开环电流控制 - 单相

3.4.2.1 设置实验 1 的软件选项

- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 2，否则跳至步骤 3。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 1: Open Loop CC Single Phase*。
 - 将 *Phase Enabled* 更改为“Phase 1”或“Phase 2”。
 - 将“SFRA Enable/Disable”设置为 1。
 - 保存该页面。
- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 *solution_settings.h* 文件中修改上述设置。

```
#define LAB_NUMBER (1)
#define PHASE_NUMBER (1)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

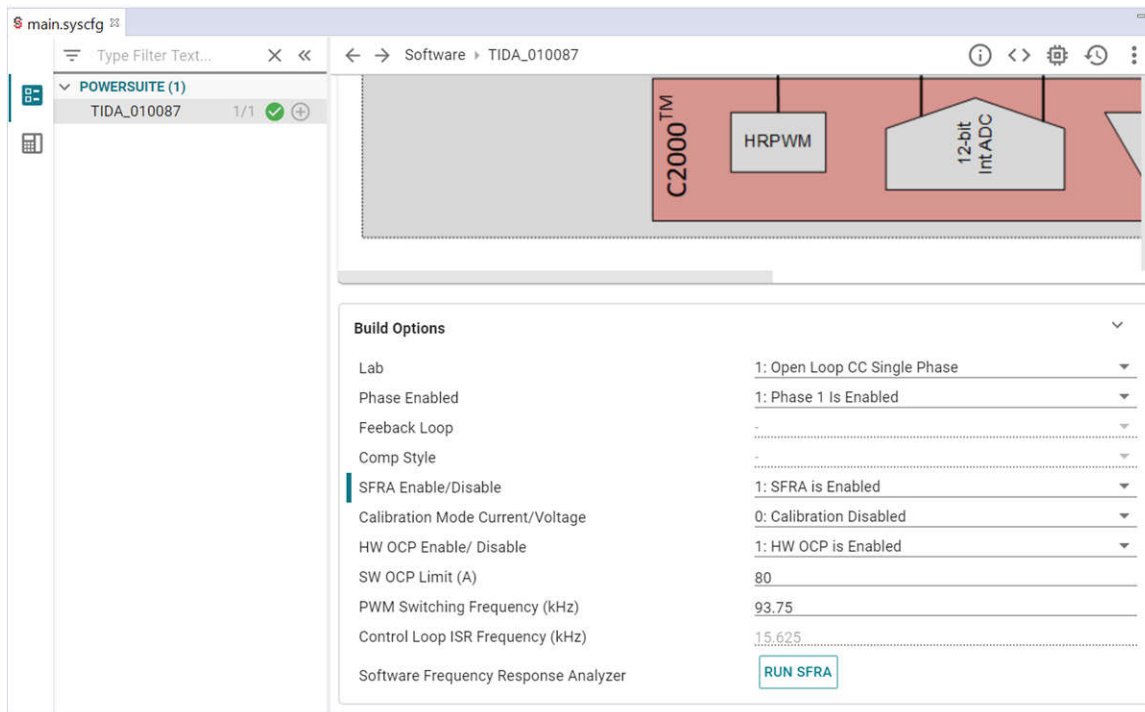



图 3-11. 实验 1 的构建选项


3.4.2.2 生成和加载工程以及设置调试环境

使用以下步骤来构建和加载工程并设置调试环境。

1. 右键单击工程名称，然后单击 **Rebuild Project**。
2. 工程成功构建。
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”。
4. 然后，单击 **Run → Debug** 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 **CCS** 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在观察/表达窗口中添加变量，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，单击 **open**，然后浏览到位于工程文件夹内的 **setupdebugenv_lab1_ch1.js** 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。对于相位 2，选择 **setupdebugenv_lab2_ch2.js** 脚本文件。
7. 单击观察窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以持续更新控制器中的值。

3.4.2.3 运行代码

使用以下步骤运行实验 1 的代码。

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 **BT2PH_InputVoltageSense_V** 是否介于 12V 至 15V 之间。
4. 如果频率为 15.625kHz，则使用示波器检查外部 ADC 的 **DRDY** 信号。图 3-12 显示了 MCU 运行时 **ADS131M08** 的 **DRDY** 和 **CS** 信号。
5. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
 - **BT2PH_userParam_V_I_ch1->dutyRef_pu = 0.03**
 - 设置 **BT2PH_userParam_V_I_ch1->en_bool = 1**
 - 将“**BT2PH_enableRelay_bool**”设置为 1 以启用输出继电器
 - 有关“**Expression Window**”设置，请参阅图 3-13
6. **BT2PH_measureMultiphase_V_I** 变量显示直流/直流转换器的输出电流和电压。调整 **BT2PH_userParam_V_I_ch1->dutyRef_pu** 以确保电流大概为 15A。

7. 用于开环电流控制的 SFRA 设置显示了用于提取开环电流控制的受控体模型的 SFRA 设置。点击 SysConfig 页面中的 *Run SFRA* 图标。此时将弹出 SFRA GUI。
8. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的各个选项；例如，对于 F280039，请选择浮点。点击 *Setup Connection*。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击“Ok”按钮。返回到 SFRA GUI，然后点击 *Connect* 按钮。
9. SFRA GUI 将连接到器件中。现在可以通过点击 *Start Sweep* 启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-15 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。

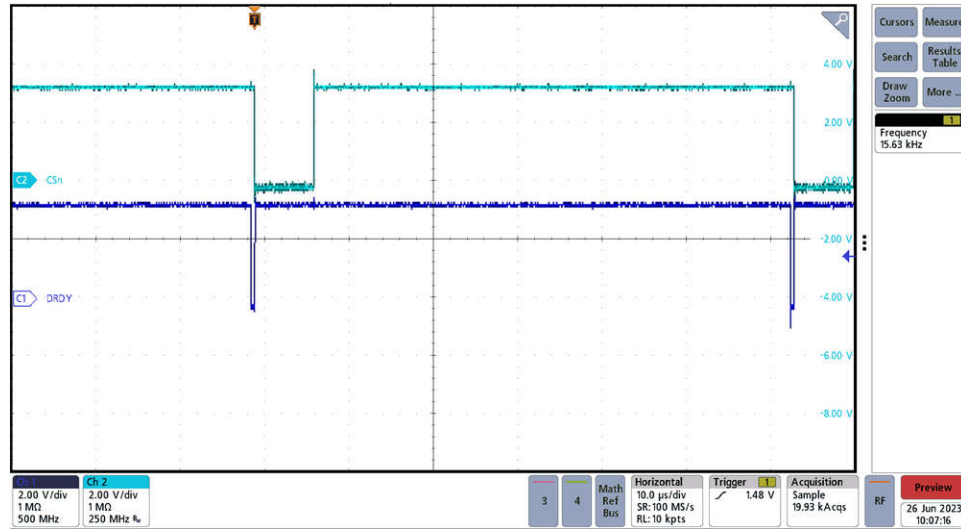


图 3-12. 外部 ADC 的 CSn 和 DRDY 信号

| Expression | Type | Value |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| BT2PH_LabNumber | enum <unnamed> | Lab1_OpenLoopSinglePh... |
| BT2PH_SfraStatus | enum <unnamed> | SFRA_Enabled |
| BT2PH_CalibrationStatus | enum <unnamed> | Calibration_Disabled |
| BT2PH_CalibrationMode | enum <unnamed> | 0 |
| BT2PH_InputVoltageSense_V | float | 12.3468018 |
| BT2PH_enableRelay_bool | unsigned int | 1 |
| BT2PH_userParam_V_I_ch1 | struct <unnamed> | {iref_A=1.0,vrefCharge_V... |
| iref_A | float | 1.0 |
| vrefCharge_V | float | 4.19999981 |
| vrefDischarge_V | float | 2.79999995 |
| dir_bool | unsigned int | 1 |
| en_bool | unsigned int | 1 |
| dutyRef_pu | float | 0.0299999993 |
| ibatCal_pu | float | 0.0 |
| vbatCal_pu | float | 0.0 |
| ioutGain_pu | float | 0.0185729992 |
| ioutOffset_pu | float | 0.000677544624 |
| ioutGain_A | float | 53.8416023 |
| ioutOffset_A | float | -0.0364800878 |
| vbatGain_pu | float | 0.167084396 |
| vbatOffset_pu | float | 0.000334143639 |
| vbatGain_V | float | 5.98499918 |
| vbatOffset_V | float | -0.00199984945 |
| BT2PH_measureMultiphase_V_I | struct <unnamed> | {Isense1_A=14.8733797,l... |
| Isense1_A | float | 14.8752794 |
| Isense2_A | float | 0.0186048299 |
| Ibatsense_A | float | 14.8938847 |
| Voutsense_V | float | 0.0 |
| Vbatsense_V | float | 0.10666696 |

图 3-13. 实验 1 表达式窗口，开环

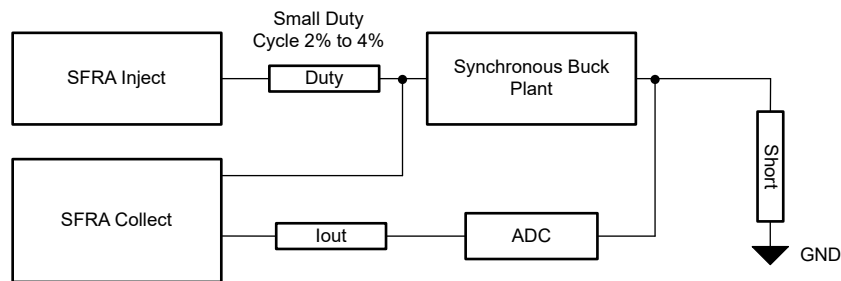


图 3-14. 用于开环电流控制的 SFRA 设置

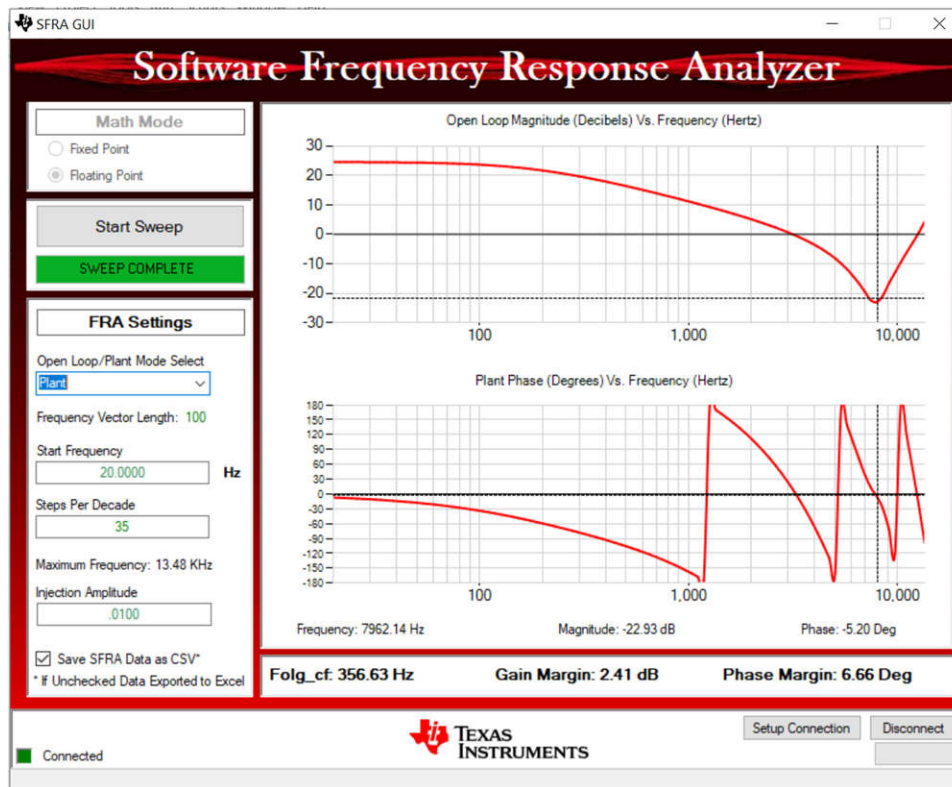



图 3-15. 电流控制开环频率响应

3.4.3 实验 2. 闭环电流控制 - 单相

3.4.3.1 设置实验 2 的软件选项

- 要运行此实验，请确保按上一节（即节 3.4.2）所述设置硬件。
- 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 2: Closed Loop CC Single Phase*。
 - 将 *Phase Enabled* 更改为“Phase 1”或“Phase 2”。
 - 将“SFRA Enable/Disable”设置为 1。
 - 通过点击 *Run Compensation Design* 按钮打开补偿设计器 .
 - 然后，补偿设计器启动并提示用户选择有效的 SFRA 数据文件。将实验 1 中运行的 SFRA 数据导入补偿设计器来设计双极点、双零点补偿器。在此迭代设计过程中保持更大的裕度，以确保环路闭合时，系统是稳定的。
 - 图 3-16 显示了电流环路的补偿参数。
 - 点击 *Save Comp* 按钮以保存补偿。关闭补偿设计器工具。
 - 保存 SYSCONFIG 页面。
- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 *solution_settings.h* 文件中修改 *Build Settings*。补偿设计器位于 *C2000Ware_DigitalPower_Install_Location\powerSUITE\source\utils*。

