

一种用于图腾柱无桥 PFC 的新型 CCM-TCM 多模式控制方法

Bosheng Sun

Systems Engineer, Texas Instruments

简介

数据中心采用的电源单元 (PSU) 必须具有高效率和高功率密度。去年公布的 80 Plus Ruby 认证为数据中心 PSU 树立了极高的效率标准。如表 1 所示, 80 Plus Ruby 的效率不仅在每项负载条件下均高于 80 Plus Titanium, 5% 负载时更是要求达到 90% 的效率, 这一要求在此前从未有过明确规定。

80 PLUS 认证	230V 内部冗余				
额定负载百分比	5%	10%	20%	50%	100%
80 Plus Titanium		90%	94%	96%	91%
80 Plus Ruby	90%	91%	95%	96.5%	92%

表 1. 80 Plus 认证级别

同时, 有限的服务器机架空间和不断增长的功率需求促使功率密度不断提高。最新的模块化硬件系统——通用冗余电源——的目标功率为 3.6kW, 外形尺寸为 185mm × 39mm × 73.5mm, 对应的功率密度为 111W/in³, 而其他 PSU 产品的功率密度仍介于 80W/in³ 至 90W/in³ 之间。

服务器 PSU 由图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 和直流/直流转换器组成。图腾柱无桥 PFC 中使用的传统控制方法是连续导通模式 (CCM) 或三角导通模式 (TCM); 然而, 每种方法都有其局限性。CCM 图腾柱无桥 PFC 可以实现高功率密度, 但其效率因硬开关而受到限制, 尤其是在开关损耗成为主导因素的轻负载条件下。由于采用零电压开关 (ZVS), TCM 图腾柱无桥 PFC 可以在整个负载范围内实现出色的效率, 但需要将两个或更多相位交错以减少高电感器电流纹波, 因此导致低功率密度和高成本。表 2 中比较了这两种方法。

	CCM 运行	TCM 运行
优点	<ul style="list-style-type: none"> 低峰峰值电感器电流纹波 	<ul style="list-style-type: none"> ZVS

	CCM 运行	TCM 运行
优点	<ul style="list-style-type: none"> 简单控制 	
缺点	<ul style="list-style-type: none"> 硬开关、高开关损耗 	<ul style="list-style-type: none"> 高峰峰值电感器电流纹波 需要多相交错来减少高功率应用中的电流纹波, 因此导致低功率密度和高成本 复杂控制

表 2. 图腾柱 PFC 的 CCM 和 TCM 比较

为了同时实现高效率和高功率密度, 图腾柱无桥 PFC 可以采用多模式运行, 如图 1 所示。在重负载条件下或交流半周期的峰值时, 所需的 PFC 输入电流较高, PFC 运行模式为 CCM。当负载减小或在所需 PFC 输入电流较低的交流过零区域附近时, PFC 会切换到 TCM 并采用 ZVS 运行。

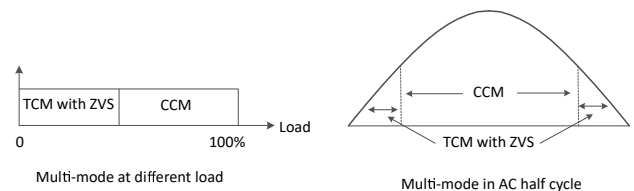


图 1. CCM-TCM 多模式运行

与纯 CCM 相比, 多模式控制在轻负载时因为采用了 ZVS 而能够提供更高的效率; 与纯 TCM 相比, 又因为电感器电流纹波更低, 所以无需采用多相交错运行, 从而可显著减小尺寸并降低系统成本。通过综合 CCM 和 TCM 的优势, 可以同时满足高效率和高功率密度要求。

如何让 PFC 在轻负载时进入 TCM

TCM 运行需要电感器电流在开关周期结束时降至零。然而, 在 CCM PFC 中, 由于升压电感较高, 在整个交流半周期中电感器电流几乎始终大于零。要使电感器电流降至

零，一种方法是选择一个合适的升压电感，其值低于 CCM PFC 所用的电感，但高于 TCM PFC 所用的电感。

由于电感降低会导致电流纹波升高，因此在设计电感器时必须确保多模式运行产生的效率增益大于电流纹波升高引起的额外电感器磁芯损耗。由于电感器电流纹波高于 CCM，因此电磁干扰滤波器也需要重新设计。

