

Application Note

带数字控制器的图腾柱 PFC 优化控制方案



Aki Li

摘要

在不同的 PFC 拓扑中，图腾柱 PFC 因为能够在无桥 PFC 拓扑中达到最高的效率，因此受到更多的关注。由于支持边界条件需要更复杂的方案和特殊要求，因此常见的做法是为图腾柱 PFC 使用数字控制器。本应用手册讨论了几种控制方案，可基于 C2000 实时 MCU 优化图腾柱 PFC 性能，从而实现更可靠和更灵活的系统设计。

内容

1 优化的 ePWM 配置.....	2
1.1 逐周期 (CBC) 保护.....	2
1.2 反向电流控制.....	4
1.3 建议的 ePWM 配置.....	4
2 如何更好地使用适用于图腾柱 PFC 的 CMPSS.....	6
3 如何控制低频 MOSFET.....	7
4 如何实施可靠的过零检测.....	8
5 如何实施两相交错控制.....	9
6 参考资料.....	9

插图清单

图 1-1. 图腾柱 PFC 结构.....	2
图 1-2. 实现传统 CBC 保护的 PWM 配置.....	2
图 1-3. 实现理想 CBC 保护的 PWM 配置.....	3
图 1-4. ePWM 子模块.....	3
图 1-5. 反向电流控制.....	4
图 1-6. 基本 ePWM 配置方框图.....	4
图 1-7. 针对 ePWMxA 和 ePWMxB 输出的动作限定器动作.....	5
图 1-8. 死区子模块方框图.....	5
图 2-1. CMPSS 配置.....	6
图 2-2. CMPSS 模块方框图.....	7
图 4-1. CMPSS 用于 Vac 检测.....	8
图 4-2. 浪涌测试期间的短路问题.....	8
图 5-1. 相位交错式图腾柱 PFC EPWM 配置.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 优化的 ePWM 配置

图 1-1 展示了一种基本图腾柱 PFC 结构。不同于升压转换器，图腾柱 PFC 的控制更为复杂。根据输入电压 VAC 极性，高频 FET Q1 和 Q2 交替用作 PFC 有源开关或同步开关，而低频 FET Q3 和 Q4 在电网频率下开关。基本控制逻辑可参考 [图腾柱 PFC 中的控制挑战](#)。在实际应用中，需要考虑当功率级进入过载、轻负载或故障状况时，如何更好地处理瞬态条件，这在建议的 PWM 配置中进行了讨论。

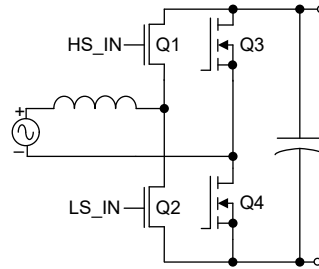


图 1-1. 图腾柱 PFC 结构

1.1 逐周期 (CBC) 保护

当 PFC 进入过载状况时，例如，在从高压线路到低压线路出现瞬态交流电压时，或发生某些故障事件时，需要通过基于 CBC 的 PWM 关断控制来实施过流保护，从而限制 PFC 电感器电流而不是关断功率级。通常情况下，在电感器电流达到过流阈值时，常见的做法是配置 Q1 和 Q2 的 PWM 输出，使其一起关断。但是，这可能会为功率级带来风险，尤其是在高温条件下。

由于反向恢复问题，不能在连续导通模式 (CCM) 图腾柱 PFC 中使用常规 MOSFET，因此 Q1 和 Q2 需要是 GaN 或 SiC FET。如“[GaN 的第三象限操作](#)”（位于 [GaN 是否具有体二极管？- 了解 GaN 的第三象限操作](#)）中所述，第三象限操作下的反向导通电压 Vsd 要高得多，电压范围为 3V 至 5V，如果反向电流更大，这个电压也会更大，这也适用于 SiC。高反向导通电压会导致过度损耗，并会给器件的热限制和系统可靠性带来问题。以正周期运行为例，如图 1-2 所示，采用传统 PWM 配置时，当高侧和低侧 FET 在过流事件中关断后，大电感电流将继续在高侧 FET 上流动，因此由于第三象限操作，导通损耗会增加，这可能会导致结温升高并导致 GaN 或 SiC 发生热损坏。