```
#define LAB_NUMBER (2)
#define PHASE_NUMBER (1)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

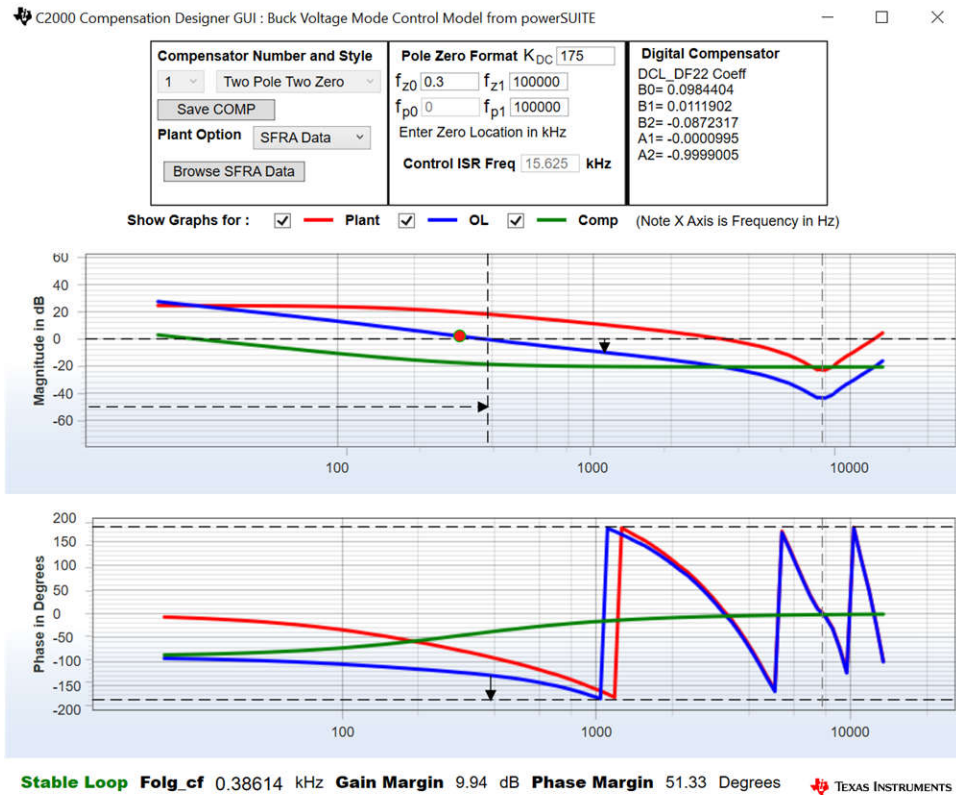





图 3-16. 使用补偿设计器对电流环路进行调优

3.4.3.2 生成和加载工程以及设置调试环境

1. 右键点击工程名称，然后点击 *Rebuild Project*。
2. 工程成功构建。
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”。
4. 然后，点击 *Run* → *Debug* 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 *CCS* 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在观察/表达窗口中添加变量，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*，然后浏览到位于工程文件夹内的 *setupdebugenv_lab2_ch1.js* 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。对于相位 2，选择 *setupdebugenv_lab2_ch2.js* 脚本文件。
7. 点击观察窗口中的 *Continuous Refresh* 按钮 ，以持续更新控制器中的值。