另一种选择是继续使用相同的 CCM 电感器，但采用开关频率折返曲线，如图 2 所示。开关频率在交流峰值处最高（等于 CCM 运行中的标称开关频率），并逐渐降低趋近交流过零点。

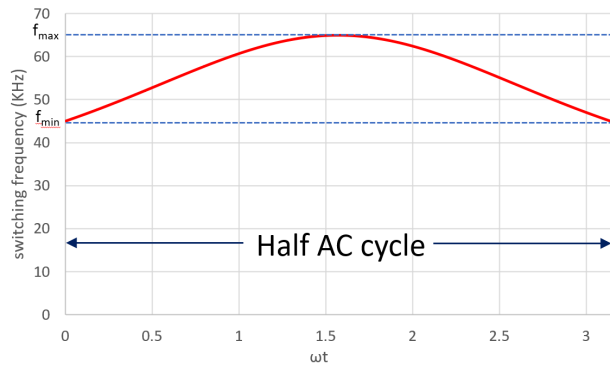


图 2. 交流半周期内的开关频率曲线

使用方程式 1 可计算交流半周期内的开关频率：

$$f = \frac{1}{\frac{1}{f_{\min}} - \left(\frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_{\max}}\right)\sin(\omega t)} \quad (1)$$

其中 f_{\max} 是传统 CCM 运行中使用的开关频率， f_{\min} 是最小开关频率， ωt 是交流输入电压的角频率。

开关频率降低后，电感器电流将在开关周期结束时降至零，从而实现 TCM 控制。之后即可控制 PFC 在交流峰值时在 CCM 下运行，在交流过零区域附近时则切换至具有 ZVS 的 TCM。进一步降低最小开关频率可以扩展 TCM 区域，但代价是环路带宽减小，可能导致总谐波失真 (THD) 不佳，甚至导致环路不稳定。

如何检测零电流

对于 TCM 控制，通过在 PFC 接地回路上放置一个电阻器或在升压电感器上添加第二个绕组来构建零电流检测 (ZCD) 电路，即可检测到电感器电流降至零的瞬间。部分

器件（如 TI 的 LMG3427R030 氮化镓 (GaN) 场效应晶体管 (FET)）具有内置的 ZCD 电路，可在电流变为零时生成 ZCD 信号，如图 3 所示。将该器件用作高频开关可显著简化设计过程。ZCD 信号会发送到微控制器 (MCU) 进行进一步处理。

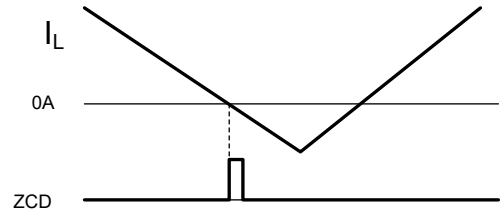


图 3. ZCD 信号生成

如何在 TCM 中实现 ZVS

要想在 TCM 中实现 ZVS 运行，电感器电流需要变为负值，以对开关节点电压放电。收到 ZCD 信号后，MCU 会为此 ZCD 信号增加一个延迟时间，然后使用延迟的 ZCD 信号关闭脉宽调制 (PWM) 并重置 PWM 计数器，如图 4 所示。重置后，下一个开关周期开始，升压开关导通。由于延迟时间的存在，在电感器电流降至零后，同步开关仍处于导通状态，导致电感器电流变为负值。适当地调整延迟时间将调整负电流的大小，使开关节点电压放电至零，从而在此时导通升压开关并实现 ZVS。

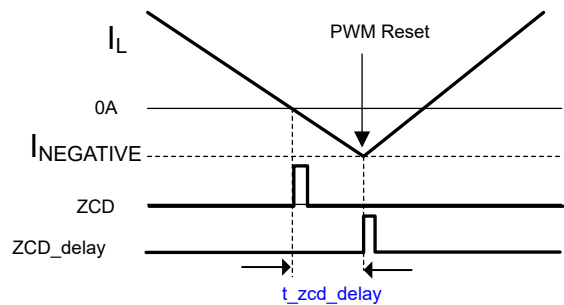


图 4. 添加 ZCD 延迟以重置 PWM

对于从同步开关关断到升压开关导通的给定死区时间 Δt ，可使用方程式 2 计算开关节点电压完全放电所需的最小负电流：

$$I_{\text{NEGATIVE}} = -\frac{2 \times C_{\text{OSS}} \times V_{\text{out}}}{\Delta t} \quad (2)$$