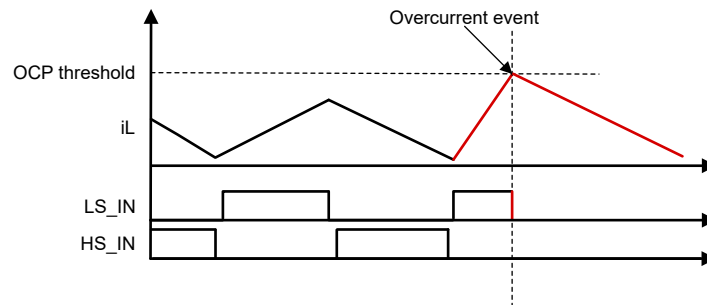


图 1-2. 实现传统 CBC 保护的 PWM 配置

因此，图 1-3 展示了 PWM 配置的理想 CBC 保护方案。同步开关的 PWM (在本例中为用于正周期的高侧 FET Q1) 应在有源开关关断后导通，并具有自定义死区时间。但是，ePWM 的传统跳闸区域 (TZ) 子模块无法用于实现上述逻辑。如图 1-4 所示，当发生逐周期跳闸事件时，会立即在 ePWMxA 和 ePWMxB 输出上执行 TZ 子模块中指定的操作，没有任何延迟，这是因为 TZ 子模块是 ePWM 输出之前的最后一部分。此外，对于图腾柱 PFC，用于有源 FET 和同步 FET 的 ePWM 输出根据 VAC 极性而有所不同，因此 TZ 子模块内设置的操作无法自动在正周期和负周期都起作用。

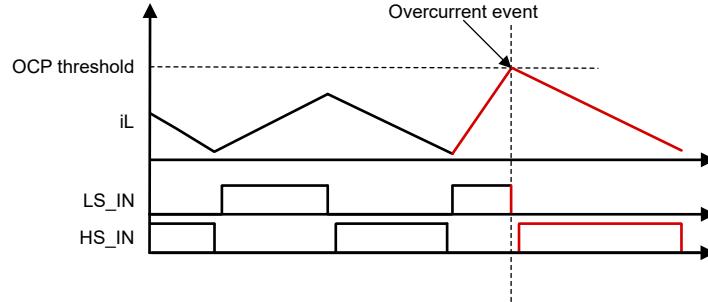


图 1-3. 实现理想 CBC 保护的 PWM 配置

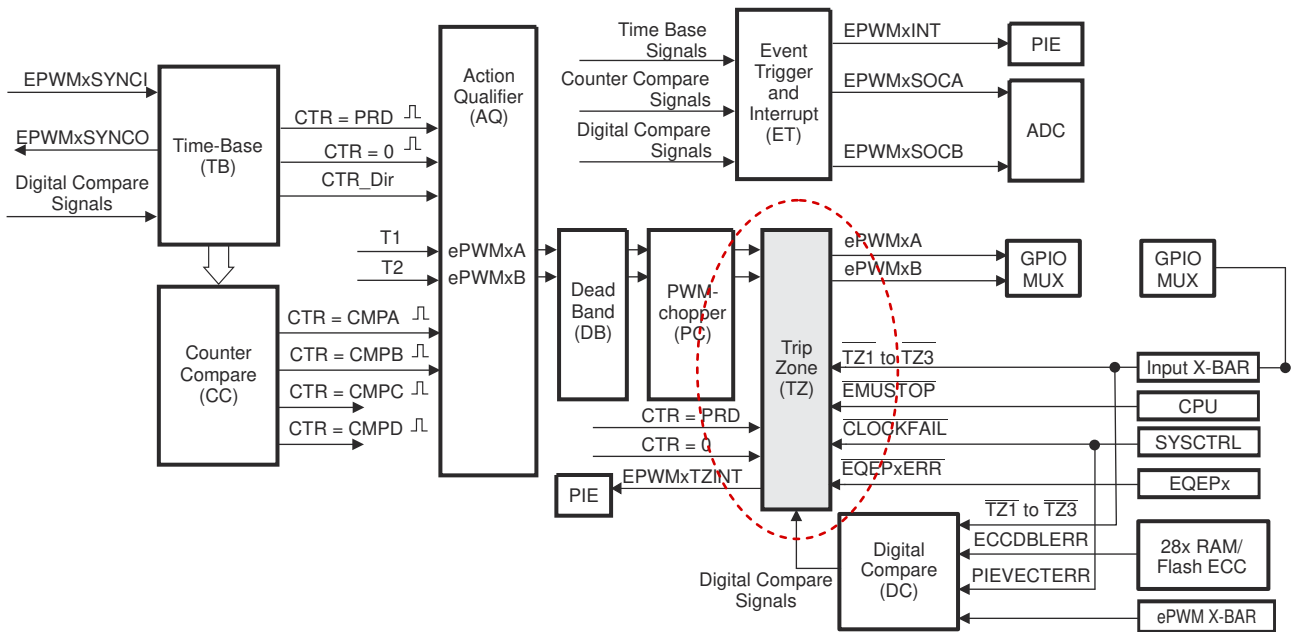


图 1-4. ePWM 子模块

1.2 反向电流控制

如 [图 1-1 PFC 中的控制挑战](#) 所述，当输入交流电压下降时会产生较大的反向电流，并且存储在输出电容器中的能量会放电，无法再保证保持时间。另一种状况是轻负载运行，为了提高轻负载效率，将 CCM 运行更改为不连续导通模式 (DCM)。因此，无论在何种情况下，都需要快速检测反向电流，然后关闭同步开关，或者为了简单起见关闭所有开关，如 [图 1-5](#) 所示。