3.4.3.3 运行代码

1. 要运行此实验，请确保按上一节（即节 3.4.2）所述设置硬件。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 *Expression Window* 中 *BT2PH_InputVoltageSense_V* 是否介于 12V 至 15V 之间。
4. 从 *Expression Window* 中设置以下参数：
 - 将 *BT2PH_enableRelay_bool* 设置为 1 以启用输出继电器。
 - *BT2PH_userParam_V_I_ch1->iref_A* = 15.0。
 - 设置 *BT2PH_userParam_V_I_ch1->en_bool* = 1。
 - 有关“Expression Window”设置，请参阅图 3-17。
5. *BT2PH_measureMultiphase_V_I* 变量显示直流/直流转换器的输出电流和电压。*Isense1_A* 显示值接近 *iref_A* 设置，误差为 ±1mA。
6. 图 3-18 显示了用于测试环路稳定性的 SFRA 设置。点击 *SysConfig* 页面中的 *Run SFRA* 图标。此时将弹出 SFRA GUI。

- 在 SFRA GUI 上选择器件对应的各个选项；例如，对于 F280039，请选择浮点。点击“Setup Connection”。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击“Ok”。返回到 SFRA GUI，然后点击 **Connect** 按钮。
- SFRA GUI 将连接到器件中。现在可以通过点击 **Start Sweep** 启动 SFRA 扫描。完整的 SFRA 扫描需要几分钟才能完成。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-19 所示。
- 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。

| Expression | Type | Value |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| BT2PH_labNumber | enum <unnamed> | Lab2_ClosedLoopSingleP... |
| BT2PH_SfraStatus | enum <unnamed> | SFRA_Enabled |
| BT2PH_CalibrationStatus | enum <unnamed> | Calibration_Disabled |
| BT2PH_CalibrationMode | enum <unnamed> | 0 |
| BT2PH_InputVoltageSense_V | float | 12.3535156 |
| BT2PH_enableRelay_bool | unsigned int | 1 |
| BT2PH_userParam_V_I_ch1 | struct <unnamed> | {iref_A=15.0,vrefCharge_... |
| iref_A | float | 15.0 |
| vrefCharge_V | float | 4.19999981 |
| vrefDischarge_V | float | 2.79999995 |
| dir_bool | unsigned int | 1 |
| en_bool | unsigned int | 1 |
| dutyRef_pu | float | 0.00999999978 |
| ibatCal_pu | float | 0.0 |
| vbatCal_pu | float | 0.0 |
| ioutGain_pu | float | 0.0185729992 |
| ioutOffset_pu | float | 0.000677544624 |
| ioutGain_A | float | 53.8416023 |
| ioutOffset_A | float | -0.0364800878 |
| vbatGain_pu | float | 0.167084396 |
| vbatOffset_pu | float | 0.000334143639 |
| vbatGain_V | float | 5.98499918 |
| vbatOffset_V | float | -0.00199984945 |
| BT2PH_measureMultiphase_V_I | struct <unnamed> | {Isense1_A=14.9998608,I... |
| Isense1_A | float | 14.9997711 |
| Isense2_A | float | 0.018064633 |
| lbatsense_A | float | 15.0178356 |
| Voutsense_V | float | 0.0 |
| Vbatsense_V | float | 0.10604196 |

图 3-17. 实验 2 表达式窗口，闭环

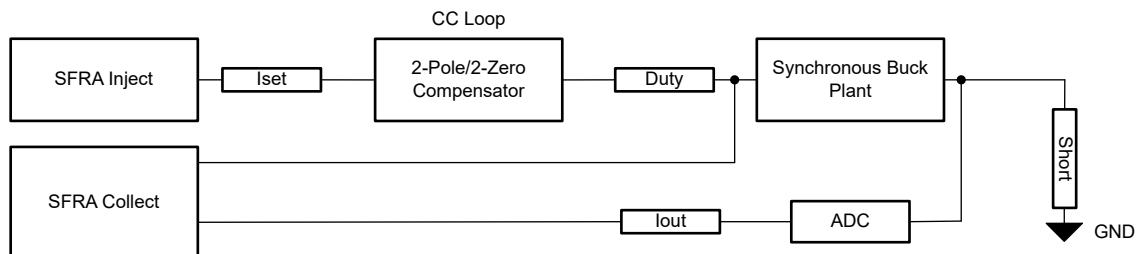


图 3-18. 用于闭环电流控制的 SFRA 设置

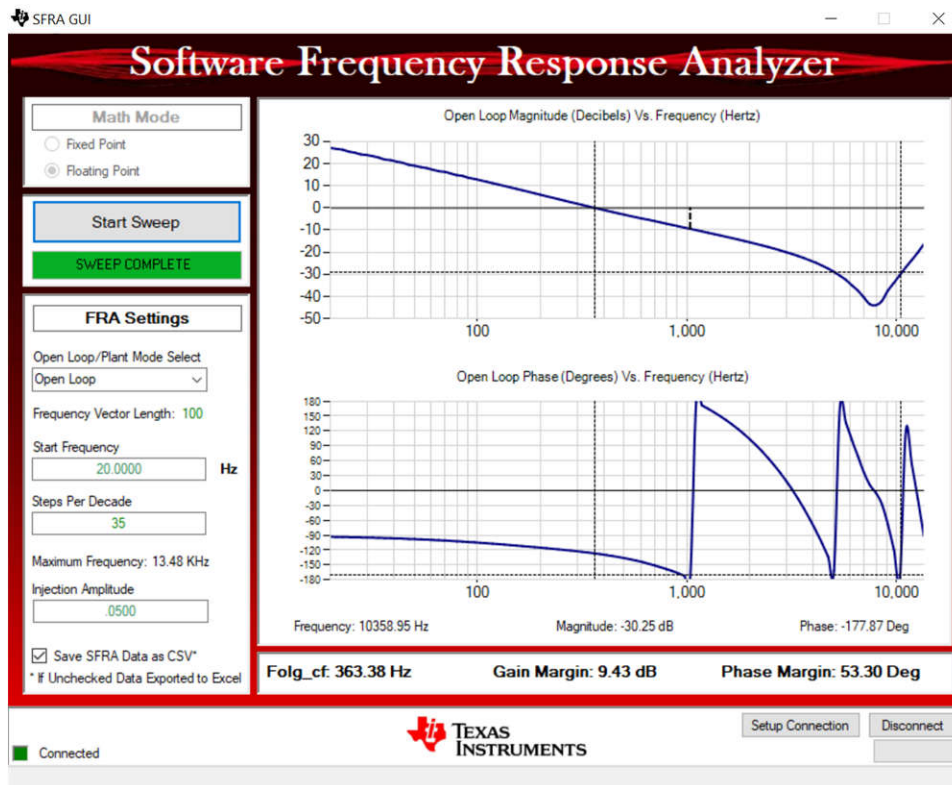


图 3-19. 电流控制闭环频率响应

3.4.3.4 电流校准

- 要运行该实验，请确保按节 3.3.3 所示设置硬件。2 点校准方法用于校准增益和偏移量误差。
- 要测量电流，请使用外部精密电阻器和 DMM，或者您可以使用电子负载电流读数。或者，可以使用 TIDA-010087 电路板上的检测电阻两端的电压来测量输出电流。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 2: Closed Loop CC Single Phase*。
 - 将 *Phase Enabled* 更改为“Phase 1”。
 - 将 *Calibration Mode* 设置为 1 以进行电流校准。
 - 保存 SYSCONFIG 页面，并运行代码。
 - 打开 *Expression Window*。
 - 使用 `BT2PH_userParam_V_I_ch1->ibatCal_pu` 参数更新输出电流。
 - 将 `BT2PH_enableRelay_bool` 设置为 1 以启用输出继电器。
 - 设置 `BT2PH_userParam_V_I_ch1->en_bool = 1`。
 - 将 `BT2PH_userParam_V_I_ch1->ibatCal_pu` 设置为“0.05”和“0.3”，并记下输出电流读数。
 - 在 `bt2ph_cal.h` 文件中更新实际输出电流读数。

```
#define BT2PH_IBAT_ACTUAL_CH1_P1_A ((float32_t)2.6556)
#define BT2PH_IBAT_ACTUAL_CH1_P2_A ((float32_t)16.163)
#define BT2PH_IBAT_ACTUAL_CH2_P1_A ((float32_t)2.6556)
#define BT2PH_IBAT_ACTUAL_CH2_P2_A ((float32_t)16.163)
```

