

在 高密度 GaN 优化型 PFC 转换器中解决交流压降恢复问题

Brent McDonald

System and Application Engineer
Power Design Services

引言

数据中心服务器电源单元断电会导致从娱乐到金融交易再到家庭安防系统的所有方面发生中断。诸如开源计算项目 (OCP) 中的 V2 电源架规范 [1] 等各种规范突显出需要使用稳健的交流压降控制算法来减少服务器停机时间。此外，在传统的连续导通模式控制中，数据中心需要具有成本效益的解决方案来提高功率因数校正 (PFC) 轻负载和峰值效率，同时缩小无源器件，这变得越来越困难 [2 8]。

为了解决这个问题，TI 使用两相集成三角电流模式 (iTCM) PFC 开发了基于氮化镓 (GaN) 的高密度设计 (图 1) [9]。在高频下运行的低值电感器使得此设计可实现高效率 (>99%) 和高功率密度 (120W/in³)。这些小型电感器在交流压降恢复过程中存在一个独特的问题，即只有几微秒的开关导通时间也可能会产生超过 70A 的开关电流。此外，时序中的任何延迟也会导致出现明显的反向电流，从而进一步加剧 PFC 的恢复问题。要将电流水平保持在安全水平并防止反向电流，需要开发一种新的解决方案来解决交流压降和恢复问题。本文利用基于变频、ZVS、5kW、基于 GaN 的两相图腾柱 PFC 参考设计 [10] 的实验室验证数据来讨论此解决方案，表 1 列出了主要元件和系统规格。

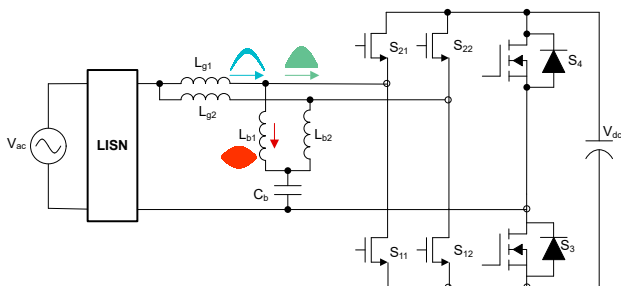


图 1. 采用电感器和电流包络的 iTCM 拓扑。

参数	值
交流输入	90V - 264V
线频率	50Hz 至 60Hz

参数	值
直流输出	400V
最大功率	5kW
满载时的保持时间	20ms
L _g , 低频电感器	140μH
L _b , 高频电感器	14μH
C _b , 高频阻断电容器	1.5μF
总谐波失真 (THD)	OCP v3
电磁干扰 (EMI)	欧洲标准 (EN) 55022 A 级
运行频率	可变, 75kHz 至 1.2MHz
微控制器	TMS320F280049C [11]
高频 GaN 场效应晶体管 (FET) (S ₁₁ 、S ₁₂ 、S ₂₂ 、S ₂₁)	LMG3526R030 [12]
低频硅 FET (S ₃ 、S ₄)	IPT60R022S7XTMA1
尺寸	38mm × 65mm × 263mm
功率密度	120W/in ³

表 1. 采用电感器和电流包络的 iTCM 拓扑。

拓扑概述

该拓扑使用两个以 180° 异相运行的相位，使用单个直流阻断电容器 C_b，利用两相架构提供的纹波电流消除，并降低 C_b 中的均方根 (RMS) 电流应力。调整 L_{b1} 和 L_{b2} 来处理 TCM 运行所需的高频交流纹波电流，从而消除 TCM 中使用的电感器所需的直流偏置负担，如以下文献所定义：[5]。为 L_{b1} 和 L_{b2} 使用铁氧体磁芯，确保在存在零电压开关 (ZVS) 所需的高磁通摆幅的情况下具有低损耗。L_{g1} 和 L_{g2} 的值大于 L_{b1} 和 L_{b2} (约大 10 倍)，可防止大部分高频电流流入输入源，进而改善 EMI。此外，由于 L_{g1} 和 L_{g2} 中的纹波电流较低，因此可以使用成本更低的磁芯材料。图 1 还显示了适用于电感器和开关节点的纹波电流包络。

