

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

采用数字控制器 XDPP1100-Q024、OptiMOS™ 6 80 V ISC031N08NM6（最大导通电阻 3.3 mΩ）、OptiMOS™ 5 25 V IQE006NE2LM5（最大导通电阻 0.65 mΩ），EiceDRIVER™ 栅极驱动器 2EDL803X-G3C 及 2DIB0410F ISOFACE™ 双通道数字隔离器

关于本文档



范围和目的

本文档介绍了一款高效 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的设计与性能，适用于 48 V 中间总线变换器应用。该参考板的输入电压范围为 42–60 V DC，输出电压范围为 10–15 V DC，功率密度达 564 W/in³（34.6 W/cm³），峰值效率达 97.3%。该板无需散热片即可提供 80 A 的输出电流，若安装散热片则可实现更高功率等级。凭借 LLC 变换器的软开关特性，该板同时具备出色的 EMI 性能。

该 LLC 四分之一砖型变换器的初级全桥采用 OptiMOS™ 6 80 V 功率 MOSFET（ISC031N08NM6，最大导通电阻 3 mΩ），次级全桥采用 OptiMOS™ 5 25 V 功率 MOSFET（IQE006NE2LM5，最大导通电阻 0.65 mΩ）作为同步整流器（SR）。英飞凌功率晶体管凭借其卓越特性，实现了极低的损耗，在提升效率和功率密度的同时，具备高功率处理能力。初级和次级 MOSFET 均由 EiceDRIVER™ 栅极驱动器 2EDL8034-G3C（SON-10 3 mm × 3 mm 封装）驱动。英飞凌 2DIB0410F ISOFACE 双通道数字隔离器采用无芯技术，为驱动初级栅极驱动器提供高抗噪性和稳健的隔离通信。本设计采用英飞凌数字电源控制器 XDPP1100-Q024—业界体积最小的、带 PMBus 接口的数字控制器，为效率优化、软启动实现和增强保护提供了极大的灵活性。

该参考板遵循大电流四分之一砖型的 DOSA 标准机械外形。参考板设计为测试平台，板上测试点易于探针接触，元器件便于返修与更换。

目标读者

本应用笔记面向电源设计工程师。

本应用笔记的原文使用英文撰写。为方便起见，英飞凌提供了译文；由于翻译过程中可能使用了自动化工具，英飞凌不保证译文的准确性。为确认准确性，请务必访问 [infineon.com](https://www.infineon.com) 参考最新的英文版本（控制文档）。

目录

目录

关于本文档	1
目录	2
1 引言与设计考量	3
1.1 系统描述	6
1.2 谐振腔设计	7
1.3 SR 时序	10
1.4 软启动	11
1.5 故障保护	12
2 电源板信息	13
2.1 规格参数	13
2.2 原理图	13
2.3 变压器	16
2.4 电路板布局	17
2.5 功率损耗分析	19
2.6 散热方案与测试配置	20
3 实验结果	22
3.1 稳态波形	22
3.2 启动波形	23
3.3 输出 PARD	25
3.4 负载瞬变响应	26
3.5 输出 SCP	27
3.6 效率	28
3.7 热成像图	29
4 总结	32
5 附录	33
5.1 机械外形图	33
5.2 物料清单	34
参考文献	37
修订记录	38
免责声明	39

引言与设计考量

1 引言与设计考量

中间总线变换器 (IBC) 已广泛应用于电信、数据中心、服务器及其他工业领域。IBC 的发展趋势为提高功率密度并优化成本。由于须尽量减小散热量，高效率成为提高功率密度的关键。此外，更高的效率可直接降低变换器整个生命周期的拥有成本。

IBC 提供电气隔离，并将 48 V 总线电压转换为中间低电平电压，为下游负载点稳压器供电。根据系统对电压变化范围的需求，理想的 IBC 可为全稳压型、半稳压型或非稳压型。非稳压型 IBC，也称 DC 变压器 (DCX)，通常可实现更高的效率和功率密度，适用于输入电压范围较窄的应用场景。LLC 谐振拓扑是非稳压型中间总线变换的理想选择，它使变换器始终处于谐振状态，从而在全负载和全电压范围内实现最佳性能。

本文档介绍了一款 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的设计与性能。该变换器为非稳压型，转换比约为 4:1，输入电压范围为 42–60 V DC，输出电压范围为 10–15 V DC。参考板采用英飞凌先进半导体技术，功率密度达 564 W/in³ (34.6 W/cm³)，峰值效率达 97.3%。该板无需散热片即可提供 80 A 的输出电流。得益于 LLC 变换器的软开关特性，该板具备出色的 EMI 性能。该板遵循大电流四分之一砖型的 DOSA 标准机械外形。