- 对转换器的相位 2 重复这些步骤。
 - 将 *Calibration Mode* 设置为 0 以禁用校准。
- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 `solution_settings.h` 文件中修改 *Build Settings*。

```
#define LAB_NUMBER (2)
#define PHASE_NUMBER (1)
```

```
#define CALIBRATION_ENABLED (true)
```

```
#define CALIBRATION_MODE (1)
```

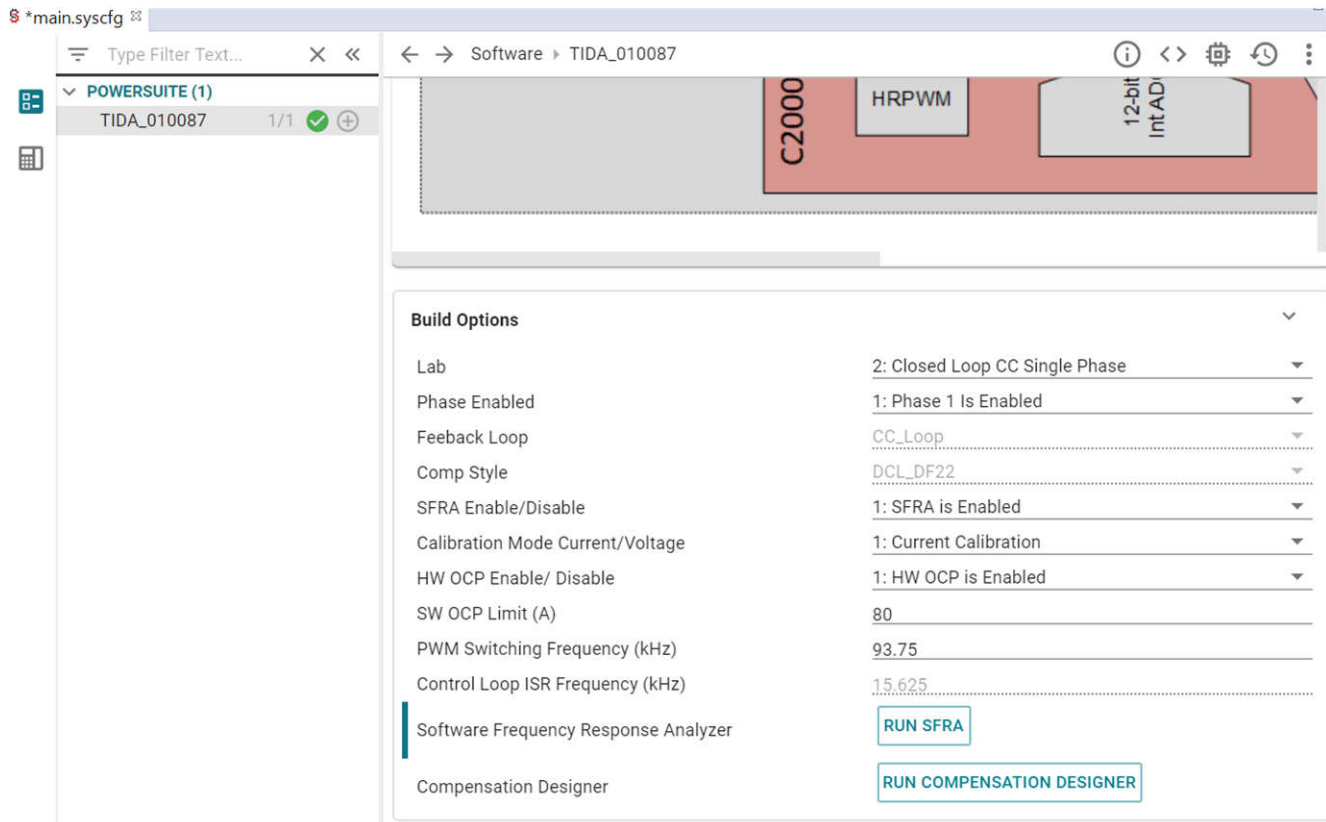


图 3-20. 电流校准的构建选项

3.4.4 实验 3. 闭环电流控制 - 双相

3.4.4.1 设置实验 3 的软件选项

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
3. 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 3: Closed-Loop CC Dual Phase*。
 - 对于双相模式，将 *Phase Enabled* 更改为 0。
 - 将“SFRA Enable/Disable”设置为 1。
 - 保存该页面。
4. 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 *solution_settings.h* 文件中修改上述设置。


```
#define LAB_NUMBER (3)
```

```
#define PHASE_NUMBER (0)
```


```
#define SFRA_ENABLED (true)
```

3.4.4.2 生成和加载工程以及设置调试环境

1. 右键点击工程名称，然后点击 *Rebuild Project*。
2. 工程成功构建。
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”。
4. 然后，点击 *Run → Debug* 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。

6. 要在观察/表达窗口中添加变量，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** 按钮，然后浏览到位于工程文件夹内的 `setupdebugenv_lab3.js` 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击观察窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮 ，以持续更新控制器中的值。

3.4.4.3 运行代码

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 **Expression Window** 中 `BT2PH_InputVoltageSense_V` 是否介于 12V 至 15V 之间。
4. 从 **Expression Window** 中设置以下参数：
 - 将 `BT2PH_enableRelay_bool` 设置为 1 以启用输出继电器。
 - `BT2PH_userParam_V_I_chm->iref_A = 15.0`。
 - 设置 `BT2PH_userParam_V_I_ch1->en_bool = 1`。
 - 有关 **Expression Window** 设置，请参阅图 3-21。
5. `BT2PH_measureMultiphase_V_I` 变量显示直流/直流转换器的输出电流和电压。`lbatsense_A` 显示值接近 `iref_A`，误差为 $\pm 1\text{mA}$ 。
6. 图 3-22 显示了用于测量开环电压控制频率响应的 SFRA 设置。
7. 点击 **SysConfig** 页面中的 **Run SFRA** 图标。此时将弹出 SFRA GUI。
8. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的各个选项；例如，对于 F280039，请选择浮点。点击 **Setup Connection** 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击“Ok”。返回到 SFRA GUI，然后点击 **Connect** 按钮。
9. SFRA GUI 连接到器件中。现在可以通过点击 **Start Sweep** 按钮启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-23 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。

| Expression | Type | Value |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| BT2PH_labNumber | enum <unnamed> | Lab3_ClosedLoopDualPh... |
| BT2PH_SfraStatus | enum <unnamed> | SFRA_Enabled |
| BT2PH_CalibrationStatus | enum <unnamed> | Calibration_Disabled |
| BT2PH_CalibrationMode | enum <unnamed> | 0 |
| BT2PH_InputVoltageSense_V | float | 12.3400879 |
| BT2PH_enableRelay_bool | unsigned int | 1 |
| BT2PH_userParam_V_I_chm | struct <unnamed> | {iref_A=15.0,vrefCharge_... |
| iref_A | float | 15.0 |
| vrefCharge_V | float | 4.19999981 |
| vrefDischarge_V | float | 2.79999995 |
| dir_bool | unsigned int | 1 |
| en_bool | unsigned int | 1 |
| dutyRef_pu | float | 0.00999999978 |
| ibatCal_pu | float | 0.0 |
| vbatCal_pu | float | 0.0 |
| ioutGain_pu | float | 0.00927747134 |
| ioutOffset_pu | float | 0.000643853913 |
| ioutGain_A | float | 107.787994 |
| ioutOffset_A | float | -0.0693997219 |
| vbatGain_pu | float | 0.167084396 |
| vbatOffset_pu | float | 0.000334143639 |
| vbatGain_V | float | 5.98499918 |
| vbatOffset_V | float | -0.00199984945 |
| BT2PH_measureMultiphase_V_I | struct <unnamed> | {Isense1_A=7.49065685,I... |
| Isense1_A | float | 7.49119616 |
| Isense2_A | float | 7.50912523 |
| Ibatsense_A | float | 15.0003214 |
| Voutsense_V | float | 0.0 |
| Vbatsense_V | float | 0.106659822 |

