



Minghan Dong, Aki Li, Chen Jiang, and Shamim Choudhury

## 摘要

本应用报告提出了 4 类 ePWM 模块的适用配置 ( 包含的器件 : 2807x、2837xD、2837xS、28004x、28002x、2838x ) 以实施升压 PFC 拓扑的 CRM/ZVS 开关。它呈现了采用 TI 的 C2000™ 微控制器 4 类 ePWM 的 CRM/ZVS 升压 PFC 的实施细节, 包括寄存器配置和系统方框图演示。F28002x 控制卡用于验证固件和外设的运行。文中提供了详细的波形和测试结果以及固件实施指南。

## 内容

1 引言.....	2
2 CRM/ZVS PFC.....	2
3 基于 4 类 PWM 的 PFC CRM/ZVS 实现.....	3
4 演示代码和流程图.....	8
4.1 外设配置.....	8
4.2 解决方案代码.....	9
5 试验结果.....	10
6 总结.....	11
7 参考文献.....	11

## 插图清单

图 2-1. 升压 PFC 拓扑.....	2
图 2-2. CRM/ZVS 状态下的 PFC 波形 : $V_{in} > V_{out}/2$ .....	2
图 2-3. CRM/ZVS 状态下的 PFC 波形 : $V_{in} < V_{out}/2$ .....	3
图 3-1. 信号流程图.....	3
图 3-2. C2000 MCU CMPSS 方框图.....	3
图 3-3. X-BAR 和 ePWM 直流模块接口.....	4
图 3-4. 直流子模块中的边沿滤波器和捕捉控制逻辑.....	5
图 3-5. CRM/ZVS PFC 中使用的事件触发块.....	5
图 3-6. CRM/ZVS PFC 中使用的时基子模块.....	6
图 3-7. CRM PFC 4 类 PWM 实施中的信号波形.....	7
图 4-1. CRM/ZVS 实现代码的流程图.....	8
图 5-1. 测试原型.....	10
图 5-2. 160kHz 电感器电流信号 : ePWM1 输出波形和 DCCAP 捕捉的值.....	10
图 5-3. 200kHz 电感器电流信号 : ePWM1 输出波形和 DCCAP 捕捉的值.....	11

## 商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

提高电源转换效率是近几年的一个重要话题。关于这一方面，业界提出了许多拓扑和方法来减少功率器件中的传导损耗和开关损耗。CRM 和 ZVS 技术是提高效率和降低功率器件损耗的关键软开关技术。

数字控制的 PFC 转换器如图 2-1 所示。对于重 PFC 负载，电感器电流  $i_L$  可以是连续导电模式 (CCM)。而在轻负载下，电流可能变得不连续 (DCM)。在 DCM 运行期间，升压电感器 L 与 PFC MOSFET 输出电容  $C_{ds}$  自由谐振。数字 PFC 设计人员可使用外部组件和内部算法检测 MOSFET  $V_{ds}$  的逐周期 ZVS 或 CRM 位置。C2000 4 类 PWM 提供内部硬件来实现 MCU 带宽利用率减小而且不使用这些外部组件的 CRM/ZVS PFC。

## 2 CRM/ZVS PFC

图 2-1 显示传统的升压 PFC 拓扑。电感器电流  $i_L$  可维持临界导电模式 (CRM)。当电感器电流不连续时，MOSFET 的  $V_{ds}$  电压可谐振至零伏，从而产生 ZVS 开关瞬间。图 2 显示 CRM/ZVS 状态下的 PWM 信号、MOSFET 的  $V_{ds}$  和电感器电流波形。

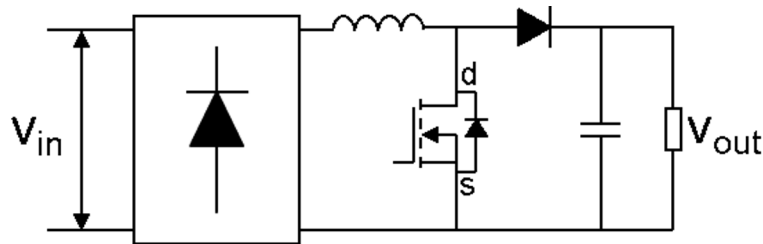


图 2-1. 升压 PFC 拓扑

如果交流输入电压高于直流总线电压的一半，MOSFET 应在电压达到谷点时将其接通以实现 ZCS(CRM)。MOSFET  $V_{ds}$  从不会谐振至零伏，如图 2-2 中所示。但是，当交流输入电压低于输出电压的 1/2 时，MOSFET 的  $V_{ds}$  可谐振至零伏，且被 MOSFET 体二极管钳制。MOSFET 可在这种状态下实现 ZVS 和 ZCS，如图 2-3 中所示。