LLC 四分之一砖型变换器的初级全桥采用 OptiMOS™ 6 80 V MOSFET (ISC031N08NM6)。英飞凌 OptiMOS™ 6 功率 MOSFET 采用薄晶圆技术，具备新一代前沿创新与业界领先性能。与同类产品相比，该系列产品具有更低的导通电阻及更优的品质因数 ($FOM = R_{DS(on)} \times \text{栅极电荷}$)，有助于设计人员提高效率并降低系统成本。[1]

次级全桥采用 OptiMOS™ 5 25 V MOSFET (IQE006NE2LM5) 作为 SR。该器件采用源极向下的 PQFN 3.3 mm × 3.3 mm 创新封装，在 MOSFET 性能方面树立了行业标杆。与现有技术相比，源极向下技术可将 $R_{DS(on)}$ 降低达 30%。与现有 PQFN 封装相比，结壳热阻也得到显著改善。此外，更低的寄生参数、更优的 PCB 损耗及卓越的散热性能，也为当代工程设计带来了显著的价值。[2]

EiceDRIVER™ 栅极驱动器 2EDL8034G3C 用于驱动初级和次级 MOSFET。2EDL8034G3C 是一款具有电平移位功能的高边低边双通道驱动器，具备 4 A 拉电流能力和 6 A 灌电流能力。2EDL8034 的输入引脚支持 TTL 逻辑电平，且不受供电电压影响。输入引脚可承受 -10 V 至 20 V 的电压，使器件能与多种模拟和数字控制器兼容。输入级内置滞回特性，可增强抗噪能力。低边和高边栅极驱动器彼此独立控制，两者导通与关断动作间的典型偏差时间为 2 ns。[3]

英飞凌 2DIB0410F ISOFACE™ 双通道数字隔离器采用无芯技术，为驱动初级栅极驱动器提供高抗噪性和稳健的隔离通信。器件提供 3 kV_{rms} 隔离电压，并在宽环境工作温度范围 (-40°C 至 +125°C) 内支持高达 40 Mbps 的稳健数据传输速率。[4]

设计中采用英飞凌数字电源控制器 XDPP1100-Q024，为效率优化、软启动实现和增强保护提供了极大的灵活性。XDPP1100-Q024 是业界最小的带 PMBus 接口的数字电源控制器，采用 24 引脚 VQFN 4 mm × 4 mm 封装。器件集成多种优化电源控制处理模块和预编程外设，有助于提升隔离型 DC-DC 变换器的性能，减少外部元器件数量，并大幅降低固件开发工作量。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

该控制器还提供精确的遥测功能和电源管理总线 (PMBus 1.3) 接口, 用于系统通信、高级电源转换及监测。高性能 AFE、基于状态机的数字控制环路, 以及 Arm® Cortex® M0 三者集成于单一芯片, 使 XDPP1100 成为面向现代高端电源系统的一款高度集成、完全可编程且可快速上市的技术方案, 应用于电信基础设施、48 V 服务器主板、数据中心及工业 4.0 等领域。[5]

有关该数字控制器配置及附加功能的更多详细信息, 可参见 XDPP1100 应用笔记 [6]。英飞凌提供配套支持工具, 例如配套的 XDPP1100 图形用户界面 (GUI), 可供客户配置和监测 XDPP1100 的关键参数。XDPP1100 GUI 工具的下载地址可参见 [7]。

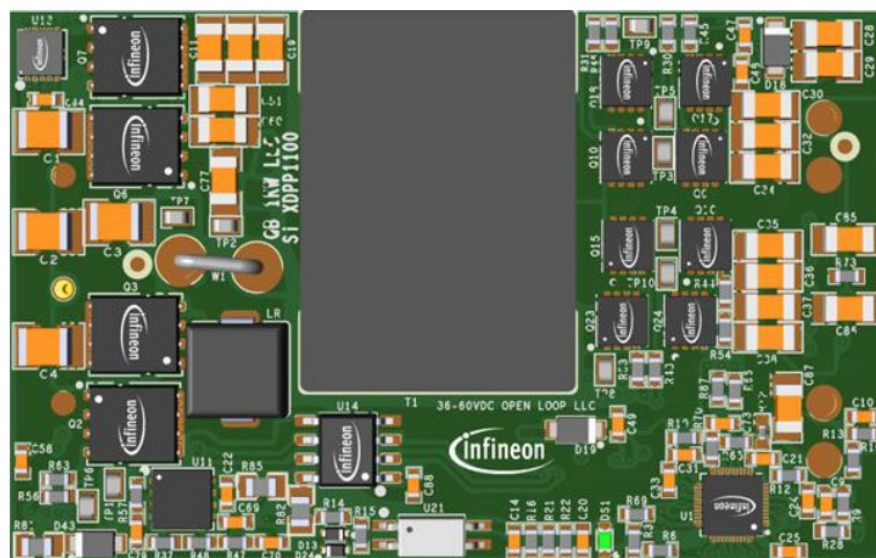
此外, 开发人员可完全掌控其应用和固件的开发流程。英飞凌支持设计人员在任何基于 Arm® 的常用开发环境中开发和编译定制化固件。