图 3-21. 实验 3 表达式窗口，闭环

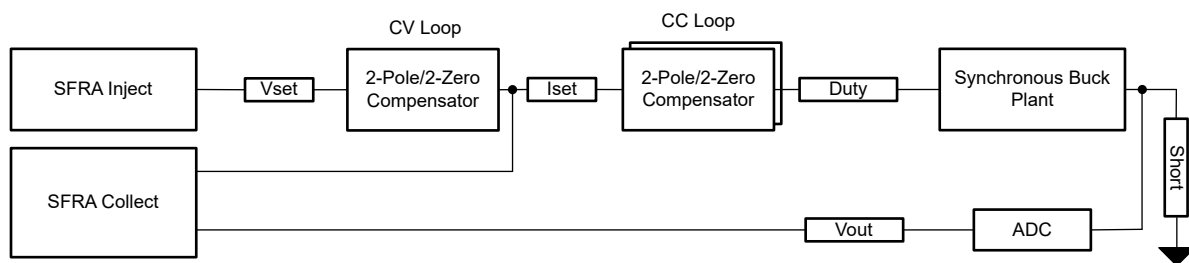


图 3-22. 用于开环电压控制的 SFRA 设置

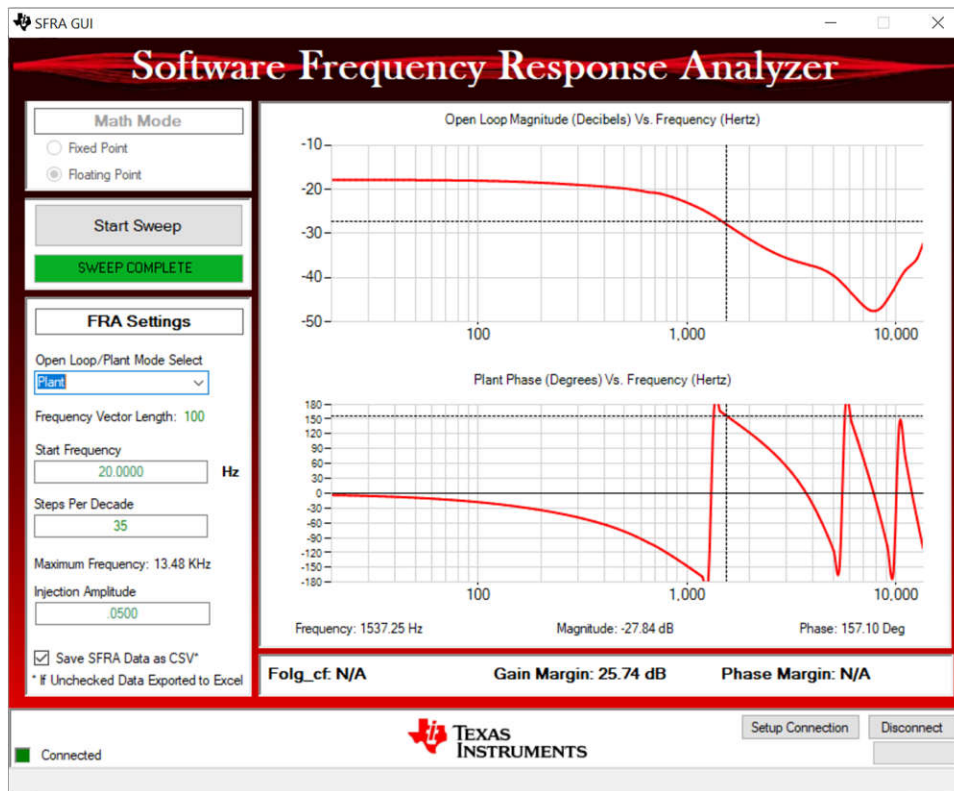



图 3-23. 电压控制开环频率响应

3.4.5 实验 4. 闭合电流和电压控制

3.4.5.1 设置实验 4 的软件选项

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 如节 3.2.1 中所述打开 CCS 工程。如果使用 powerSUITE，请转至步骤 3，否则跳至步骤 4。
3. 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 4: Closed-Loop CCCV Dual Phase*。
 - 对于双相运行，将 *Phase Enabled* 更改为 0。
 - 将“SFRA Enable/Disable”设置为 1。
 - 通过点击 *Run Compensation Design* 按钮打开补偿设计器 。
 - 然后，补偿设计器启动并提示用户选择有效的 SFRA 数据文件。将实验 1 中运行的 SFRA 数据导入补偿设计器来设计双极点、双零点补偿器。在此迭代设计过程中保持更大的裕度，以确保环路闭合时，系统是稳定的。
 - 图 3-24 显示了电压环路的补偿参数。
 - 点击 *Save Comp* 按钮以保存补偿。关闭 *补偿设计器* 工具。
 - 保存 SYSCONFIG 页面。
4. 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 *solution_settings.h* 文件中修改 *Build Settings*。补偿设计器位于 `C2000Ware_DigitalPower_Install_Location\powerSUITE\source\utils`

```
#define LAB_NUMBER (4)
#define PHASE_NUMBER (0)
#define SFRA_ENABLED (true)
```

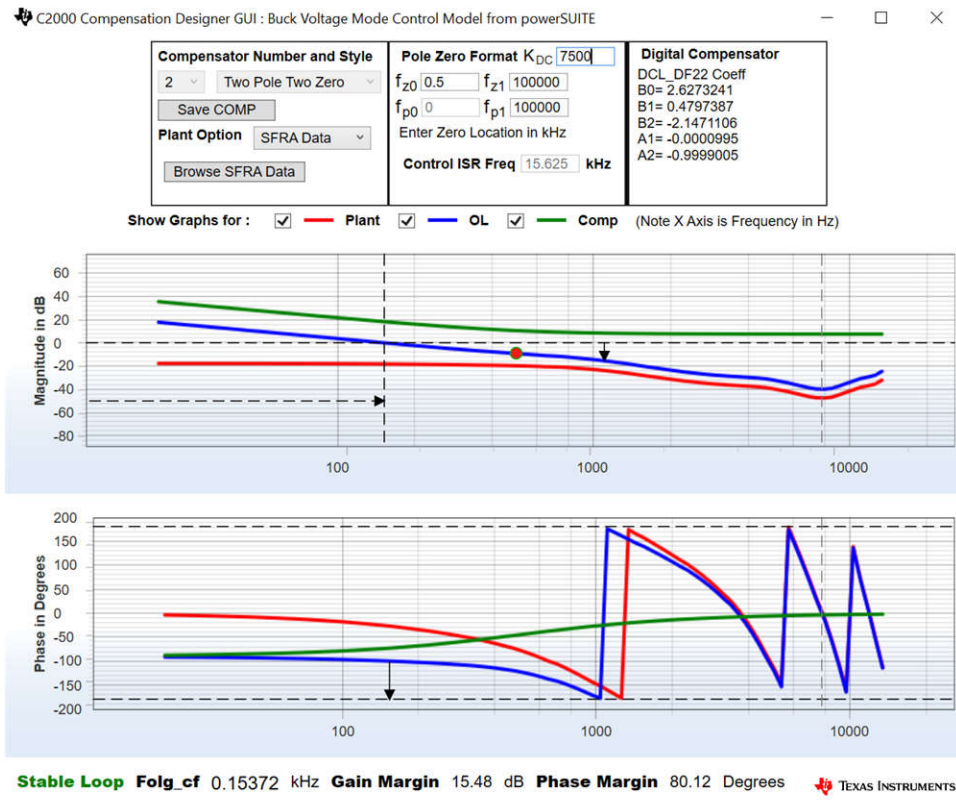




图 3-24. 使用补偿设计器对电压环路进行调优

3.4.5.2 生成和加载工程以及设置调试环境

1. 右键点击工程名称，然后点击 *Rebuild Project*。
2. 工程成功构建。
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*。
4. 然后，点击 *Run* → *Debug* 以启动调试会话。
5. 然后工程加载到器件上，同时 *CCS* 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。
6. 要在观察/表达窗口中添加变量，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*，然后浏览到位于工程文件夹内的 *setupdebugenv_lab4.js* 脚本文件。这将在观察窗口中填入调试系统所需的合适变量。
7. 点击观察窗口中的 *Continuous Refresh* 按钮 ，以持续更新控制器中的值。