其中 C_{OSS} 是开关的输出电容， V_{out} 是 PFC 输出电压。

然后使用方程式 3 计算所需的最短 ZCD 延迟时间：

$$t_{zcd_delay} = \frac{L \times |I_{NEGATIVE}|}{V_{out} - V_{in}} \quad (3)$$

其中 L 是升压电感， V_{in} 是 PFC 输入电压。

在**方程式 3** 中，当 V_{in} 接近 V_{out} 时，计算出的延迟时间可能过长，导致延迟的 ZCD 信号出现在下一个开关周期，如**图 5** 所示。此时重置 PWM 是错误行为。为防止出现这种情况，应生成一个在 ZCD 信号开始时开始并在当前开关周期结束时结束的 ENABLE 窗口，如**图 5** 所示。MCU 使用此 ENABLE 窗口与延迟的 ZCD 信号进行“与”运算，生成 RESET 信号，然后使用该 RESET 信号重置 PWM。这可确保 PWM 重置只能在同一开关周期内进行。

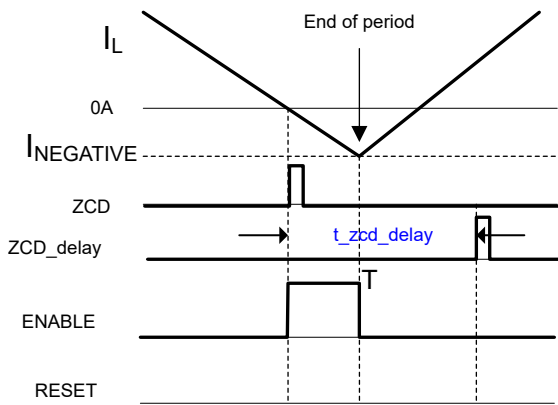


图 5. ENABLE 窗口和 RESET 信号

在 CCM 和 TCM 之间切换

CCM 和 TCM 之间的切换自动进行。在交流峰值或重负载时，电感器电流较高。该电流不会降至零，并且由于未生成 ZCD 信号，因此也不会有 RESET 信号。PWM 计数器在其标称开关周期结束时会自动重置。由于开关频率等于标称开关频率，PFC 的工作方式与传统 CCM PFC 的工作方式相同，如**图 6** 所示。

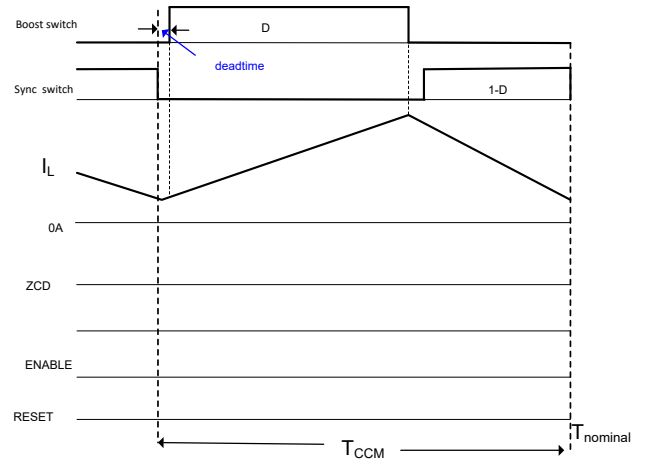


图 6. 交流峰值时的 CCM 运行

当交流电趋向过零点时，电感器电流和开关频率均会下降，其中电感器电流在开关周期结束前降至零。GaN 器件生成 ZCD 信号。使用由**方程式 3** 计算得出的延迟时间，并与 ENABLE 窗口进行“与”运算，即可生成 RESET 信号。该 RESET 信号可重置 PWM。同步开关在标称开关周期结束前关断，随后下一个开关周期开始。实际开关频率小于标称开关频率。PFC 作为 TCM PFC 运行，如**图 7** 所示。