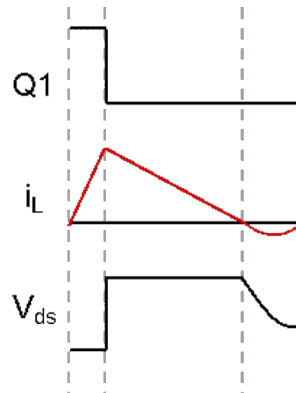


图 2-2. CRM/ZVS 状态下的 PFC 波形： $V_{in} > V_{out}/2$

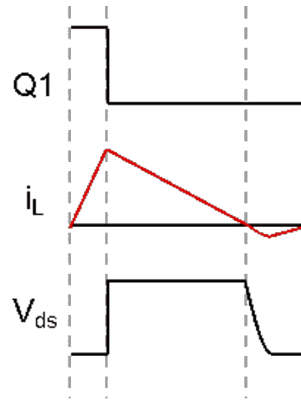


图 2-3. CRM/ZVS 状态下的 PFC 波形 :  $V_{in} < V_{out}/2$

传统的预测周期方法需要快速计算并消耗显著的 CPU 带宽。使用额外的资源计算升压电感器电流  $i_L$  从峰值回归到零的谐振时间和持续时间。本报告提出了一种基于 MCU 内部硬件的方法，通过利用 C2000 MCU 外设实现 CRM/ZVS PFC 控制。这些内部外设包括 CMPSS、横杆 (X-BAR) 和 4 类 PWM。

### 3 基于 4 类 PWM 的 PFC CRM/ZVS 实现

图 3-1 显示从外部 PFC 功率级硬件到 C2000 内部外设的信号接口，该接口用于生成 PWM 信号。本报告以 CMPSS5、X-BAR(TRIP5)、ePWM1 为例介绍了通过 4 类 PWM 实现 CRM/ZVS PFC 的过程。

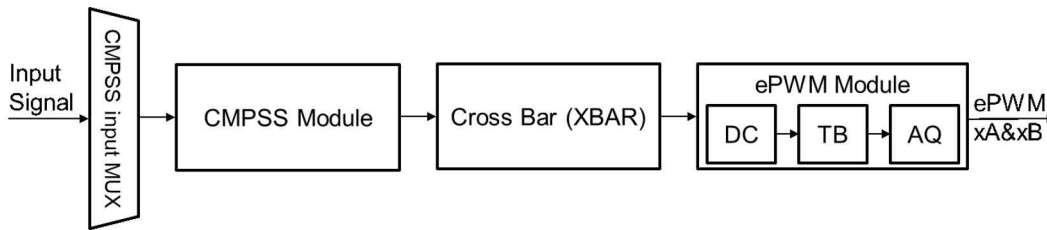


图 3-1. 信号流程图

图 3-1 中的输入信号是 PFC 电感器电流  $i_L$ 。选择此信号作为 CMPSS 模块的 COMPH 正极引脚的输入，详情参见图 3-2。捕捉电流过零 (ZC) 的阈值是接近零的固定值，应用于 DACHVALS (阴影寄存器 DAC 值)。电流 ZC 阈值通过参考 DAC 设置为 COMPH 的负输入。选择比较器的反相输出作为 CTRIPH 并异步连接到 X-BAR。

