

Technical White Paper

如何通过 Vienna PFC 满足三相交流输入系统对功率因数和 iTHD 的严格要求



Jim Chen and Skylar Li

System Engineering & Marketing

摘要

三相交流/直流整流器是电网与电气设备之间的重要接口。其良好的运行特性可以提高设备的效率和电网电能的质量。为了满足三相系统对高功率因数和低电流谐波的严格要求，三相功率因数校正 (PFC) 技术被越来越多地应用于三相设备。本白皮书分析了三相 PFC 系统的技术趋势，介绍了 EN/IEC 61000-3-2 等国际标准中对电流谐波的要求，并比较和分析了各种 PFC 拓扑的优缺点。然后介绍了具有低成本、高性能、高可靠性和高功率密度特点的 Vienna PFC 系统解决方案，并提供了 Matlab®/Simulink® 的仿真结果，以验证控制策略的有效性。最后，介绍了德州仪器 (TI) 提供的基于 Matlab/Simulink 的 C2000™ 微控制器单元 (MCU) 代码生成函数。该函数可以大幅缩短项目开发周期并降低成本。

内容

1 引言	2
2 三相 PFC 系统的技术趋势	2
3 通过三相 PFC 满足对功率因数和 iTHD 的严格要求	3
3.1 电流谐波要求	3
3.2 三相 PFC 拓扑	4
4 Vienna PFC 系统解决方案和仿真	6
4.1 Vienna PFC 系统解决方案	7
4.2 仿真	8
4.3 基于 MATLAB/Simulink 的 C2000 代码生成	11
5 参考资料	12

插图清单

图 1-1. 三相交流输入系统框图	2
图 3-1. 三相无源 PFC 系统框图	3
图 3-2. 三相有源 PFC 系统框图	3
图 3-3. 两级 PFC	4
图 3-4. T 型 PFC	5
图 3-5. Vienna PFC	5
图 4-1. Vienna PFC 系统解决方案	7
图 4-2. 10kW 时的 Vienna PFC 仿真波形	9
图 4-3. 10kW 时的 Vienna PFC iTHD	9
图 4-4. Vienna PFC 功率因数仿真结果	10
图 4-5. Vienna PFC iTHD (100kHz) 仿真结果	11
图 4-6. 使用 Embedded Coder 工具从模型生成嵌入式 C 控制代码	12

表格清单

表 3-1. A 类设备的限制	3
表 3-2. PFC 拓扑的优缺点	5
表 4-1. 仿真参数	8
表 4-2. 仿真结果	10

商标

C2000™ and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

Matlab® and Simulink® are registered trademarks of The MathWorks, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

由于化石燃料短缺和环境污染，加之电力电子技术的进步，越来越多的电力电子设备接入到电网中。传统的交流/直流转换整流器件，比如二极管整流器、相控整流器，不仅会造成更高的无功功率损耗，而且会在电网中引入大量谐波，严重影响电网的稳定性和质量。为保证电网的电力质量，全球组织制定了一系列标准来规范电气设备的电流谐波和功率因数，包括国际电工委员会 (IEC) 的 EN/IEC 61000-3-2 和中国的 GB17625.1。

大型功率器件，通常是三相系统，对电网的谐波振幅和功率因数具有更明显的影响。随着热泵和大功率空调的快速发展，接入电网的三相器件的数量不断增加。因此，为了保持电能质量并节约能源，对三相系统的功率因数和 iTHD 的要求变得越来越严格。

高效、高性能功率因数校正 (PFC) 技术广泛应用于三相交流/直流整流器件，以符合电流谐波标准。Vienna PFC 拓扑以低成本、高可靠性和高功率密度而闻名，被广泛应用于三相交流/直流整流器。德州仪器 (TI) 为全球客户提供各种 PFC 技术参考设计，并提供了全面的模拟器件和微控制器单元 (MCU) 选项，大幅降低了工程项目的研发周期和相关成本。

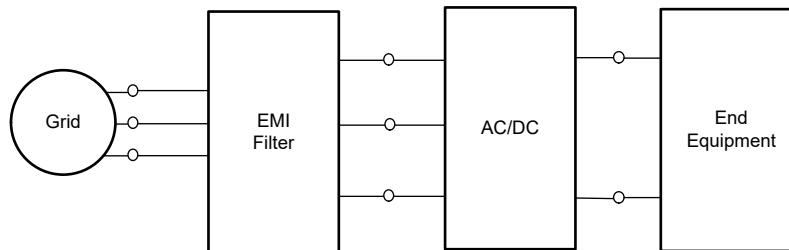


图 1-1. 三相交流输入系统框图

2 三相 PFC 系统的技术趋势

随着热泵、大功率空调和 EV 充电站市场的增长，三相输入设备的规模正在迅速扩大。例如，全球热泵市场增长率为 12%，欧洲热泵市场增长率高达 20%。在蓬勃的市场前景的推动下，对三相系统的 PFC 技术的研究不断加深，这些系统的标准规范也在不断更新。