有关英飞凌半导体的更多信息, 可访问[英飞凌官网](#)、英飞凌[评估板](#)搜索工具, 以及本设计中各元器件的产品网页:

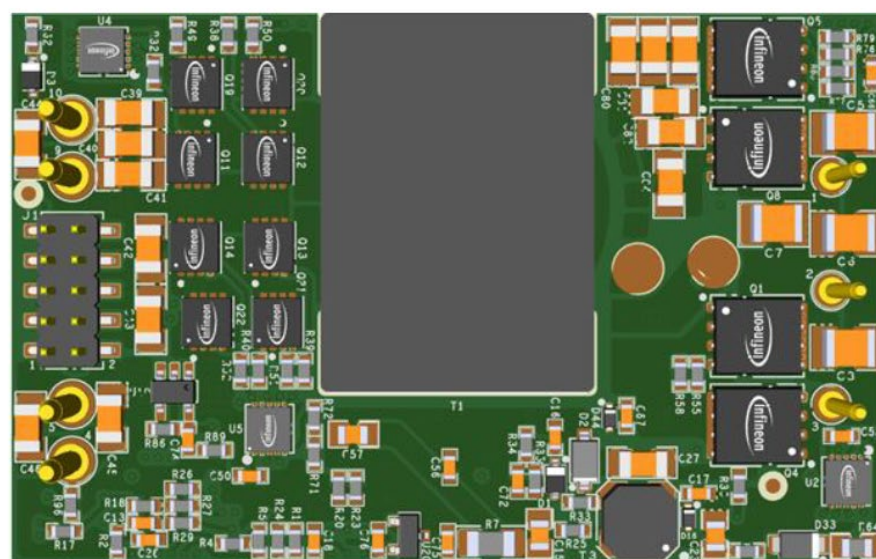
- [OptiMOS™ 功率 MOSFET](#)
- [栅极驱动器 IC](#)
- [XDP™ 数字电源控制器](#)
- [ISOFACE™ 数字隔离器](#)

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量



Top view



Bottom view (flipped)