3.4.5.3 运行代码

1. 使用节 3.3.1 中所示的测试设置。
2. 通过点击菜单栏中的  运行工程。
3. 在监视视图中，检查 *Expression Window* 中 *BT2PH_InputVoltageSense_V* 是否介于 12V 至 15V 之间。
4. 从 *Expression Window* 中设置以下参数：
 - 将 *BT2PH_enableRelay_bool* 设置为 1 以启用输出继电器。
 - *BT2PH_userParam_V_I_chm->ioref_A* = 30.0。
 - *BT2PH_userParam_V_I_chm->vrefCharge_V* = 0.12。
 - 设置 *BT2PH_userParam_V_I_ch1->en_bool* = 1。
 - 有关 *Expression Window* 设置，请参阅图 3-25。
5. *BT2PH_measureMultiphase_V_I* 变量显示直流/直流转换器的输出电流和电压。*Vbatsense_V* 显示值接近 *vrefCharge_V*，误差为 $\pm 0.5\text{mV}$ 。
6. 图 3-26 显示了用于测量闭环电压控制频率响应的 *SFRA* 设置。
7. 点击 *SysConfig* 页面中的 *Run SFRA* 图标。此时将弹出 *SFRA GUI*

8. 在 SFRA GUI 上选择器件对应的各个选项；例如，对于 F280039，请选择浮点。点击 **Setup Connection** 按钮。在弹出窗口中，取消选中“boot-on-connect”选项，然后选择合适的 COM 端口。点击“Ok”。返回到 SFRA GUI，然后选择 **Connect** 按钮。
9. SFRA GUI 将连接到器件中。现在可以通过点击 **Start Sweep** 按钮启动 SFRA 扫描。完成完整的 SFRA 扫描需要几分钟的时间。完成之后，即显示包含测量值的图形，如图 3-27 所示。
10. 频率响应数据保存在工程文件夹的 SFRA 数据文件夹下，并使用 SFRA 运行的时间添加时间戳。

| Expression | Type | Value |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| BT2PH_labNumber | enum <unnamed> | Lab4_ClosedLoopDualPh... |
| BT2PH_SfraStatus | enum <unnamed> | SFRA_Enabled |
| BT2PH_CalibrationStatus | enum <unnamed> | Calibration_Disabled |
| BT2PH_CalibrationMode | enum <unnamed> | 0 |
| BT2PH_InputVoltageSense_V | float | 12.3132324 |
| BT2PH_enableRelay_bool | unsigned int | 1 |
| BT2PH_userParam_V_I_chm | struct <unnamed> | {iref_A=30.0,vrefCharge_... |
| iref_A | float | 30.0 |
| vrefCharge_V | float | 0.119999997 |
| vrefDischarge_V | float | 2.79999995 |
| dir_bool | unsigned int | 1 |
| en_bool | unsigned int | 1 |
| dutyRef_pu | float | 0.00999999978 |
| ibatCal_pu | float | 0.0 |
| vbatCal_pu | float | 0.0 |
| ioutGain_pu | float | 0.00927747134 |
| ioutOffset_pu | float | 0.000643853913 |
| ioutGain_A | float | 107.787994 |
| ioutOffset_A | float | -0.0693997219 |
| vbatGain_pu | float | 0.167084396 |
| vbatOffset_pu | float | 0.000334143639 |
| vbatGain_V | float | 5.98499918 |
| vbatOffset_V | float | -0.00199984945 |
| BT2PH_measureMultiphase_V_I | struct <unnamed> | {lsense1_A=8.51648712,l... |
| lsense1_A | float | 8.51335526 |
| lsense2_A | float | 8.53360748 |
| lbatsense_A | float | 17.0511131 |
| Voutsense_V | float | 0.0 |
| Vbatsense_V | float | 0.12000452 |