三相 PFC 系统的技术趋势包括：

- 开发新型 PFC 拓扑：借助电力电子器件和嵌入式处理器的发展，满足各种应用要求和系统性能需求。
- 利用数字控制方法：这对于额定功率超过 3.3kW 的器件尤其重要，因为此类器件的高功率特性要求抗干扰性和可靠性，而模拟控制方案可能无法提供。采用高性能、具有成本效益的 MCU，如 C2000 系列：用于提升响应速度和控制精度，实现更复杂的策略。
- 在由多个子系统组成的大型三相系统中集成有源电源滤波器 (APF) 和 PFC：在电网侧使用集中式有源电源滤波器进行谐波补偿，从而在电流超过 50A 的系统中节省成本并提高稳定性。
- 追求高效率和高功率密度：使用 GaN 等第三代半导体帮助提高系统效率、减小散热器的尺寸和重量，并实现更高的开关频率，更大限度地减少大部分无源器件。
- 遵守严格的全球谐波标准：应对能源危机和电网质量的影响。在欧洲，EN/IEC 61000-3-2: 2019+A1: 2021 标准已于 2024 年 4 月 9 日强制执行。在中国，更新后的 GB 17625.1-2022 于 2024 年 7 月 1 日生效，扩大了范围，涵盖了更多具有严格电流谐波要求的三相设备。

TI 提供了一整套强大的霍尔效应电流传感器、隔离式运算放大器、隔离式栅极驱动器和 C2000 系列 MCU，以及全面的辅助电源解决方案。这些解决方案为全球用户提供了具有成本效益、高性能的模拟组件和 MCU，满足实现三相 PFC 系统的硬件要求。此外，TI 还提供适用于各种 PFC 拓扑的成熟系统方案参考设计，并分享软件和硬件设计资源，以促进 PFC 技术的应用和发展。

3 通过三相 PFC 满足对功率因数和 iTHD 的严格要求

三相 PFC 系统拓扑主要分为两种主要类型：无源 PFC 和有源 PFC。无源 PFC 系统主要由电感滤波器组成，无需控制即可运行，其功率因数通常为 0.9，电流谐波水平约为 30%。有源 PFC 拓扑包含其他半导体电源开关器件，由 MCU 控制。这些系统可以轻易地将功率因数增加到接近 1，并将电流谐波减少到 5% 以下。配备有源 PFC 拓扑的系统更容易实现 0.99 以上的功率因数。因此，三相 PFC 拓扑的主要挑战是满足电流谐波的严格要求。

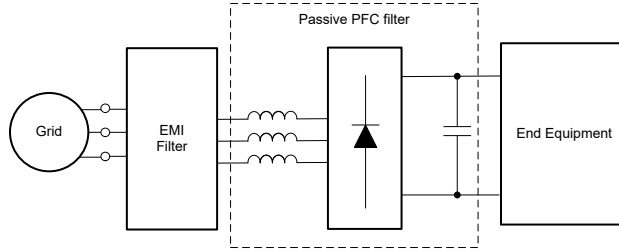


图 3-1. 三相无源 PFC 系统框图

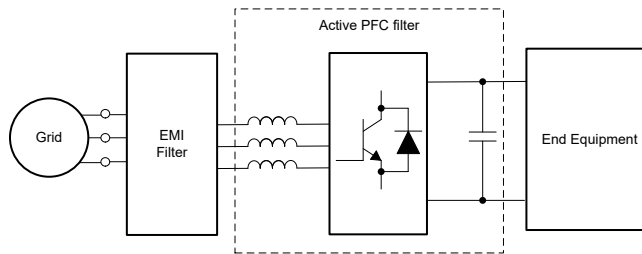


图 3-2. 三相有源 PFC 系统框图

过去，三相系统的电流谐波标准不太严格，不太明确，会使用无源滤波器进行功率因数校正并抑制电流谐波。但是，谐波电流仍然很大，并且无源器件既大又重。近年来，随着谐波标准越来越明确和严格，尤其是对于每相额定电流不超过 16A 的设备，有源 PFC 拓扑的采用呈现出不断增长的趋势。发生这种变化的原因在于，需要在实现高功率因数的同时保持低电流谐波电平。

3.1 电流谐波要求

例如，根据标准 EN/IEC 61000-3-2: 2019+A1: 2021，设备可分为四类：A、B、C 和 D，并指定了它们各自的谐波电流限值。此处讨论的平衡三相交流输入系统为 A 类器件。根据标准（详见表 3-1），A 类器件的谐波电流限制。

表 3-1. A 类设备的限制

谐波次数 h	允许的最大谐波电流 A
奇数谐波	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$
偶数谐波	
2	1.08
4	0.43
6	0.30

表 3-1. A 类设备的限制 (续)