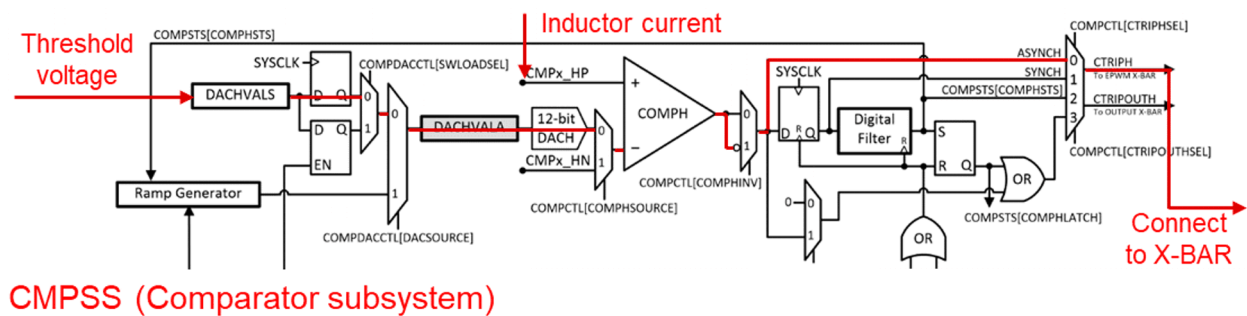


图 3-2. C2000 MCU CMPSS 方框图

CMPSS5 CTRIPH 信号连接到 X-BAR TRIP5 mux8, 如图 3-3 中所示。若要使任何信号直达 ePWM, 请启用 TRIP5MUXENABLE 寄存器中的 mux8。CMPSS 输出通过 ePWM X-BAR 输送到 ePWM 直流子模块。TRIP5 指电感器电流负过零 (NZC) 事件, 通过设置 DCAHTRIPSEL 生成 DCAH 信号。请注意, 正过零事件是按消隐窗口过滤的, 如图 3-7 所示。然后, TZDCSEL 寄存器的配置限定对选定 DCAH 信号的操作, 该信号生成 DCAEVT1 事件。然后, 通过配置 DCACTL 过滤 DCAEVT1 事件以提供有过滤版本的事件信号的 DCAEVT1.sync。然后 DCAEVT1.sync 生成一个同步脉冲, 发给时基计数器。

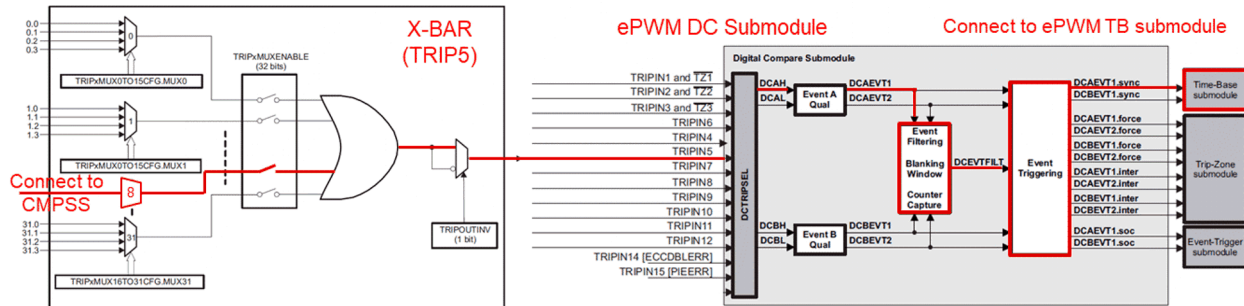


图 3-3. X-BAR 和 ePWM 直流模块接口

图 3-4 详细展示了事件过滤逻辑块, 这对于实现 ZVS/ZCS 至关重要。事件过滤块可捕捉跳闸事件的 TBCTR 值以提供有 PWM 周期的控制算法并将周期值存储在 DCCAP 寄存器。消隐逻辑用于在生成正确的同步信号前筛除信号上的潜在噪声和电感器电流正过零 (PZC) 事件。图 3-4 所示为事件过滤逻辑模块中的信号流。选择 DCAEVT1 事件作为带有消隐窗口 (消隐控制逻辑) 的事件过滤逻辑块 (DCFCTL[SRGSEL]) 的输入。这时, 比较器输出被选为事件过滤逻辑块的输入。消隐窗口与 DCAEVT1 进行与运算。选择软件触发源作为重置并重新启动边沿滤波器 (VCAPCTL[TRIGSEL]) 的事件。最后, 根据硬件参数配置 VCAPCTL [EDGEFILTDLYSEL] 以应用延迟 (SWVDELVAL 中的软件编程值)。现在, DCCAP 可以捕捉与电感器电流负过零相关的事件的 TBCTR 值。该 TBCTR 值表示当前 PWM 开关循环的周期。