交流压降技术挑战

要强调的第一个挑战是，在交流输入电压消失时会生成反向电流。由于图腾柱 PFC 拓扑中的所有开关都是双向的，因此在去除交流电源时，必须尽快关断作为同步整流器运行的 FET。这种关断可防止产生负向电流，从而避免输出电压的放电，并减少可用的保持时间。图 2 展示了在正半周期内为同步导通间隔生成此负向电流的路径。此外，关断同步整流器过程中出现任何较大延迟也会导致出现一个大电流尖峰，该电流尖峰会激活过流保护 (OCP)。例如，如果同步整流器在没有输入电压时保持导通，则您可以解算在生成 70A 电流所花的时间（即 2.5μs）内的

$V_{dc} = L_{b1} \cdot \frac{di_1}{dt}$ 。这么短的时间会给交流压降检测带来一个重大问题，因为在系统触发 OCP 或造成损坏之前，交流压降检测需要及时识别问题并停止开关操作。

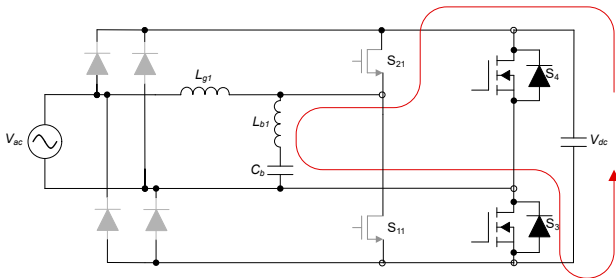


图 2. 同步整流器 S_{21} 延迟关断 V_{dc} 放电路径。

第二个挑战是，在恢复交流电后恢复 PFC 的运行。此事件的核心问题来自这样一个事实：PFC 上的旁路二极管将输出电压充电至输入正弦波的峰值，当输出电压降至远低于这个峰值时，在高压线路上最容易发生这种情况。在此类事件期间，转换器没有用于停止电流的机制，从而使浪涌电流变得非常大。在此类事件期间，如果不恰当地控制开关，则会使电感器饱和、触发 OCP 事件并进一步使输出电压放电，从而使情况变得更糟。由于为 L_{b1} 和 L_{b2} 使用了小数值电感器，iTCM 拓扑结构经常在较高的频率范围内运行，这会进一步增加对精确控制算法的需求。

交流压降解决方案

为了精确地确定是否存在交流输入，该解决方案使用虚拟交流输入信号来监控实际交流输入的完整性。通过测量输入电压幅度、频率和相位来生成此虚拟信号，因此在正常运行期间，它可以很好地跟踪实际交流输入的 50Hz 和

60Hz 分量。该系统可以比较实际输入与虚拟输入，从而轻松地识别是否存在交流输入电压。这两个信号之间的差值如果出现任何突然变化，则表明存在输入瞬态事件。此瞬态事件用于检测交流输入电压的损失和恢复。图 3 展示了虚拟交流输入以及发生压降事件期间的实际输入。