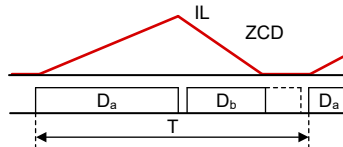


图 1-5. 反向电流控制

1.3 建议的 ePWM 配置

结合上述要求，建议使用以下 ePWM 配置，如 [图 1-6](#) 所示。以 ePWM1 为例，将 ePWM1A 定义为在 ZREO 事件时设置为高电平，在 CMPA 或 T1 事件时清除低电平。选择通过电感器电流比较器触发的 T1 事件，在过流条件下清除低 ePWM1A，以替代传统的 CBC 方案。如 [图 1-7](#) 所示，在最新的 4 类 EPWM 中，T1 和 T2 事件（来自比较器、跳闸或同步事件）也可以通过动作限定器 (AQ) 子模块生成动作。有关新 T1/T2 特性的更多详细信息，请参阅 TRM。由于 AQ 子模块在死区 (DB) 子模块之前，因此在使用高电平有效互补 (AHC) 模式时，对于 ePWM1A 和 ePWM1B 信号，通常会分别启用上升沿延迟和下降沿延迟。如 [图 1-6](#) 中的第 1 个和第 2 个周期所示，它涵盖了正常运行和过流条件。对于反向电流控制，可以简化为使用基于零电流检测 (ZCD) 事件的传统 CBC 保护，该保护机制对 ePWM1A 和 ePWM1B 均有效。如第 3 个周期所示，ePWM1A 输出在负电流事件期间已经为低电平，因此无论 VAC 极性如何，均可设置为与 ePWM1B 相同的操作。

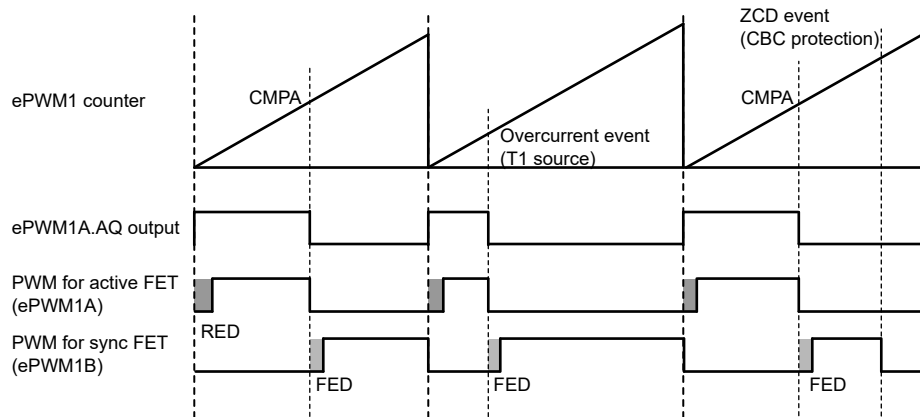


图 1-6. 基本 ePWM 配置方框图

S/W force	TB Counter equals			Trigger Events			Actions
	Zero	Comp A	Comp B	Period	T1	T2	
SW <input type="checkbox"/>	Z <input type="checkbox"/>	CA <input type="checkbox"/>	CB <input type="checkbox"/>	P <input type="checkbox"/>	T1 <input type="checkbox"/>	T2 <input type="checkbox"/>	Do Nothing
SW <input type="checkbox"/>	Z <input type="checkbox"/>	CA <input type="checkbox"/>	CB <input type="checkbox"/>	P <input type="checkbox"/>	T1 <input type="checkbox"/>	T2 <input type="checkbox"/>	Clear Lo
SW <input type="checkbox"/>	Z <input type="checkbox"/>	CA <input type="checkbox"/>	CB <input type="checkbox"/>	P <input type="checkbox"/>	T1 <input type="checkbox"/>	T2 <input type="checkbox"/>	Set Hi
SW <input type="checkbox"/>	Z <input type="checkbox"/>	CA <input type="checkbox"/>	CB <input type="checkbox"/>	P <input type="checkbox"/>	T1 <input type="checkbox"/>	T2 <input type="checkbox"/>	Toggle