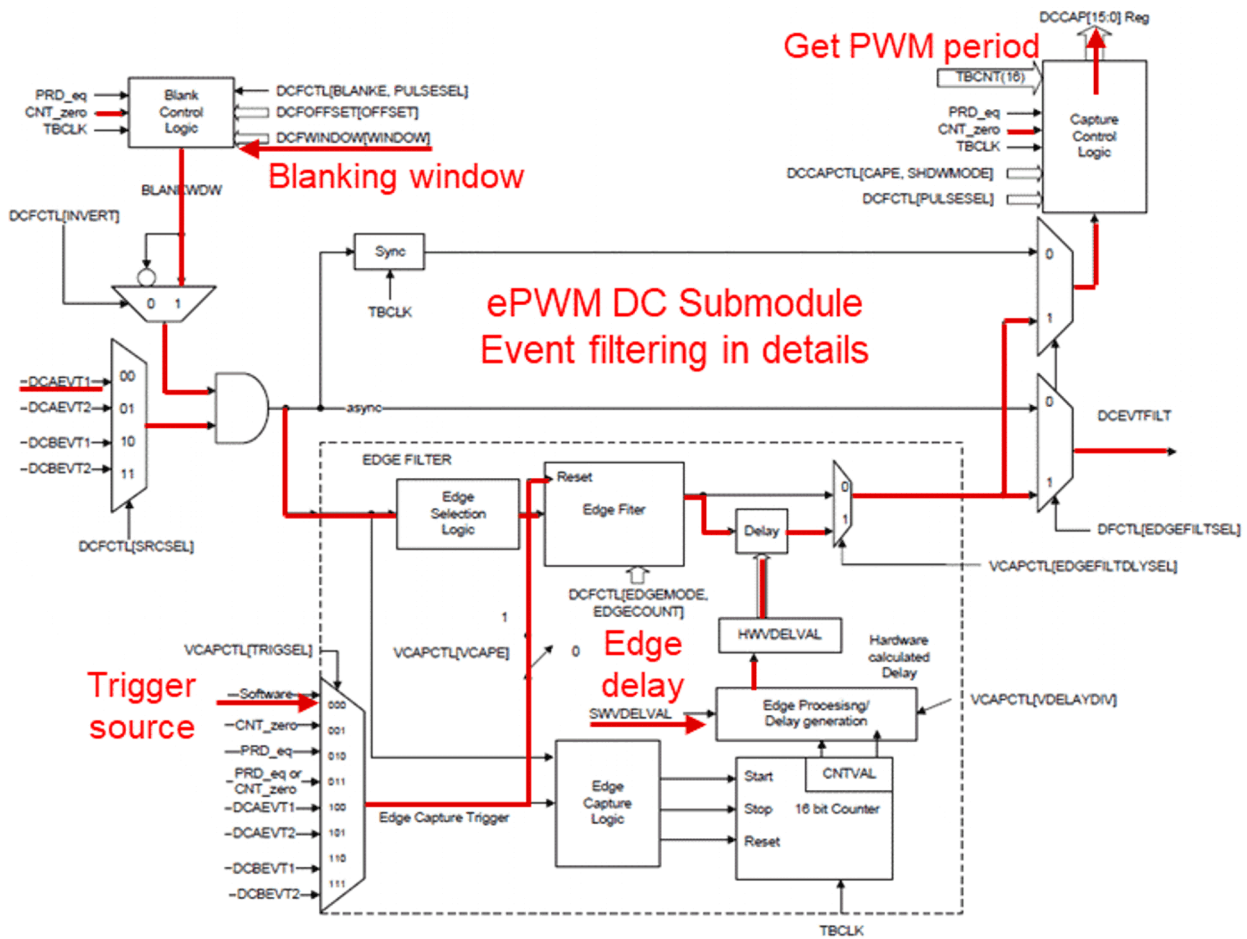


图 3-4. 直流子模块中的边沿滤波器和捕捉控制逻辑

最后，通过设置事件触发块的 `DCACTL[EVT1SYNCE]` 启用 `DCAEVT1.sync` (如图 3-5 中所示)，并通过设置时基子模块的 `TBCTL[PHSEN]` 启用相移以同步 `TBCTR` (如图 3-6 中所示)。