谐波次数 h	允许的最大谐波电流 A
奇数谐波	
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$

表中显示，IEC 主要设定截至第 40 次的谐波振幅限值，这些谐波振幅被视为绝对值，与基波电流振幅无关。该标准未规定总谐波失真的限制。然而，三相有源 PFC 的典型设计目标是实现低于 5% 的 iTHD。

3.2 三相 PFC 拓扑

市场上目前有多种成熟的有源 PFC 拓扑结构，如两级 PFC、T 型 PFC 和 Vienna PFC。两级 PFC 整流器拓扑简化了对双向功率流的控制，在逆变器和整流器模式下均能有效运行。由于有成熟的控制理论，该拓扑可实现可控和连续的输入电流，因此可轻松实现高功率因数和低 iTHD。但是，功率器件的开关应力很大，与输出电压电平等效，这意味着通常需要至少 1200V 的额定电压，增加了成本。为防止桥臂中发生击穿，两级 PFC 必须在设计中加入足够的死区时间，但这会影响系统的控制性能和可靠性。此外，两级拓扑具有更高的共模电压，对电磁干扰 (EMI) 抑制提出了更高的挑战。

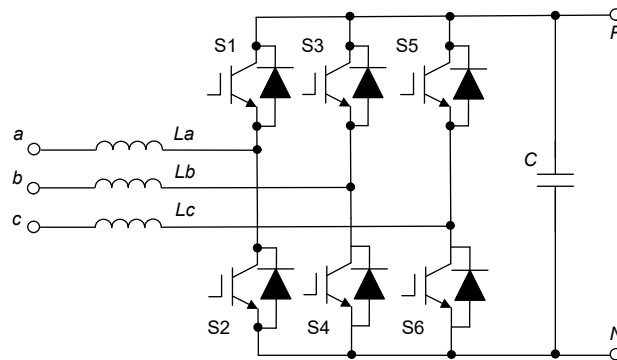


图 3-3. 两级 PFC

T 型 PFC 拓扑也有助于实现双向功率流，在两级 PFC 的基础上增加了六个额定电压为 600/650V 的功率开关器件，因此可以产生三个输出电压电平：0、+0.5V_{bus} 和 -0.5V_{bus}。与传统两级 PFC 相比，这一改进降低了电流纹波，减少了功率电感器的尺寸。此外，与两级拓扑相比，三级拓扑大幅降低了共模电压，从而提高了 EMI 性能。但是，由于死区时间的存在，可靠性和控制性能问题仍然存在。TI 提供 T 型 PFC 参考设计 [TIDA-01606](#) 作为参考。此外，此解决方案的成本较高，因此在对成本敏感的应用（如热泵和空调）中不太受欢迎。

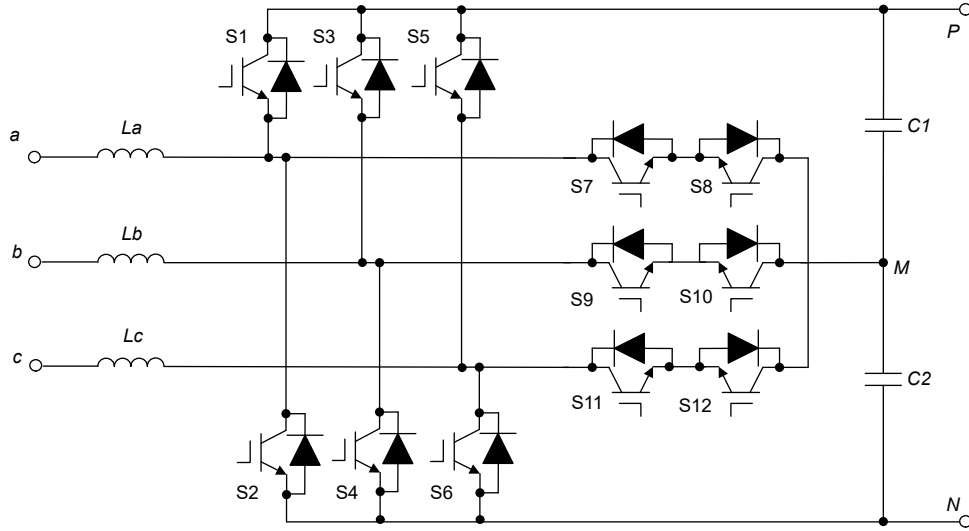


图 3-4. T 型 PFC

Vienna PFC 拓扑是一种三级设计，使用低成本肖特基二极管替代 T 型 PFC 中的六个 1200V 高压电源开关器件。尽管从电网到负载的功率流动是单向的，但这大幅降低了系统成本。虽然用于有源三相功率因数转换的拓扑非常多，但 Vienna 整流器仍然颇受青睐，因为它以连续导通模式 (CCM) 运行，具有固有的多级开关（三级），并且可以降低功率器件上的电压应力。桥臂被无源二极管取代，因此无需死区时间，简化了控制策略并提高了控制性能和系统效率。Vienna PFC 的共模电压与 T 型 PFC 相当，可实现良好的 EMI 性能。TI 已经提供 2.4kW Vienna PFC 参考设计 [TIDM-1000](#)，不久之后还将推出低成本的 10kW Vienna PFC 参考设计。