图 3-25. 实验 4 表达式窗口，闭环

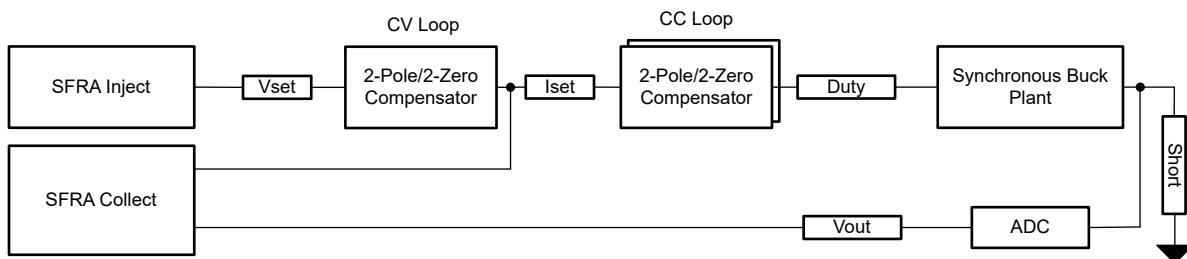


图 3-26. 用于闭环电压控制的 SFRA 设置

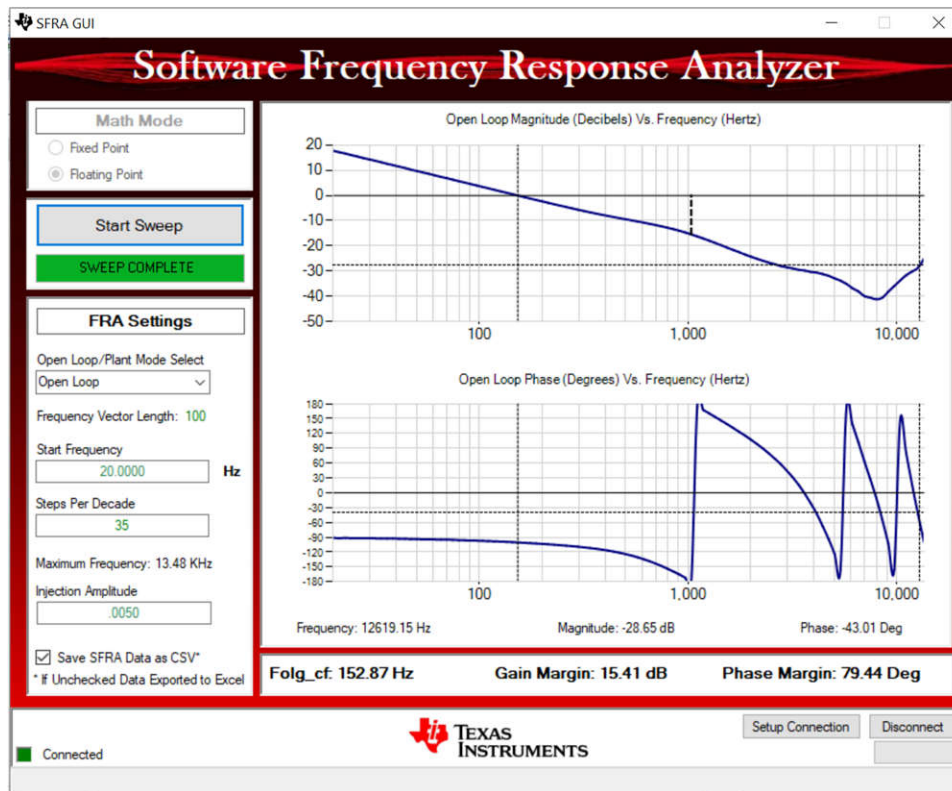


图 3-27. 电压控制闭环频率响应

3.4.5.4 电压校准

- 要运行该实验，请确保按节 3.3.3 所示设置硬件。可以在校准期间关闭电子负载，或者将电子负载电流设置为小于 I_{ref_A} ，以确保电路处于恒压模式。2 点校准方法用于校准增益和偏移量误差。
- 要测量电压，请使用 DMM。
- 打开 SYSCONFIG 页面并在 *Build Options* 部分下选择：
 - 对于“Lab”，选择 *Lab 4: Closed-Loop CCCV Dual Phase*。
 - 对于双相模式，将 *Phase Enabled* 更改为 0。
 - 将 *Calibration Mode* 设置为 2 以进行电压校准。
 - 保存 SYSCONFIG 页面，并运行代码。
 - 打开 *Expression Window*。
 - 使用 `BT2PH_userParam_V_I_chm->ibatCal_pu` 参数更新输出电流。
 - 将 `BT2PH_enableRelay_bool` 设置为 1 以启用输出继电器。
 - 设置 `BT2PH_userParam_V_I_chm->en_bool = 1`。
 - 将 `BT2PH_userParam_V_I_chm->vbatCal_pu` 设置为“0.2”和“0.6”，并记下输出电压读数。
 - 在 `bt2ph_cal.h` 文件中更新实际输出电压读数。

```
#define BT2PH_VBAT_ACTUAL_CH1_P1_V ((float32_t)1.1995)
```

```
#define BT2PH_VBAT_ACTUAL_CH1_P2_V ((float32_t)3.599)
```

- 将 *Calibration Mode* 设置为 0 以禁用校准。

- 当使用非 powerSuite 版本的工程时，直接在 `solution_settings.h` 文件中修改 *Build Settings*：

```
#define LAB_NUMBER (4)
```

```
#define PHASE_NUMBER (0)
```

```
#define CALIBRATION_ENABLED (true)
```

```
#define CALIBRATION_MODE (2)
```

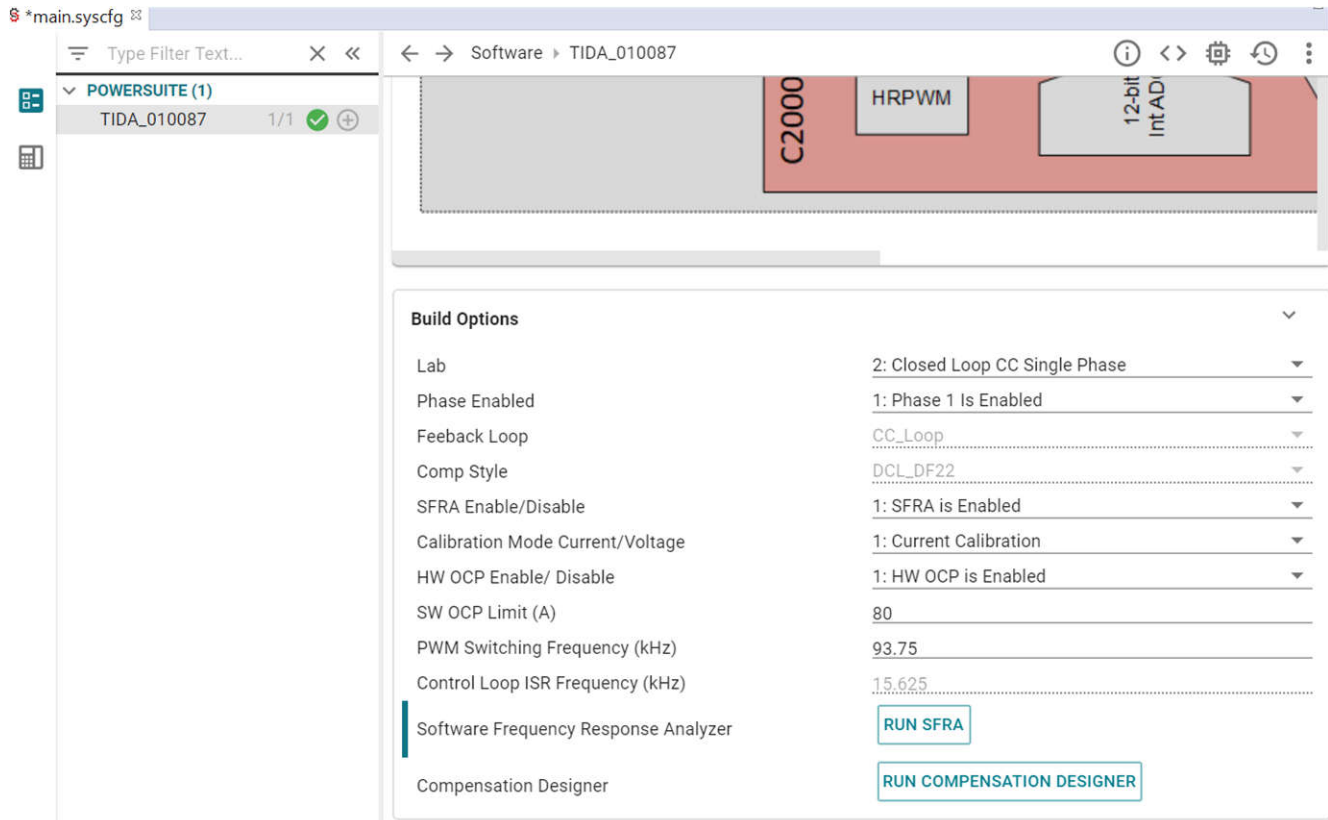


图 3-28. 电流校准的构建选项

3.5 测试结果

3.5.1 电流环路负载调节误差

表 3-2. 充电模式下的电流环路负载调节误差

| FSR (A) | 100 | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| TIDA_010087 ISET (A) | 0.1 | 0.5 | 1 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 39 |
| 电子负载 CV 模式 | 电子负载读数 | | | | | | | | |
| VSET (V) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) | lactual (A) |
| 1 | 0.118 | 0.516 | 1.015 | 5.011 | 10.006 | 19.996 | 25.004 | 30.006 | 39.009 |
| 2 | 0.117 | 0.514 | 1.015 | 5.012 | 10.009 | 20.004 | 25.003 | 30.005 | 39.006 |
| 3 | 0.115 | 0.513 | 1.012 | 5.01 | 10.007 | 20.003 | 25.002 | 30.003 | 39.004 |
| 4.2 | 0.112 | 0.51 | 1.01 | 5.008 | 10.005 | 20.001 | 25 | 30.001 | 39.001 |
| 误差 (mA) | 0.018 | 0.016 | 0.015 | 0.012 | 0.009 | 0.004 | 0.004 | 0.006 | 0.009 |
| 误差 (% FSR) | 0.018 | 0.016 | 0.015 | 0.012 | 0.009 | 0.004 | 0.004 | 0.006 | 0.009 |

3.5.2 电压环路负载调节误差

表 3-3. 充电模式下的电压环路负载调节误差

| 满量程 (V) | 6.25 | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| TIDA_010087 VSET (V) | 1 | 2 | 3 | 4.2 |
| 电子负载 CC 模式 | | | | |
| ISET (A) | Vactual (V) | Vactual (V) | Vactual (V) | Vactual (V) |
| 1 | 1.00012 | 2.00038 | 3.0002 | 4.2 |