图 1-7. 针对 ePWMxA 和 ePWMxB 输出的动作限定器动作

由于有源 FET 和同步 FET 角色在正周期和负周期下会互换，因此还需要交换相关的 PWM 控制信号，可以直接由 4 类 ePWM 的 DB 子模块来支持。如图 1-8 所示，S6 和 S7 用于交换 ePWMxA 和 ePWMxB 输出。添加的红色箭头也指明 DB 子模块内的详细设置。

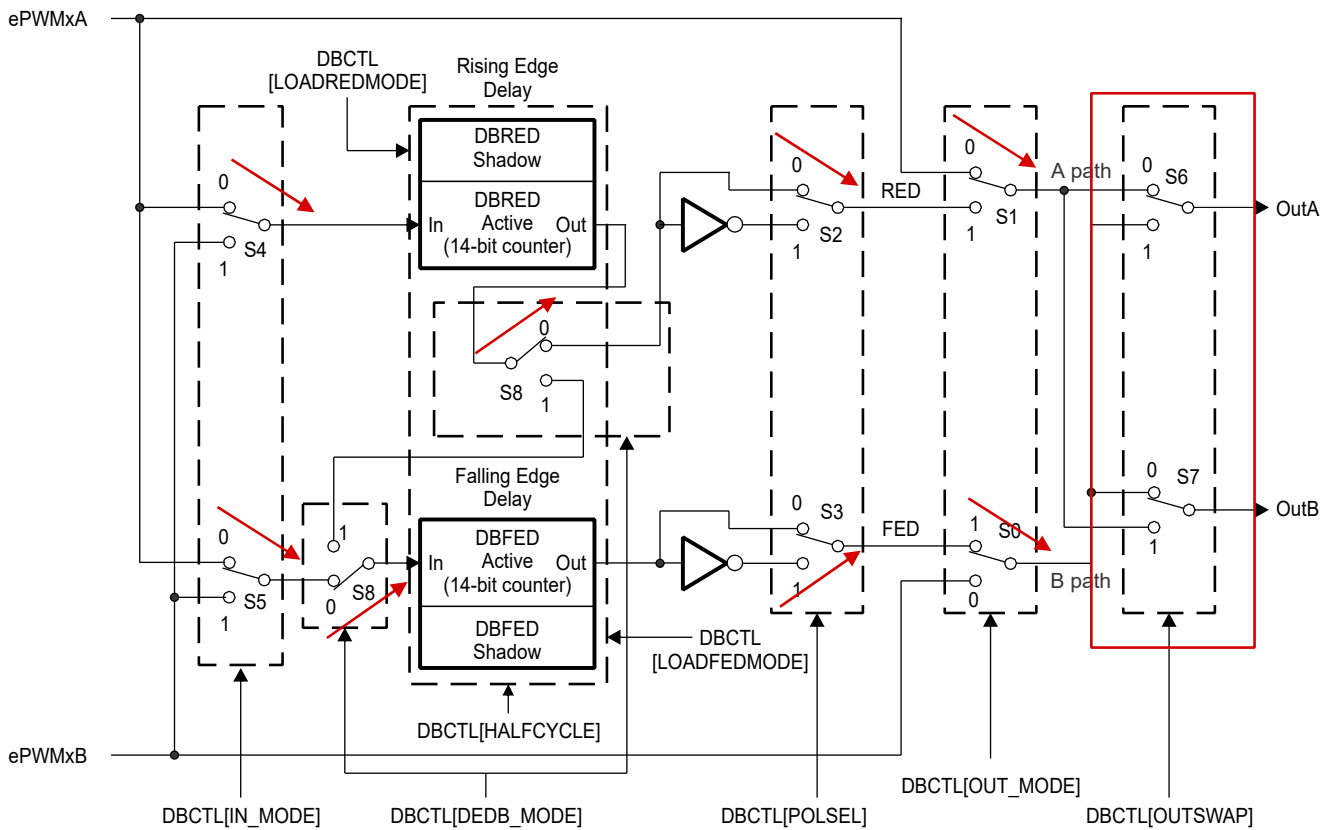


图 1-8. 死区子模块方框图

为了更好地展示如何将 T1 事件与 CMPSS 结合用于图腾柱 PFC 配置，我们提供了以下示例代码。在本例中，通过 ePWM X-Bar 将 CMPSS1_H 选择为 TRIP4 输入的源。请注意，仅显示与 T1 事件相关的配置，其他 ePWM 设置可参考 [C2000WARE](#) 中的示例工程。

```

XBAR_setEPWMmuxConfig(XBAR_TRIP4, XBAR_EPWM_MUX00_CMPSS1_CTRIPH);
XBAR_enableEPWMmux(XBAR_TRIP4, XBAR_MUX00);

// assign DCAL for TRIP4
EPWM_selectDigitalCompareTripInput(base, EPWM_DC_TRIP_TRIPIN4, EPWM_DC_TYPE_DCAL);

EPWM_setTripZoneDigitalCompareEventCondition(base, EPWM_TZ_DC_OUTPUT_A2, EPWM_TZ_EVENT_DCXL_HIGH);

// DCAEVT2 = DCAEVT2 (not filtered)

EPWM_setDigitalCompareEventSource(base, EPWM_DC_MODULE_A,
                                     EPWM_DC_EVENT_2,
                                     EPWM_DC_EVENT_SOURCE_ORIG_SIGNAL);

// Select DCAEVT2 event as AQ T1 source
EPWM_setActionQualifierT1TriggerSource(base, EPWM_AQ_TRIGGER_EVENT_TRIG_DCA_2);

// This is to avoid impact of high impedance state
EPWM_setTripZoneAction(base, EPWM_TZ_ACTION_EVENT_DCAEVT2, EPWM_TZ_ACTION_DISABLE);

//During the normal condition