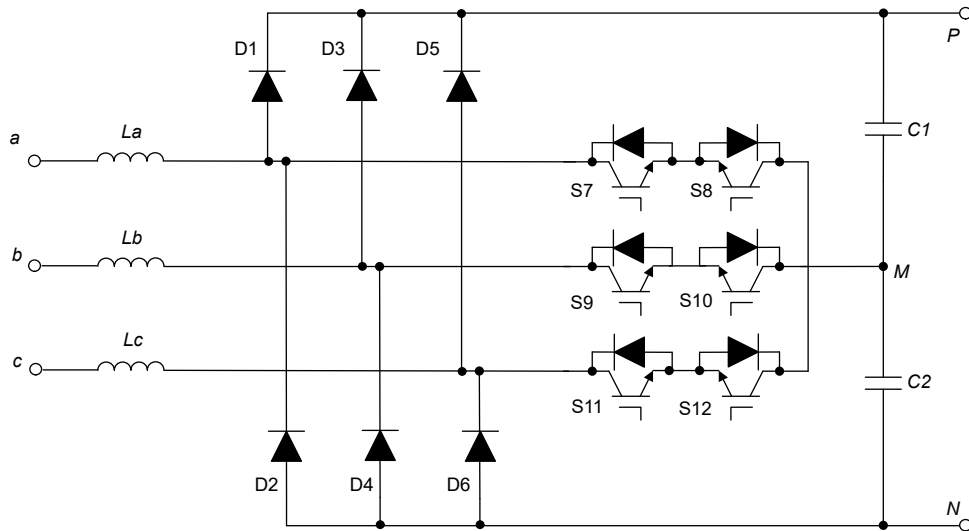


图 3-5. Vienna PFC

此外，TI 将无源 PFC 拓扑与三种常用的有源 PFC 拓扑进行比较和总结，如表 3-2 所示。

表 3-2. PFC 拓扑的优缺点

	无源	2 级	T 型	Vienna
iTHD	非常高	高	低	低

表 3-2. PFC 拓扑的优缺点 (续)

	无源	2 级	T 型	Vienna
功率因数	低	高	高	高
电感器尺寸	非常大	大	低	低
EMI	简单	困难	简单	简单
控制	不需要	复杂	复杂	简单
双向	否	是	是	否
成本	高	高	高	低

总之，Vienna PFC 具有低成本、高性能、高可靠性和高功率密度等优势。考虑到热泵、三相空调和电动汽车充电站的市场规模明显增大的趋势，以及对电流谐波的要求越来越严格，Vienna PFC 预计将越来越多地集成到三相系统中。

4 Vienna PFC 系统解决方案和仿真

为帮助全球客户快速实施 Vienna PFC 以满足三相系统的功率因数和电流谐波需求，TI 为 Vienna PFC 提供了一个全面的硬件和软件解决方案。硬件解决方案包括用于隔离式采样、隔离式驱动、主控制 MCU 和辅助电源的组件。此软件解决方案包含完全开源算法代码。TI 开展了 Vienna PFC 的建模和仿真来帮助客户测试和研究控制算法。此外，TI 的 C2000 系列 MCU 支持在 Matlab/Simulink 中进行外设配置和生成代码，因此可以将仿真模型直接编译为可执行代码，该代码可刷写到 MCU 中进行操作。