表 3-3. 充电模式下的电压环路负载调节误差 (continued)

| | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 10 | 1.00013 | 2.00039 | 3.00022 | 4.20002 |
| 20 | 1.00018 | 2.00035 | 3.00018 | 4.2 |
| 30 | 1.00012 | 2.00037 | 3.0002 | 4.19998 |
| 误差 (mV) | 0.00018 | 0.00039 | 0.00022 | 2E-05 |
| 误差 (% FSR) | 0.00288 | 0.00624 | 0.00352 | 0.00032 |

3.5.3 无负载时的电压转换

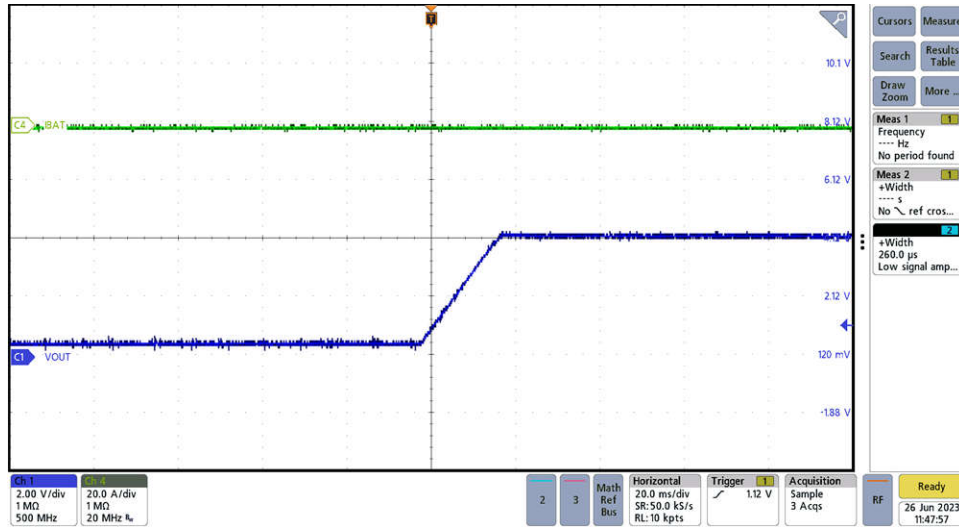


图 3-29. 无负载时的电压转换

3.5.4 启动时的瞬态响应

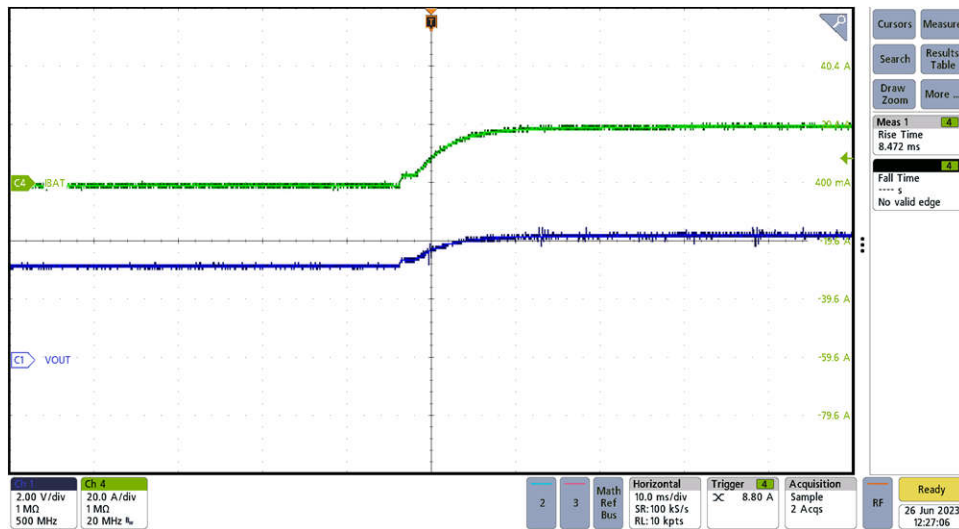


图 3-30. 启动时的瞬态响应

3.5.5 双向电流开关时间

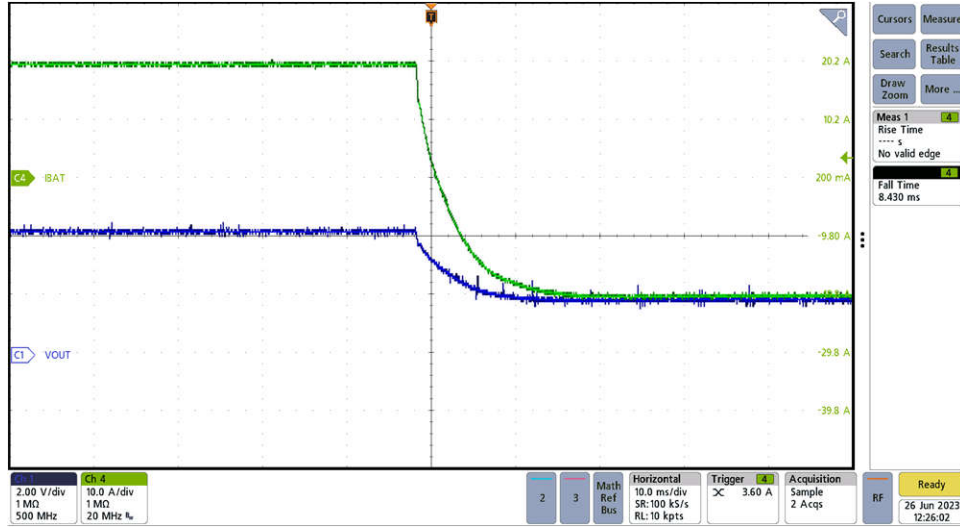


图 3-31. 电流转换，充电至放电模式

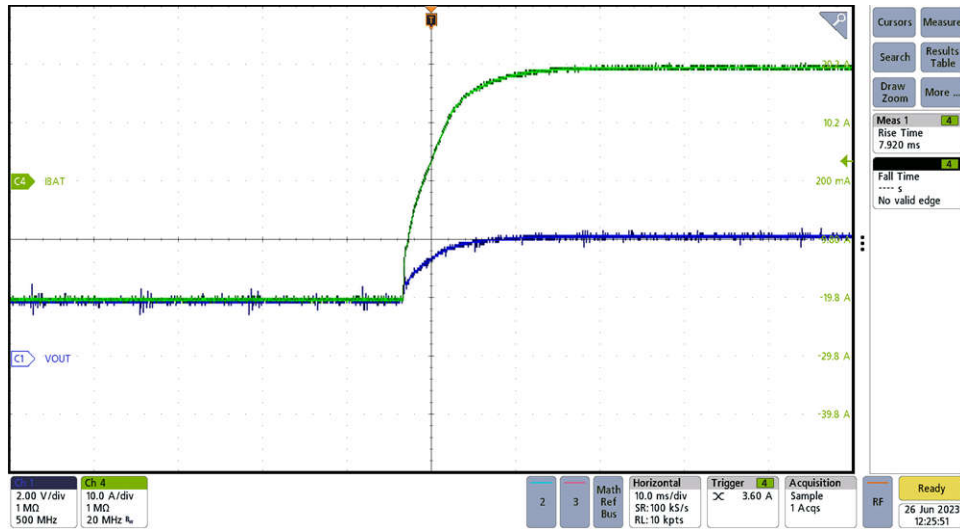


图 3-32. 电流转换，放电至充电模式

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010087](#) 中的设计文件。

4.1.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010087](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

[TMDSCNCD280039C](#)

F280039C controlCARD 评估模块

软件

[CCSTUDIO](#)

Code Composer Studio (CCS) 集成开发环境 (IDE)

[C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#)

适用于 C2000™ MCU 的 DigitalPower 软件开发套件 (SDK)。

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TMS320F28003x 实时微控制器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[ADS131M08 8 通道、同步采样、24 位 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#) 数据表

4.4 支持资源

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

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

4.5 商标

TI E2E™ and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 关于作者

SHAURY ANAND 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向测试和测量应用的参考设计。Shaury 拥有印度理工学院鲁尔基分校电气工程学士学位 (技术学士)。

作者感谢 VICTOR SALOMON 和 OZINO ODHARO 对本参考设计提供的大力支持。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司