EPWM_setActionQualifierAction(base, EPWM_AQ_OUTPUT_A, EPWM_AQ_OUTPUT_HIGH,
                              EPWM_AQ_OUTPUT_ON_TIMEBASE_ZERO);
EPWM_setActionQualifierAction(base, EPWM_AQ_OUTPUT_A, EPWM_AQ_OUTPUT_LOW,
                              EPWM_AQ_OUTPUT_ON_TIMEBASE_UP_CMPA);
//set T1 action for EPWM1A during CBC protection
EPWM_setActionQualifierAction(base, EPWM_AQ_OUTPUT_A, EPWM_AQ_OUTPUT_LOW,
                              EPWM_AQ_OUTPUT_ON_T1_COUNT_UP);
    
```

2 如何更好地使用适用于图腾柱 PFC 的 CMPSS

如节 1 所述，对于图腾柱 PFC，需要检测反向电流和过流事件，因此可以使用 CMPSS，从而省去外部比较器电路。为了尽可能减少所用的 CMPSS 数量，图 2-1 中的图显示了如何为单相图腾柱 PFC 使用一个 CMPSS。电感电流回路由至高侧比较器 CMPSS1_H 和低侧比较器 CMPSS1_L，CMPSS1_H 用于过流检测，CMPSS1_L 用于反向电流检测。

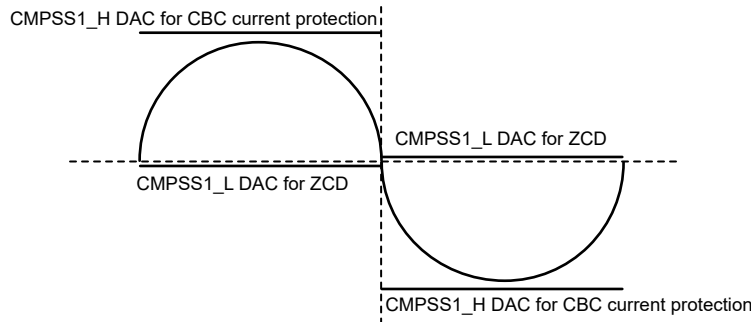


图 2-1. CMPSS 配置

至于正周期和负周期的过流保护，需要在过零点处使用不同的阈值来更改 DAC 值。此外，要选择其中一个 DCxEVT1/2 事件作为 T1 源，应为 CMPSS1_H 输出定义特定的高电平或低电平有效。在正周期内，发生过流事件时，CMPSS1_H 的输出为高电平有效，而在负周期内，CMPSS1_H 的输出为低电平有效。为了解决这个问题，可以在负周期内使用 COMPCTL[COMPHINV] 寄存器反转 CMPSS1_H 输出，以便为保护方案保持相同的高电平有效逻辑，而不管 VAC 极性如何。

至于反向电流检测，请注意，反向电流始终与 VAC 波形的极性相反，即正周期时为负电流尖峰，负周期时为正电流尖峰。因此，与 CMPSS1_H 配置类似，在 CMPSS1_L 的负周期中也需要更改 DAC 值并反转输出极性。

对于图腾柱 PFC，在过零点期间，当所有 PWM 信号关闭时存在死区时间，因此这是安全的，我们还建议在此期间更改 CMPSS 的 DAC 值和输出极性。根据器件特定的数据表，CMPSS DAC 稳定时间在 1μs 以内，这足够快，可以应对任何变化。