4.1 Vienna PFC 系统解决方案

TI 为热泵和高功率三相空调系统提供了具有成本效益的 Vienna PFC 解决方案，该解决方案能够处理高达 10kW 的输入功率。图 4-1 所示为框图。

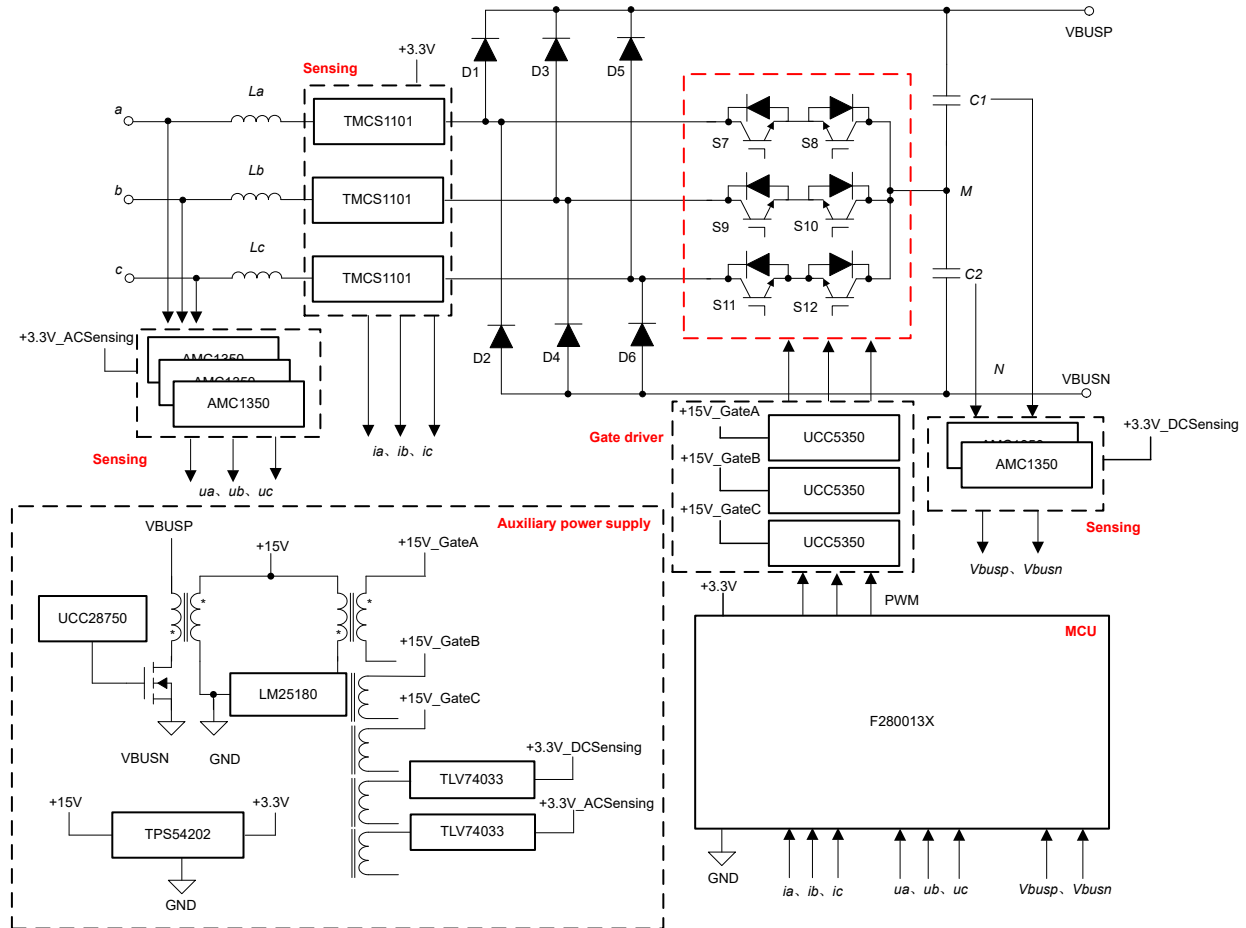


图 4-1. Vienna PFC 系统解决方案

在该系统解决方案中，选择 TMS320F280013x 作为主 MCU。该器件是 C2000™ 可扩展、超低延时实时微控制器器件系列中的一款，专为提高电力电子应用的效率而设计。实时控制子系统基于 TI 的 32 位 C28x DSP 内核，可针对从片上闪存或 SRAM 运行的浮点或定点代码提供 120MHz 的信号处理性能。三角函数加速器 (TMU) 和循环冗余校验 (VCR) 扩展指令集进一步增强了 C28x CPU 的性能，从而加快了实时控制系统关键常用算法的速度。高性能模拟模块集成在 F280013x 实时微控制器 (MCU) 上，并与处理单元和 PWM 单元紧密耦合，以提供更好的实时信号链性能。

F280013x 系列具有四个内部窗口比较器，包括用于阈值设置的内部 DAC，可以针对三相电流和输出电压的过流和过压提供硬件保护，并直接触发 PWM TZ 信号以关闭 PWM 信号。它将极大地减少保护延迟并提高系统可靠性。

采样部分采用完全隔离的方案以确保系统可靠性。选择 AMC1350 执行电压采样。该器件是一款高精度隔离式放大器，通过磁场抗扰度较高的隔离栅隔离输出和输入电路。出色的精度和低温漂支持在各种应用中进行精确的交流 and 直流电压检测。

选择 **TMCS1101** 执行电流采样。该器件是一款精密霍尔效应电流传感器，具有 **600V** 基本隔离工作电压、整个温度范围内小于 **1.5%** 的满量程误差以及可提供单向和双向电流检测的器件选项。该器件可用于交流和直流电流测量，其带宽为 **80kHz**。

选择 **UCC5350** 作为栅极驱动器来驱动两个 IGBT。**UCC5350** 是一款隔离式单通道栅极驱动器，其峰值拉电流为 **5A**，峰值灌电流为 **5A**。器件设计用于驱动 MOSFET、IGBT、SiC MOSFET，将晶体管的栅极连接到内部钳位，以防止米勒电流造成假接通。