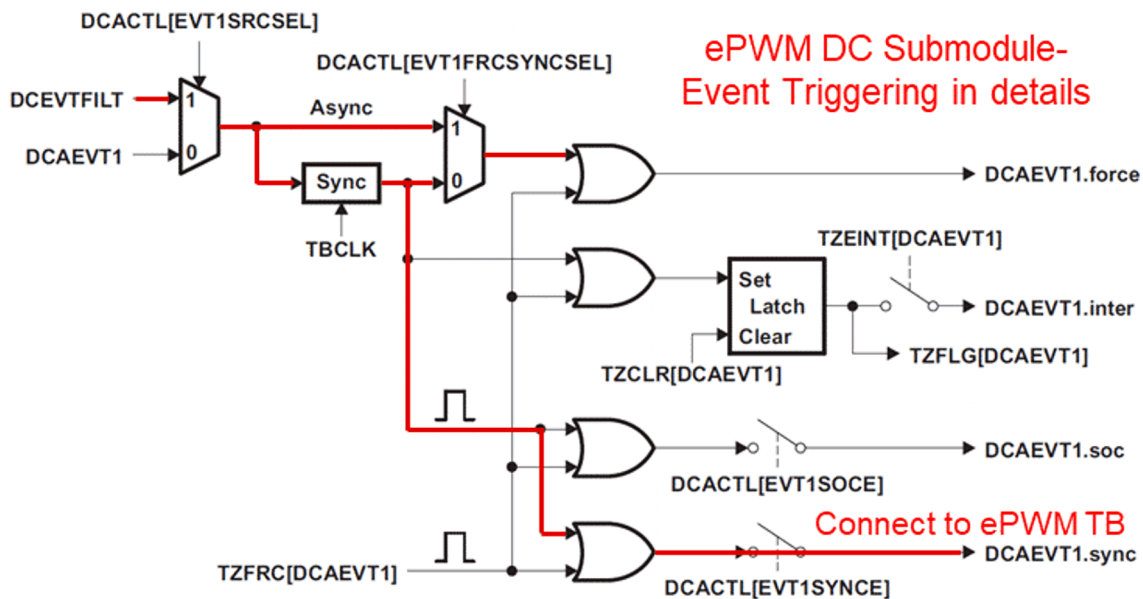


图 3-5. CRM/ZVS PFC 中使用的事件触发块

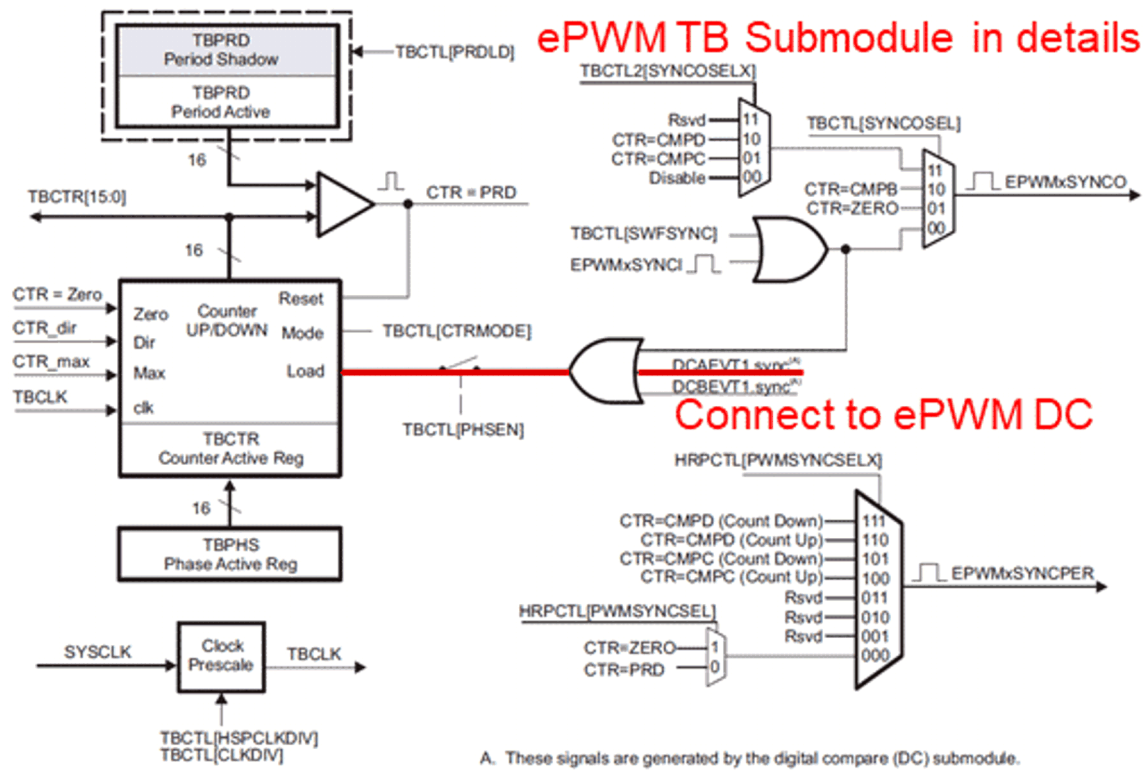


图 3-6. CRM/ZVS PFC 中使用的时基子模块

图 3-7 显示外设配置后的主要信号波形。DCAEVT1 信号的上升沿和下降沿代表基于图 3-7 的相应正负过零点。消隐窗口与 DCAEVT1 进行与运算，以生成 DCEVTFILT，以便在 MOSFET 导通时间内筛除电感器电流正过零 (PZC) 边沿和噪声。这样，消隐窗口长度应该比 PWM 导通时间长。直流子模块应用对应电感器负过零 (NZC) 边沿的延迟来生成同步事件。