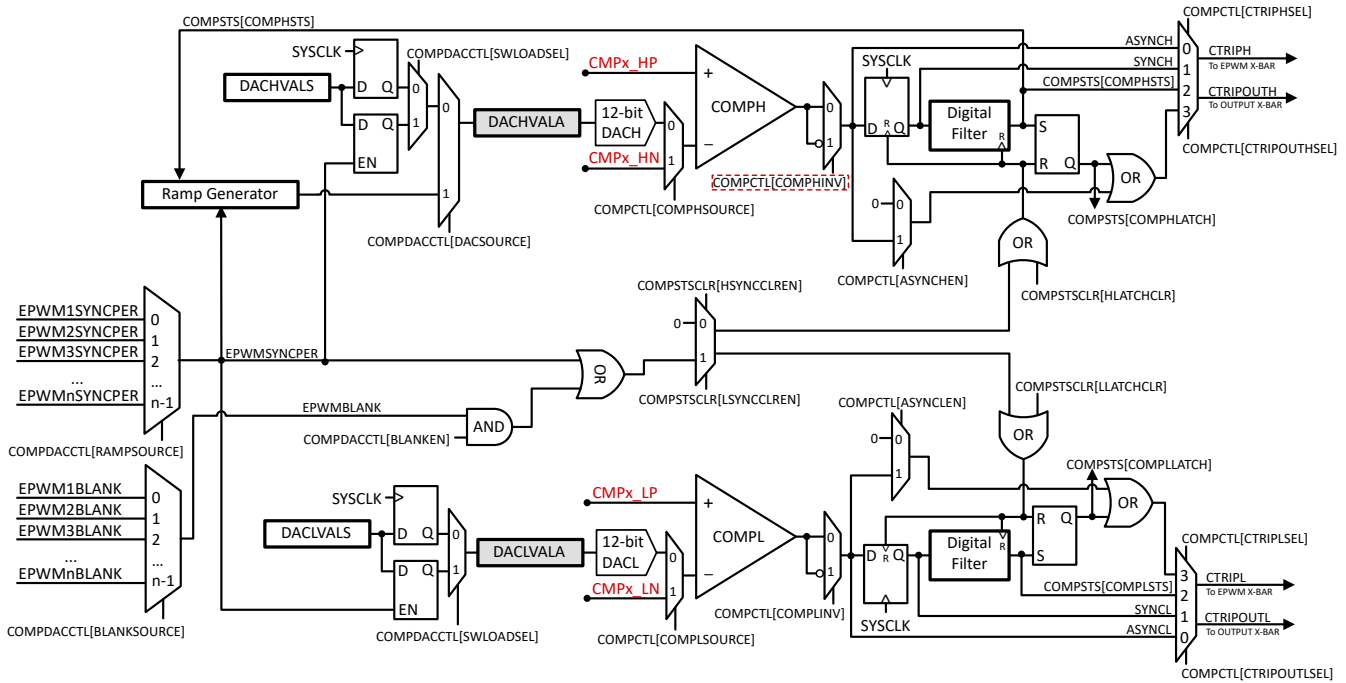


图 2-2. CMPSS 模块方框图

3 如何控制低频 MOSFET

由于与二极管相比，MOSFET 的导通损耗更低，所以在通常情况下，为了进一步提高效率，MOSFET 将用作低频 FET（在电网频率下驱动，通常为 50Hz 或 60Hz），如 Q3 和 Q4 所示。由于是在电网频率下驱动，始终处于高电平或低电平状态，因此一些用户可能会选择 GPIO 来控制低频 MOSFET。但是，出于可靠性考虑，我们仍建议使用 ePWM 输出作为控制信号，以便可以确保 MOSFET 在故障情况下的快速保护响应。否则，当 ISR 负责将 GPIO 设置为低电平状态时导致的延迟可能会给系统带来风险。

为了简化配置，可以使用 AQ 子模块的连续软件强制操作。例如，如果在正周期中为 Q3 使用 ePWMxA，为 Q4 使用 ePWMxB，则可以应用以下设置。

```
EPWM_setActionQualifierContSWForceAction(base, EPWM_AQ_OUTPUT_A, EPWM_AQ_SW_OUTPUT_LOW);
EPWM_setActionQualifierContSWForceAction(base, EPWM_AQ_OUTPUT_B, EPWM_AQ_SW_OUTPUT_HIGH);
```

请注意，在故障条件下为低频 MOSFET 启用 TZ 子模块动作时，应使用一次性跳闸模式，而不是 CBC 模式；因为在一般情况下，为低频 FET 所选的 MOSFET 不适合硬开关条件。此外，在单次触发模式下输出为低电平后，可以在下一个过零点清除 TZ 标志，从而使低频 MOSFET 对系统的影响最小。