为了方便接线和满足绝缘要求，辅助电源采用两级设计。前级使用 **UCC28750** 将高压总线电压降低到 **15V**。**TPS54202** 用于为 MCU 电源输出 **3.3V** 电压，**LM25180** 用于输出 **5** 通道隔离式电源，用于对后级中的电路进行采样和驱动。

UCC28750 是一款反激式控制器，采用来自次级侧的光耦合器反馈来提供高性能电压调节。控制律可在整个负载范围内实现高效率，从而支持不连续导通模式 (DCM) 和连续导通模式 (CCM) 设计。

LM25180 是一款初级侧稳压 (PSR) 反激式转换器，在 **4.5V** 至 **42V** 的宽输入范围内具有高效率。隔离输出电压采样自初级侧反激式电压，因此，无需使用光耦合器、电压基准或变压器的第三绕组进行输出电压稳压。

TPS54202 是一款具有两个集成 N 通道 MOSFET 的 **28V**、**2A** 同步降压转换器，广泛用于电器行业，通常用于为 MCU、栅极驱动器或放大器等供电设备供电。经过优化的内部补偿网络更大限度地减少了外部元件数量，并简化了控制环路设计。

TLV74033 低压降 (LDO) 线性稳压器是一款低静态电流 LDO，具有出色的线路和负载瞬态性能，专为对功耗敏感的应用设计。在 **3.3V** 固定输出电压下，该器件可提供最大输出电流 **300mA**。

4.2 仿真

为了深入了解并肯定 Vienna PFC 控制算法的可行性和功效，TI 根据 Matlab/Simulink 制作了 Vienna PFC 仿真模型。研发人员可将此模型用作工具，轻松将仿真结果与实际测试波形分离，协助解决调试过程中遇到的问题。

表 4-1 中描绘了仿真参数。

表 4-1. 仿真参数

参数	规格
输入交流电压 (相位)	220V
电感器	400uH
输出电容器	470 μ F*2+470 μ F*2
开关频率	40kHz
输出直流电压	650V
仿真采样时间	50ns