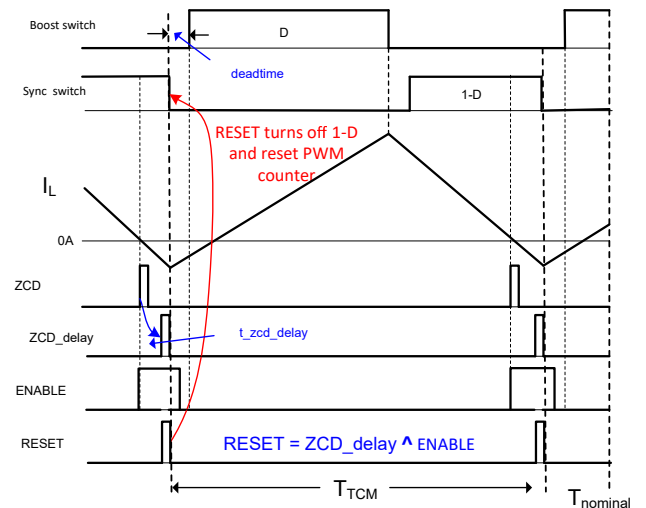


图 7. 交流过零点附近的 TCM 运行

动态死区时间

在 CCM 下，将死区时间保持在最短时间（即同步开关关断和升压开关导通之间的时间）将缩短升压开关的体二极管导通时间。在 TCM 下，当同步开关关断时，开关节点电压需要时间进行放电或充电。因此，需要长一些的死区

时间。在 CCM 和 TCM 之间使用动态死区时间可优化效率。

控制律和 PWM 生成

在传统的 TCM 运行中，只有一个电压环路，没有电流环路。升压开关导通时间由恒定导通时间控制方式决定。在多模式控制方法中，传统的平均电流模式控制器（如图 8 所示）为 TCM 和 CCM 运行生成 PWM 占空比。控制器包含一个外部电压环路 (G_V) 和一个内部电流环路 (G_I)。 G_V 的输出由检测到的输入电压调制为用于电流环路的电流命令。由于采用同一补偿器为 CCM 和 TCM 生成 PWM 占空比，因此模式转换较为平滑，在模式转换期间不会产生电流失真。

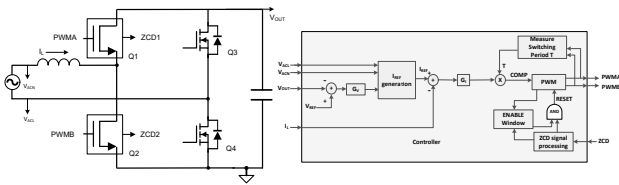


图 8. 建议 CCM-TCM 控制的方框图

在 MCU 中，通过将 COMP 值与 RAMP 信号进行比较来生成 PWM 信号，其中 COMP 的计算方式为将电流环路 G_I 输出乘以开关周期 T，如方程式 4 所示：

$$COMP = G_i \times T \tag{4}$$

在传统的 CCM 运行中，开关周期 T 是恒定的。然而，在 TCM 运行中，RESET 信号决定了实际开关周期；该周期短于 T。使用方程式 4 计算得出的 PWM 脉冲宽度长于所需值，因此会导致 G_I 更难进行补偿。将 G_I 推至更高的带宽可能会有所帮助，但也可能会导致环路不稳定。

要想解决此问题，应让控制器继续测量实际开关周期。通过将 G_I 输出乘以上一个开关周期中测得的开关周期来计算 COMP 值，如方程式 5 和图 9 所示。方程式 5 之所以有效，是因为 PWM 周期在两个连续周期中几乎相同。