4 如何实施可靠的过零检测

如[如何降低图腾柱 PFC 交流过零点处的电流尖峰](#)中所述，重要的是在过零期间为 Q1~Q4 实施软启动方案，以便降低电流尖峰并改善 THD。在此之前，准确和可靠的交流电压过零检测非常重要。在以下参考设计中：[设计指南：TIDM-2008/TIDM-1007 - 使用 C2000™ MCU 的双向交错式 CCM 图腾柱无桥 PFC 参考设计](#)或[设计指南：TIDA-010203 - 采用 C2000 和 GaN 的 4kW 单相图腾柱 PFC 参考设计](#)，使用软件锁相环 (SPLL) 通过电压相位信息来检测过零点。作为一种低通滤波器，SPLL 是一种很好的方法，可以避免因检测电压噪声或尖峰导致的误差。但是，如果实际应用需要支持交流频率的阶跃变化，则由于计算延迟，SPLL 无法提供预期的性能。因此，仍然有必要了解如何使用 ADC 通过纯电压检测电路来实现准确的过零检测。

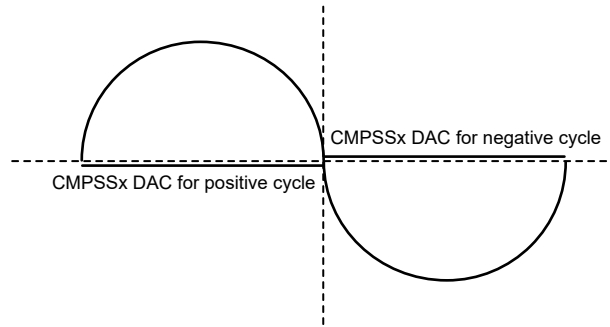


图 4-1. CMPSS 用于 Vac 检测

如图 4-1 所示，建议启用 CMPSSx 来处理 Vac 检测信号，将 DAC 阈值设置为接近 0。在 CMPSS 的帮助下，一旦交流极性发生变化，就可以在没有任何软件延迟的情况下关闭所有由 ePWM 模块控制的开关。在正常运行期间，当软启动方案开始实施时，它可以在过零点前自然地提供死区时间，如[如何降低图腾柱 PFC 交流过零点处的电流尖峰](#)中所述。

在实际应用中，还添加了整流二极管来绕过浪涌电流。浪涌测试期间的最关键问题是，例如在正周期期间，当反向浪涌能量迫使交流电压极性在短时间内从正变为负时，交流电源会短路，这是因为 Q4 就像在正周期一样保持导通状态，如图 4-2 所示。因此，在启用 CMPSSx 来进行 Vac 检测的情况下，它会关闭 Q4，避免在 55ns 内出现短路情况，从而更大幅度地降低功率级损坏的风险。在正常条件下，在过零点期间，当交流电压超过阈值电压时，关闭开关也是出乎意料的行为，不符合预期。此外，当使用非正弦交流电压输入进行测试时，甚至是使用方波交流输入也非常有用。

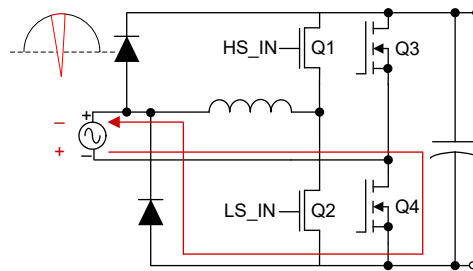


图 4-2. 浪涌测试期间的短路问题

5 如何实施两相交错控制

当额定功率增加时，为了实现更好的热设计和纹波电流性能，通常会选择交错拓扑。因此，两相交错式图腾柱 PFC 也常用于高功率应用中。在[利用新型 ePWM 特性进行多相控制](#)中，说明了在配置不同 ePWM 模块之间的相移关系时，相位寄存器 TBPHS 表现出了很好的灵活性。但是，由于 TBPHS 不提供影子模式，因此当开关频率以较大的阶跃变化时，应多加注意。对于 CCM 模式图腾柱 PFC，它通常使用固定频率，可以为两相交错配置启用该相位寄存器。本文档讨论了另一个更简化的方案，该方案有助于实施频率抖动功能，从而实现 EMI 优化。