10kW 时的仿真结果如图 4-2 所示。

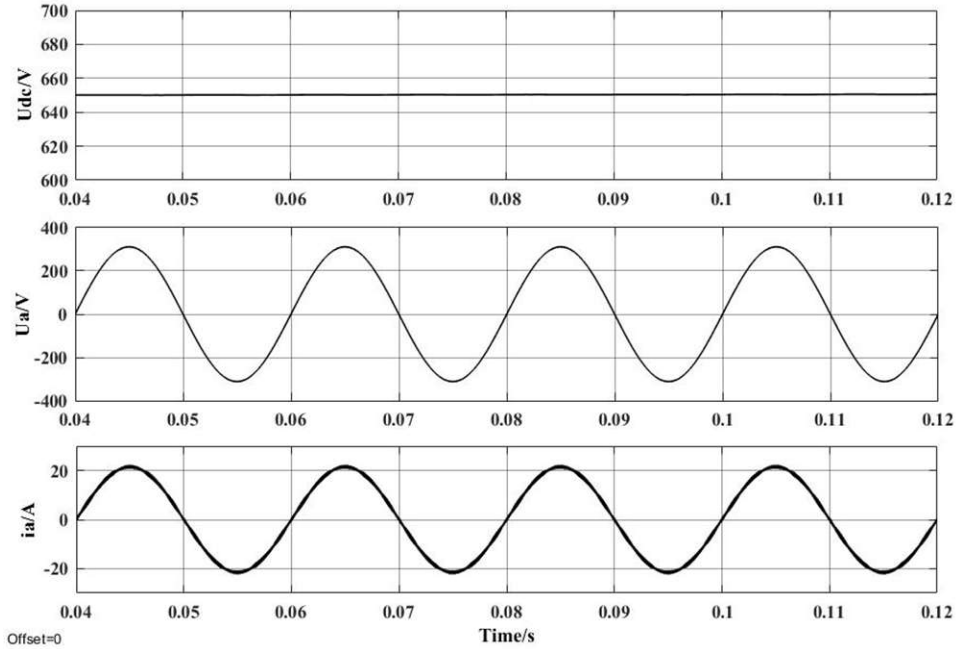


图 4-2. 10kW 时的 Vienna PFC 仿真波形

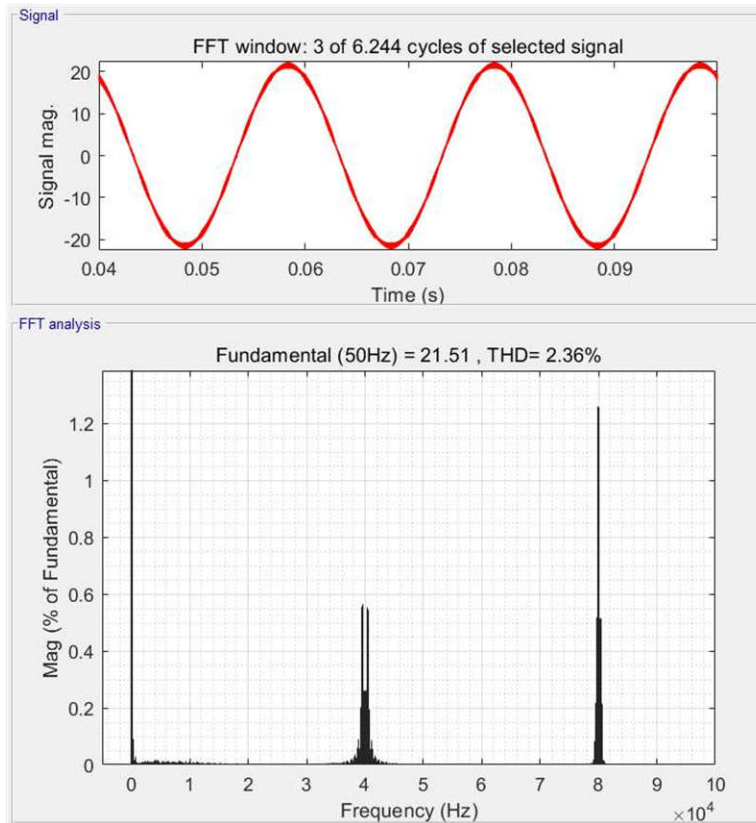
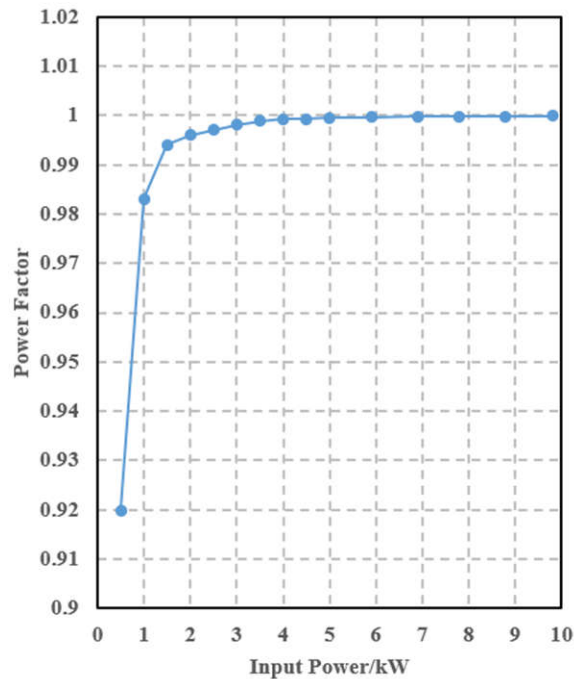


图 4-3. 10kW 时的 Vienna PFC iTHD

根据此处显示的 THD 数据计算得出最大谐波频率为 100kHz，而 IEC 61000-3-2 定义的 THD 计算公式中使用的最大谐波频率为基频的 40 倍，即 2kHz。因此，这里提供了有关 Vienna PFC 在各种输入功率列表中的功率因数和 iTHD (高达 2kHz 和 100kHz) 的表格。

表 4-2. 仿真结果

输入功率/kW	Ia_rms/A	输出电压/V	PF	iTHD/% (高达 2kHz)	iTHD/% (高达 100kHz)
0.5	0.86	650	0.9198	53.4	53.5
1	1.57	650	0.983	7.43	25.49
1.5	2.3	650	0.994	1.23	16.4
2	3.05	650	0.996	0.26	12.29
2.5	3.8	650	0.997	0.26	9.41
3	4.59	650	0.998	0.22	7.85
3.5	5.35	650	0.9989	0.21	6.73
4	6.1	650	0.9992	0.18	5.89
4.5	6.86	650	0.9993	0.18	5.24
5	7.61	650	0.9995	0.17	4.72
6	9	650	0.9996	0.15	3.92
7	10.48	650	0.9997	0.14	3.37
8	11.95	650	0.9998	0.13	2.95
9	13.42	650	0.9998	0.13	2.62
10	14.88	650	0.9999	0.13	2.36