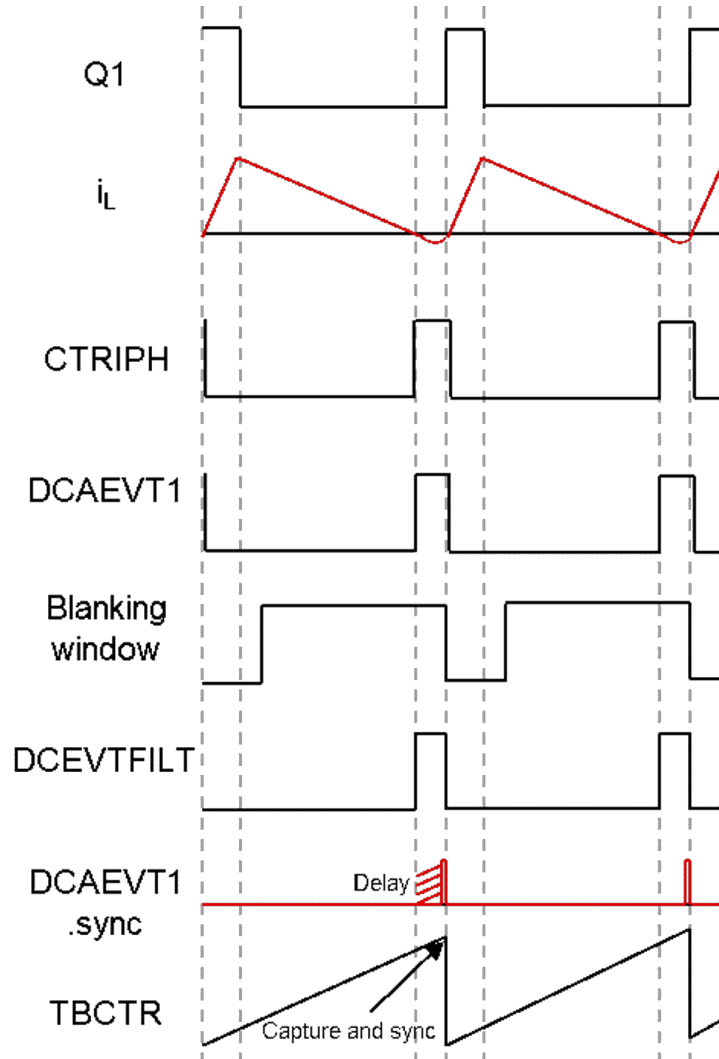


图 3-7. CRM PFC 4 类 PWM 实施中的信号波形

## 4 演示代码和流程图

实现过程的流程图如图 4-1 所示。CMPSS、X-BAR 和 ePWM 是在起始状态配置的。

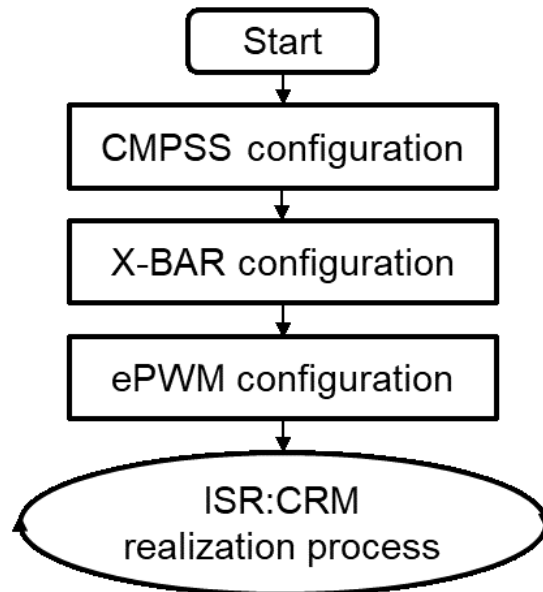


图 4-1. CRM/ZVS 实现代码的流程图

### 4.1 外设配置

```

//-----
// CMPSS5H 捕捉 ZVS (电感器电流 NZC)
//-----
//设置 CMPSS 5 的模拟输入, 将电感器电流信号连接到 CMPSS5
ASysCtl_selectCMPHPMux(ASYSCCTL_CMPHPMUX_SELECT_5, 2);
// 在本地启动比较器
CMPSS_enableModule(base5);
// 将反相输入连接到内部 DAC。反相 CMPH 输出。
CMPSS_configHighComparator(base5, CMPSS_INSRD_DAC|CMPSS_INV_INVERTED);
// 设置 DAC 输出
CMPSS_setDACValueHigh(base5, (int16_t)(iL_limit));
// DACHVALA 从 DACHVALS 更新 (无内坡道)
CMPSS_configDAC(base5, CMPSS_DACSRC_SHDW);
// 输出 = 异步比较器输出 (反相输出)
CMPSS_configOutputsHigh(base5, CMPSS_TRIP_ASYNC_COMP);
// Xbar 设置
//-----
// CMPSS5H - ZVS (电感器电流 NZC)
//-----
XBAR_setEPWMmuxConfig(XBAR_TRIP5, ZVS_CAPTURE_XBAR_MUX_CONFIG);
XBAR_enableEPWMmux(XBAR_TRIP5, ZVS_CAPTURE_XBAR_MUX);
//初始化期间清除 XBAR 标记
XBAR_clearInputFlag(XBAR_INPUT_FLG_CMPSS2_CTRIPH);
//*****
// 为开关频率和谷底开关配置 PWM1A。
//*****
// ZVS (电感器电流 NZC) 相关的寄存器设置由此开始
// 选择 DCAEVT1 事件之一作为事件过滤逻辑块的输入
EPWM_setDigitalCompareFilterInput(base1, EPWM_DC_WINDOW_SOURCE_DCAEVT1);
// 选择边沿滤波器
EPWM_enableDigitalCompareEdgeFilter(base1);
// 选择边沿模式
EPWM_setDigitalCompareEdgeFilterMode(base1, EPWM_DC_EDGEFILT_MODE_BOTH);
// 选择边沿计数
EPWM_setDigitalCompareEdgeFilterEdgeCount(base1, 1);
//软件触发器 (在 ISR 中触发)
EPWM_setValleyTriggerSource(base1, EPWM_VALLEY_TRIGGER_EVENT_SOFTWARE);
//启用谷底捕捉
EPWM_enableValleyCapture(base1);
//应用 DELAY
EPWM_enableValleyHWDelay(base1);
    
```



```

//SW DELAY 持续时间
EPWM_setValleySWDelayValue(base1, SWDELAY);