如图 5-1 所示，以 ePWM1 和 ePWM2 为例，分别表示主相和从相的控制模块。两个 EPWM 模块不使用相移寄存器，而是拥有相同的时基。与节 1 中的 PWM 配置不同，它使用向上/向下双向计数模式，并且有源 FET 的占空比集中于主相（相位 1）的周期事件，而对从相（相位 2）则集中于零事件。使用此设计，可以自然地实现 180° 相移。另一个好处是，如果需要改变开关频率（例如，对于频率抖动功能），与 EPWMXLINK 寄存器的寄存器链接方案可以确保同时写入不同 ePWM 模块的周期寄存器。

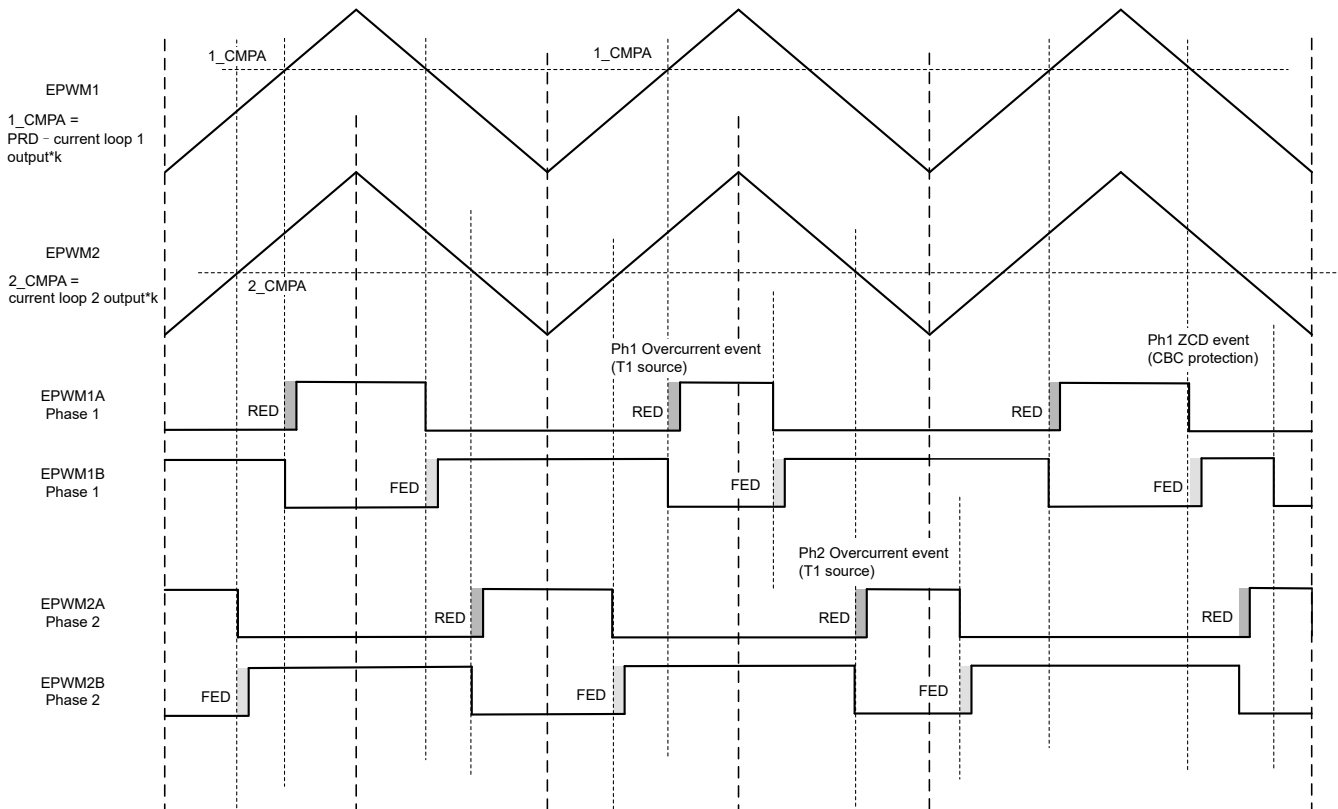


图 5-1. 相位交错式图腾柱 PFC EPWM 配置

6 参考资料

- 德州仪器 (TI) : [图腾柱 PFC 中的控制挑战](#)
- 德州仪器 (TI) : [如何降低图腾柱 PFC 交流过零点处的电流尖峰](#)
- 德州仪器 (TI) : [利用新型 ePWM 特性进行多相控制](#)
- 德州仪器 (TI) : [TMS320F28003x 实时微控制器技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI) : [设计指南：TIDM-2008/TIDM-1007 - 使用 C2000™ MCU 的双向交错式 CCM 图腾柱无桥 PFC 参考设计](#)
- 德州仪器 (TI) : [设计指南：TIDA-010203 - 采用 C2000 和 GaN 的 4kW 单相图腾柱 PFC 参考设计](#)

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