图 4-4. Vienna PFC 功率因数仿真结果

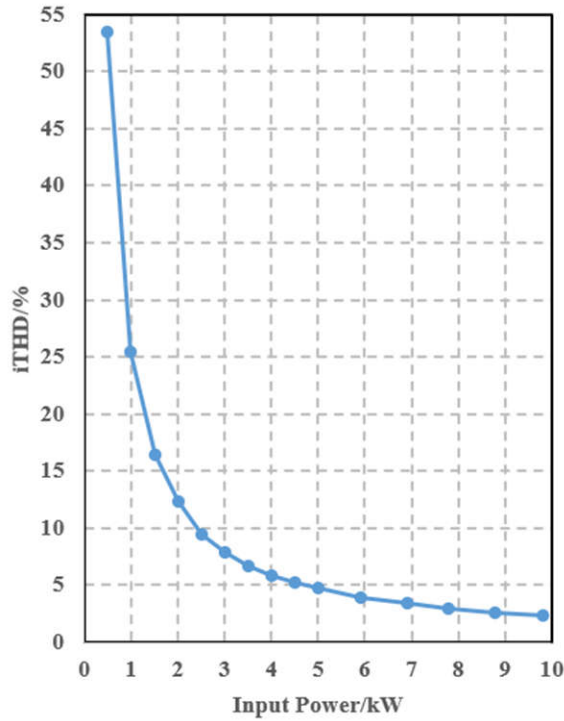


图 4-5. Vienna PFC iTHD (100kHz) 仿真结果

需要注意的是，仿真模型没有考虑采样噪声、采样延时以及电路板上存在的寄生电感和电容等因素，因此，仿真结果可能会略微超过从实际实验测试中获得的数据。

4.3 基于 MATLAB/Simulink 的 C2000 代码生成

基于 MathWorks 模型的方法可加快开发速度，只需更少的工程资源，而且无需软件专业知识。它将控制算法开发与固件开发分离，并且可在 C2000 微控制器产品系列之间移植。仿真功能支持离线开发、调优和控制算法验证。

例如，在电机控制中，图 4-6 展示了永磁同步电机 (PMSM) 的磁场定向控制 (FOC) 控制器仿真模型。它与 TIDA-010265 硬件平台兼容，允许生成代码并将其直接编程到 TIDA010265 硬件中执行。如需了解详细的模型和硬件信息，请查看 `C:\ti\c2000\C2000Ware_MotorControl_SDK_x_0x_00_00\solutions\tida_010265_wminv`。

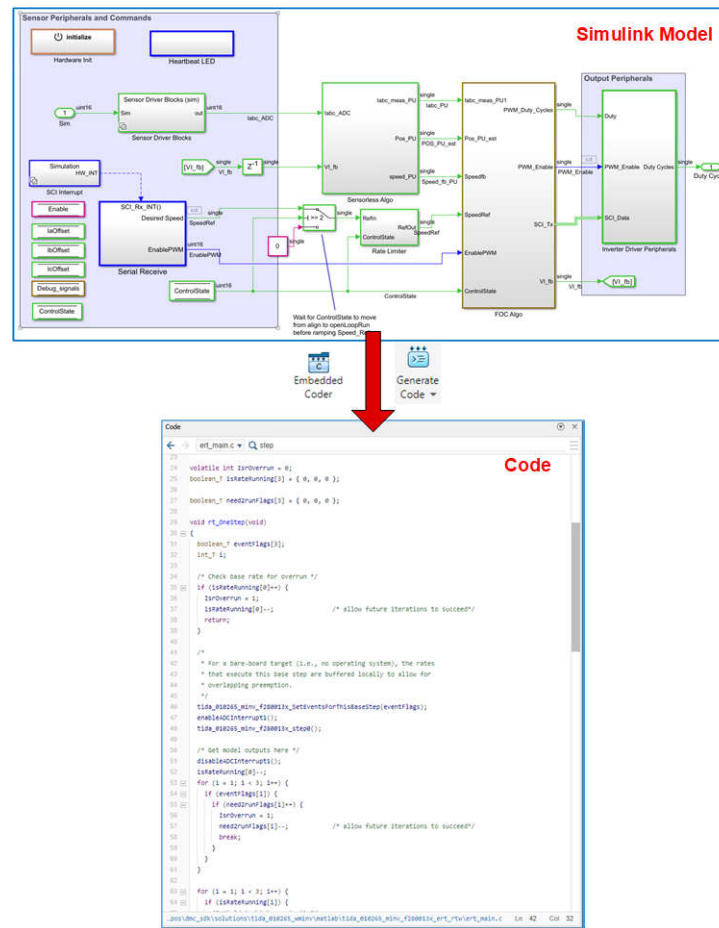


图 4-6. 使用 Embedded Coder 工具从模型生成嵌入式 C 控制代码

仿真模型可验证控制策略并生成代码，无需 Code Composer Studio™ (CCS) 即可执行烧录操作。此编译和编程过程需要使用 C2000 SDK、C2000 编译器和 CCS 软件，因此必须在初始使用期间设置适当的路径。该模型还可以直接生成可由 CCS 读取的项目，便于修改和优化代码。

TI 将为更多的参考设计提供更多 Matlab/Simulink 仿真模型和代码生成解决方案。

5 参考资料

1. EN/IEC 61000-3-2 电磁兼容性 (EMC) - 第 3-2 部分：限值 - 谐波电流发射限值 (设备输入电流 ≤ 16A 每相)，国际电工委员会，版本 2019+A1:2021，2021-04
2. GB 17625.1-2022 电磁兼容性 - 限制 - 第 1 部分：谐波电流发射限制 (设备输入电流 ≤ 16A 每相)，2022-12
3. [TIDA-01606](#)
4. [TIDM-1000](#)

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司