// DCAH = 比较器 5 输出 = TRIP5in
EPWM_selectDigitalCompareTripInput(base1, EPWM_DC_TRIP_TRIPIN5, EPWM_DC_TYPE_DCAH);
//DCAH = 高 (边沿滤波器生成 1 TBCLK 宽脉冲)
EPWM_setTripZoneDigitalCompareEventCondition(base1, EPWM_TZ_DC_OUTPUT_A1,
                                                EPWM_TZ_EVENT_DCXH_HIGH);

//源已过滤 DCAEVT1
EPWM_setDigitalCompareEventSource(base1, EPWM_DC_MODULE_A, EPWM_DC_EVENT_1,
                                   EPWM_DC_EVENT_SOURCE_FILT_SIGNAL);

//异步
EPWM_setDigitalCompareEventSyncMode(base1, EPWM_DC_MODULE_A, EPWM_DC_EVENT_1,
                                    EPWM_DC_EVENT_INPUT_NOT_SYNCED);

//使用消隐窗口过滤 PZC 边沿和噪声
EPWM_enableDigitalCompareBlankingWindow(base1);
EPWM_setDigitalCompareBlankingEvent(base1, EPWM_DC_WINDOW_START_TBCTR_ZERO);
// 消隐窗口偏移 = CMPA(n+1)
EPWM_setDigitalCompareWindowOffset(base1, 1);
// 消隐窗口长度
EPWM_setDigitalCompareWindowLength(base1, MIN_PERIOD);
// 启用时基计数器捕捉
EPWM_enableDigitalCompareCounterCapture(base1);
//zvs 代码到此结束

```

## 4.2 解决方案代码

以下代码置于 ePWM1 ISR 中，因为 ePWM1 提供 PFC MOSFET 的驱动信号。ePWM1 ISR 每当 TB 计数器为 0 时发生。

```

//设置位 1 (VCAPSTART)，边沿滤波器的软件触发源
EPWM_startValleyCapture(EPWM1_BASE);
//DCCAP
capturedPeriod = EPWM_getDigitalCompareCaptureCount(EPWM1_BASE);
// blankingWindowLength=50~70 ticks margin + duty*DCCAP (MOSFET on-time)
blankingWindowLength = blankingBsuffer+ePwm1Cmpb;
EPWM_setDigitalCompareWindowLength(EPWM1_BASE, blankingWindowLength);

```

## 5 试验结果

为验证 CRM 实施，设置基于 TMDSCNCD280049C 的原型，如图 5-1 所示。在图 5-2 和图 5-3 中，显示了某些测试结果以验证基于 4 类 PWM 的 ZVS PFC 实施。电感器电流信号频率分别为 160kHz 和 200kHz。PWM 能够与电感器电流 NZC 事件同步，DCCAP 可捕捉正确的 PWM 周期，如结果中所示。