$$COMP_N = G_i \times T_{N-1} \tag{5}$$

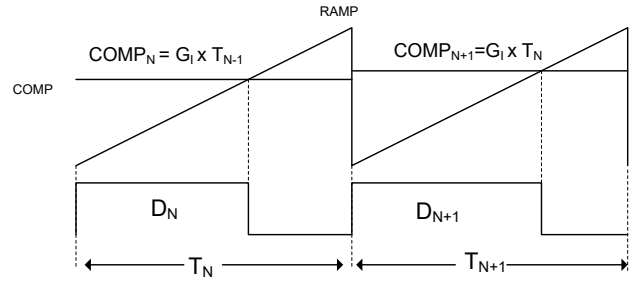


图 9. PWM 生成

测试结果

该控制方法是在 3.6KW 图腾柱无桥 PFC 中实现的 [1]。其中最大开关频率为 65KHz，最小开关频率设置为 45KHz。控制器使用 TI 的 TMS320F280039C 实时 MCU。高频开关使用 LMG3427R030 GaN FET，该器件具有内置的 ZCD 电路。65kHz 中断服务例程 1 (ISR1) 实现了电流环路 and ZCD 延迟时间计算，而 10kHz 中断服务例程 2 (ISR2) 实现了电压环路。ZCD 延迟、ENABLE 窗口、“与”逻辑和实际开关周期测量均通过 TMS320F280039C 的可配置逻辑块 (CLB) 来实现。配置后，CLB 独立运行，无需 CPU 参与。

该设计实现了大于 180W/in³ 的功率密度，并具有出色的轻负载效率。图 10 和图 11 比较了此建议控制方法与传统 CCM 控制之间的效率（在同一电路板上测试），显示轻负载效率提高了多达 2%。

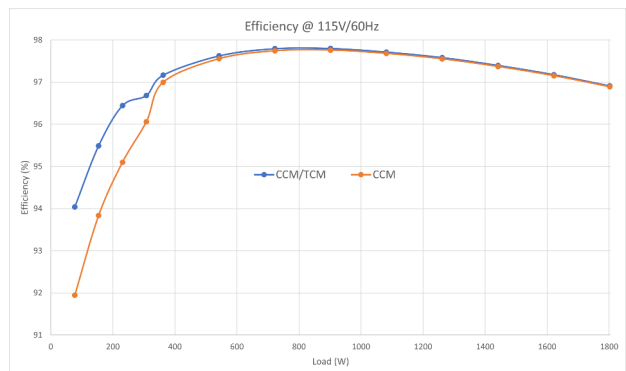


图 10. 低压线路下的效率比较

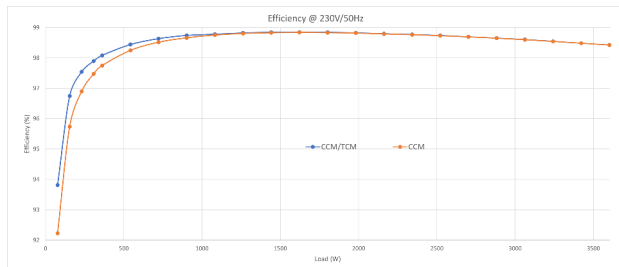


图 11. 高压线路下的效率比较

图 12 显示了 50% 负载时的输入电流波形，在模式转换期间未观察到电流失真。

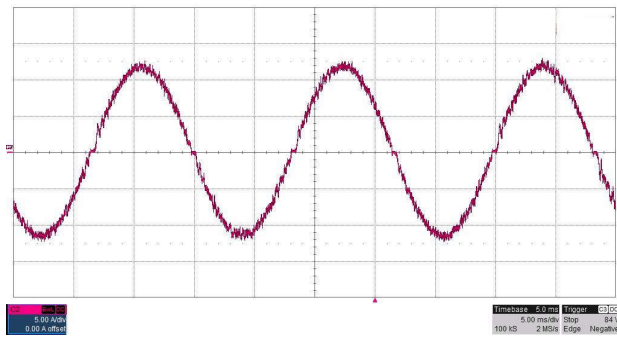


图 12. 50% 负载时的输入电流波形

结语

图腾柱无桥 PFC 通过 CCM-TCM 多模式运行，可在重负载或交流峰值时以 CCM 运行，在轻负载或交流过零区域附近时切换到具有 ZVS 的 TCM，从而同时实现高效率和高功率密度。CCM-TCM 多模式可大幅提高轻负载效率，同时在模式转换期间不会造成输入电流失真。这对于需要 80 Plus Ruby 级效率的应用非常有用。

参考资料

1. 德州仪器 (TI) (日期不详) “[3.6kW CCM-TCM 多模式控制图腾柱无桥 PFC 参考设计](#)。”德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP23537。2025 年 2 月 16 日访问。

关于作者

Bosheng Sun, 德州仪器 (TI) 系统工程师, 专注于开发面向服务器和工业应用的数字控制、高性能交流/直流解决方案。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

案。他于 1995 年获得清华大学的电气工程学士学位，又于 2003 年获得克利夫兰州立大学的电气工程硕士学位。他拥有六项美国专利。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月