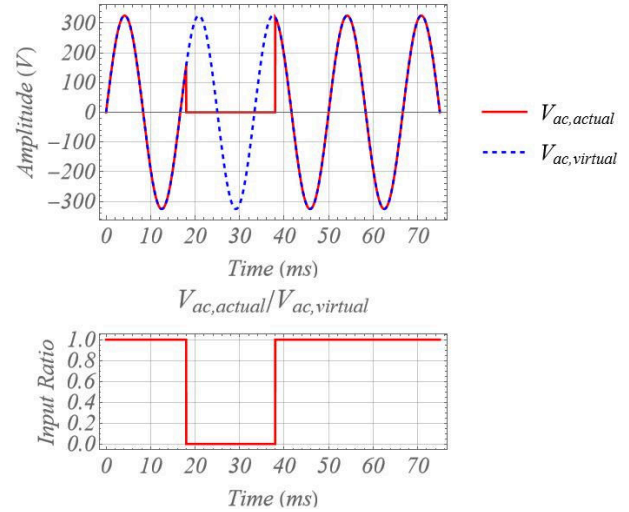


图 3. 交流输入压降与虚拟交流信号

图 4 展示了控制压降和恢复过程的状态机。在启动期间，系统会经历初始化周期（同步初始化），系统在这个过程中确定 RMS 输入电压幅度。它使用软件锁相环 (SPLL) 来确保 $V_{ac,virtual}$ 的相位与 $V_{ac,actual}$ 的相位匹配。锁定 SPLL（同步开启）后，处理器会监控 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 之间的比率（请参阅图 3）。如果此比率小于目标阈值，则声明压降事件且开关立即停止（停止状态）。此时，系统会清除发生的任何故障并进入待机状态（就绪），在此状态下，系统会监控 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 比率来确定该比率何时高于恢复阈值。状态机确定交流已恢复之后，它会立即恢复开关并重新同步 SPLL（恢复状态）。通过将 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 比率与 SPLL 结合使用，该算法能够确定任何输入电压或频率下的交流压降和恢复时间。此外，由于该算法始终会监视 $V_{ac,actual}/V_{ac,virtual}$ 比率，而基于电平的传统解决方案要检测交流输入电压何时变为零，因此它可以比传统解决方案更快响应。基于电平的压降监测会产生延迟，从而导致产生大的电流尖峰和明显的反向电流。

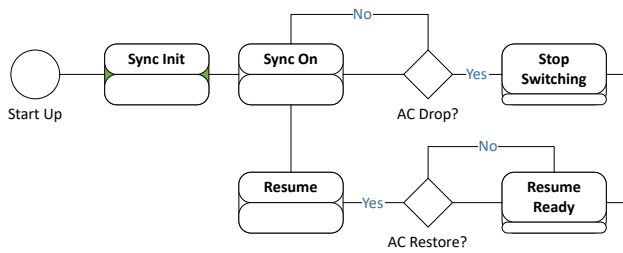


图 4. 交流压降和恢复状态机

结果

图 5 展示了在交流压降和恢复事件期间使用上述算法的两相 iTCM 图腾柱 PFC 的性能。60Hz 时的交流输入电压为 $230V_{RMS}$ ，输出电压为 400V。负载为恒流 5kW（400V、12.5A），会出现 20ms 的交流压降事件。为了对系统产生最坏情况应力，移除了交流电，使其在交流线路周期的峰值时重新接入。这是浪涌电流的最坏情况，因为当交流线路峰值超过 V_{OUT} 时，输入旁路二极管会导致大量浪涌电流进入输出电容器。

图 5 中的波形还提供事件恢复部分的放大图像。我们可以清楚地看到，PFC 开关电流得到良好控制，低于 GaN FET OCP 限制 [12]。最小的反向电流可防止 V_{OUT} 的不必要放电。此外，因为该算法能够轻松确定输入电压是高于还是等于输出电压，所以旁路二极管的导通间隔没有异常行为。