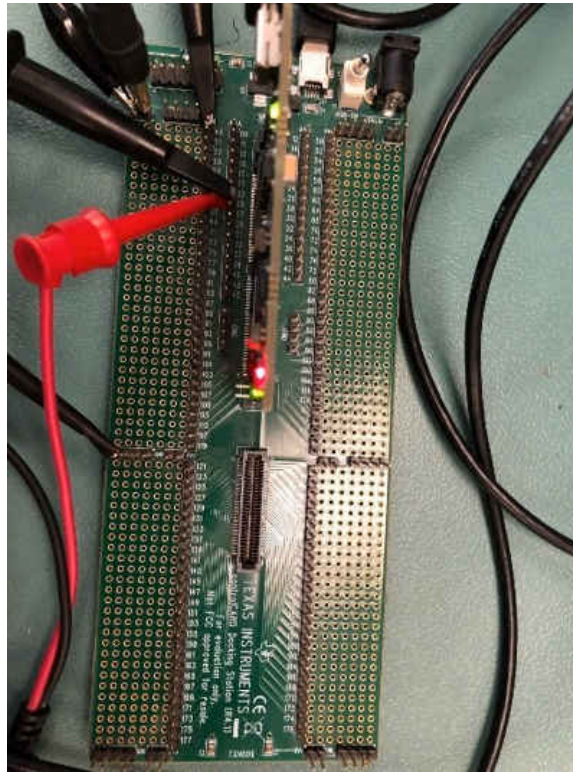
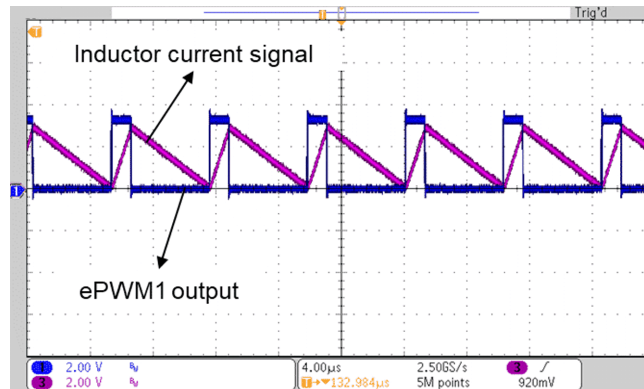
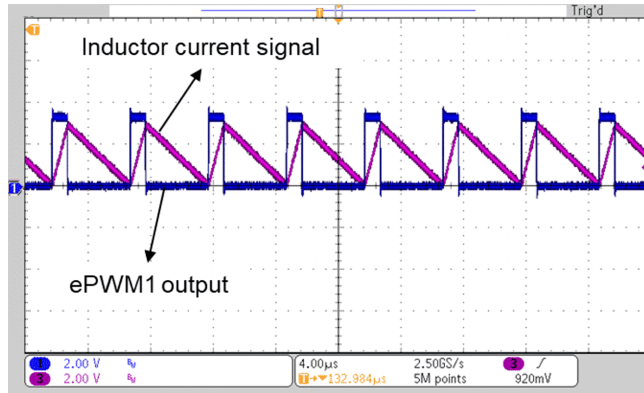


图 5-1. 测试原型



vds_in	tfloat	100.0	0x0000803b@L
blankingWindowLength	long	300	0x0000805C@L
EPwm1Regs.DCCAP	Register	622 (Decimal)	
ePwm1Cmpc	long	622	0x0000805A@L
EPwm1Regs.DCFWINDOW	Register	300 (Decimal)	
EPwm1Regs.DCFOFFSET	Register	1 (Decimal)	

图 5-2. 160kHz 电感器电流信号：ePWM1 输出波形和 DCCAP 捕捉的值



blinkingWindowLength	long	300
EPwm1Regs.DCCAP	Register	497 (Decimal)
ePwm1Cmpc	long	498
EPwm1Regs.DCFWINDOW	Register	300 (Decimal)
EPwm1Regs.DCFOFFSET	Register	1 (Decimal)

图 5-3. 200kHz 电感器电流信号：ePWM1 输出波形和 DCCAP 捕捉的值

## 6 总结

本文介绍了 CRM/ZVS PFC 技术和 C2000 4 类 PWM 模块的配置，以实现这种软开关技术。它提出了一种不使用任何复杂的外部逻辑电路的升压 PFC 转换器数字控制优化技术。提议的优化方法利用 C2000 MCU 的内部可编程数字比较块以实现用于 PFC 的 CRM/ZVS 开关。提议的方法是使用德州仪器 (TI) TMDSCNCD280049C MCU 进行验证的。

## 7 参考文献

- 使用 ZVS 和谷底开关在轻负载下提升 PFC 效率和降低 THD
- 德州仪器 (TI)：集成谷底开关控制功能的数控 PFC 转换器的轻负载 THD 和效率优化
- 采用简单的零电流检测并在 DCM/CCM 边界运行全程 ZVS 的图腾柱升压无桥 PFC 整流器
- 德州仪器 (TI)：《TMS320F28004x 微控制器技术参考手册》

## 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