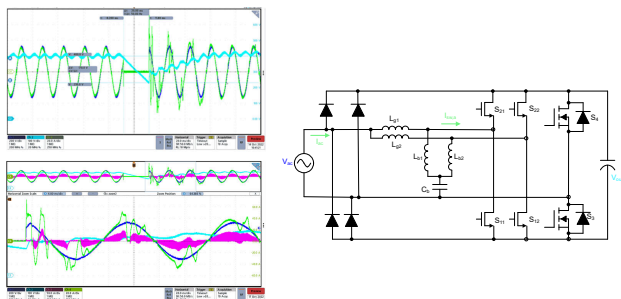


图 5. 5kW 时的交流压降和恢复性能。

除了交流压降，该设计还提供低 THD、高效率、高功率密度和快速负载瞬态响应。

如果您对此算法或此设计的其他方面感兴趣，可在参考文献中找到两相图腾柱 PFC 参考设计的完整原理图、布局、物料清单、测试结果和代码 [10]。

参考文献

1. **V2 Power Shelf Specification 6600W @ 12.6V DC (2+1) Redundant**. OPEN Compute Project. Facebook: 加利福尼亚州门洛帕克, 2015 年 2 月。
2. Fernandes, Ryan 和 Olivier Trescases. **A Multimode 1-MHz PFC Front End With Digital Peak Current Modulation**. 发表于 IEEE 电力电子学汇刊第 31 卷第 8 期 (2016 年 8 月): 第 5694-5708 页。doi: 10.1109/TPEL.2015.2499194。
3. Lim, Shu Fan 和 Ashwin M. Khambadkone. **A Multimode Digital Control Scheme for Boost PFC with Higher Efficiency and Power Factor at Light Load**. 发表于 2012 年第二十七届年度 IEEE 应用电力电子会议暨展览会 (APEC), 第 291-298 页。doi: 10.1109/APEC.2012.6165833。
4. Huang, Long, Wenxi Yao 和 Zhengyu Lu. **Interleaved Totem-Pole Bridgeless PFC Rectifier with ZVS and Low Input Current Ripple**. 发表于 2015 年 IEEE 能量转换大会暨展览会 (ECCE), 第 166-171 页。doi: 10.1109/ECCE.2015.7309684。
5. Liu, Zhengyang. 2017. **Characterization and Application of Wide-Band-Gap Devices for High Frequency Power Conversion**. 弗吉尼亚理工大学暨州立大学博士论文。
6. Kim, J.W., S.M.Choi 和 K.T.Kim. **Variable On-Time Control of the Critical Conduction Mode Boost Power Factor Correction Converter to Improve Zero-Crossing Distortion**. 发表于 2005 年电力电子与驱动系统国际会议, 第 1542-1546 页。doi: 10.1109/PEDS.2005.1619933。
7. Xu, Xiaojun 和 Alex Q. Huang. **A Novel Closed Loop Interleaving Strategy of Multiphase Critical Mode Boost PFC Converters**. 发表于 2008 年第二十三届年度 IEEE 应用电力电子会议暨展览会 (APEC), 第 1033-1038 页。doi: 10.1109/APEC.2008.4522849。
8. Neumayr, D., D. Bortis, E. Hatipoglu, J.W.Kolar 和 G. Deboy. **Novel Efficiency-Optimal Frequency**

Modulation for High Power Density DC/AC

Converter Systems。发表于 2017 年 IEEE 第三届国际未来能源电子会议和 ECCE 亚洲会议 (IFEEC 2017-ECCE Asia)，第 834-839 页。doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992148。

9. Rothmund, Daniel, Dominik Bortis, Jonas Huber, Davide Biadene 和 Johann W. Kolar。 **10 kV SiC-Based Bidirectional Soft-Switching Single-Phase AC/DC Converter Concept for Medium-Voltage Solid-State Transformers**。发表于 2017 年 IEEE 第 8 届分布式发电系统电力电子学国际研讨会 (PEDG)，第 1-8 页。doi: 10.1109/PEDG.2017.7972488。
10. 德州仪器 (TI) (日期不详) **变频、ZVS、5kW、基于 GaN 的两相图腾柱 PFC 参考设计**。德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP40988。访问日期: 2022 年 12 月 27 日。
11. 德州仪器 (TI) (日期不详) **具有 100MHz 频率、FPU、TMU、256KB 闪存、CLA、InstaSPIN-FOC™、CLB、PGA、SDFM 的 C2000™ 32 位 MCU**。访问日期: 2022 年 12 月 27 日。
12. 德州仪器 (TI) (日期不详) **具有集成驱动器、保护和温度报告功能的汽车类 650V 30mΩ GaN FET**。访问日期: 2022 年 12 月 27 日。

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。

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