图 1 英飞凌 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器参考板概览

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

1.1 系统描述

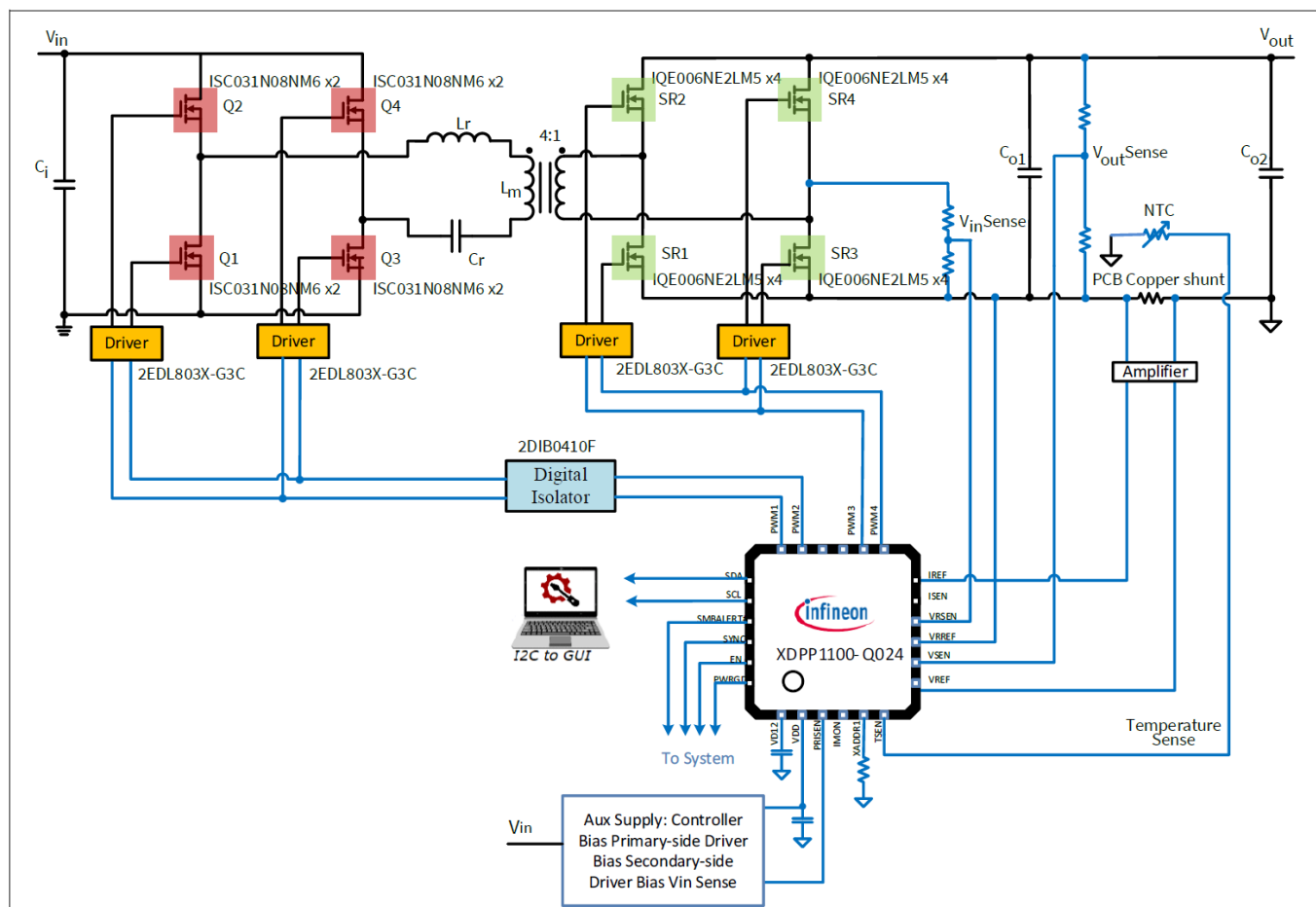


图 2 英飞凌 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器—简化框图

LLC 四分之一砖型变换器的框图如图 2 所示。该变换器由初级全桥、次级全桥、谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 以及一个 4:1 平面变压器组成。其输入电压范围为 42–60 V DC，输出电压范围为 10–15 V DC。该变换器为非稳压型，以固定开关频率工作在谐振状态，并在全负载和全电压范围内实现所有开关的零电压开关（ZVS）。初级和次级 FET 的电压应力分别等于输入电压和输出电压，且无振铃现象。因此，初级采用 80 V MOSFET ISC031N08NM6，次级采用 25 V MOSFET IQE006NE2LM5。ISC031N08NM6 具备优异的 FOM 和卓越的开关性能。其低输出电容降低了 LLC 变换器中 ZVS 所需的励磁电流，有助于最小化导通损耗。IQE006NE2LM5 拥有业界领先的 $R_{DS(on)}$ ，显著降低了 LLC 变换器中 SR 的导通损耗。其紧凑的封装尺寸（PQFN 3.3 mm × 3.3 mm 封装）允许在给定空间内并联更多 FET，可进一步降低导通损耗并提升热管理性能。

本设计采用业界最小的数字电源控制器 XDPP1100-Q024，以提升性能、减少外部元器件数量并最小化固件开发工作量。XDPP1100-Q024 在固定频率 LLC 四分之一砖型变换器中发挥着重要作用。首先，借助数字控

引言与设计考量

制器，可优化 SR 时序以实现最佳效率。其次，数字控制器可轻松实现占空比/频率混合软启动，大幅降低启动过程中的电流应力。第三，数字控制器为变换器提供了增强的保护功能，包括过压保护（OVP），欠压保护（UVP）、过流保护（OCP）和输出短路保护（SCP）。数字控制器的具体功能将在 1.3、1.4 和 1.5 节中详述。

1.2 谐振腔设计

为实现最优效率，开关频率 f_{sw} 选定为 310 kHz。在固定开关频率下，LLC 变换器在全输入电压和全负载范围内均工作在谐振状态。谐振腔的电压增益约为 1。谐振腔的设计如下（见公式 1）。

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r+L_k)C_r}} = f_{sw}$$

公式 1

由于无需稳压调节，本设计中 L_r 和 C_r 的取值对系统运行的影响不像在稳压型 LLC 变换器中那样关键。从效率角度来看，较小的 L_r 更为理想，因为较小的 L_r 意味着更小的磁芯大小和更低的磁芯损耗。然而，过小的 L_r 会对启动和短路保护构成挑战。为降低启动过程中的电流应力并限制短路保护时的电流上升率，仍需一定的电感量。作为折中方案，本设计选用 85 nH 的电感 LP02-800-1S。需要注意的是，变压器的漏感 L_k 会计入总谐振电感。本设计采用了平面变压器，其具有极低且一致性极高的漏感（约 50 nH）。谐振电容 C_r 可根据公式 1 计算得出。在实际应用中， C_r 的确切值可通过调谐谐振波形确定。在本设计中， C_r 选定为 1.89 μF 。

为实现 ZVS，变压器的励磁电感 L_m 需足够小，使励磁电流能在死区时间内完全充放电初级 FET 的输出电容。随后体二极管导通，实现 ZVS。开关转换过程如图 3 所示。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

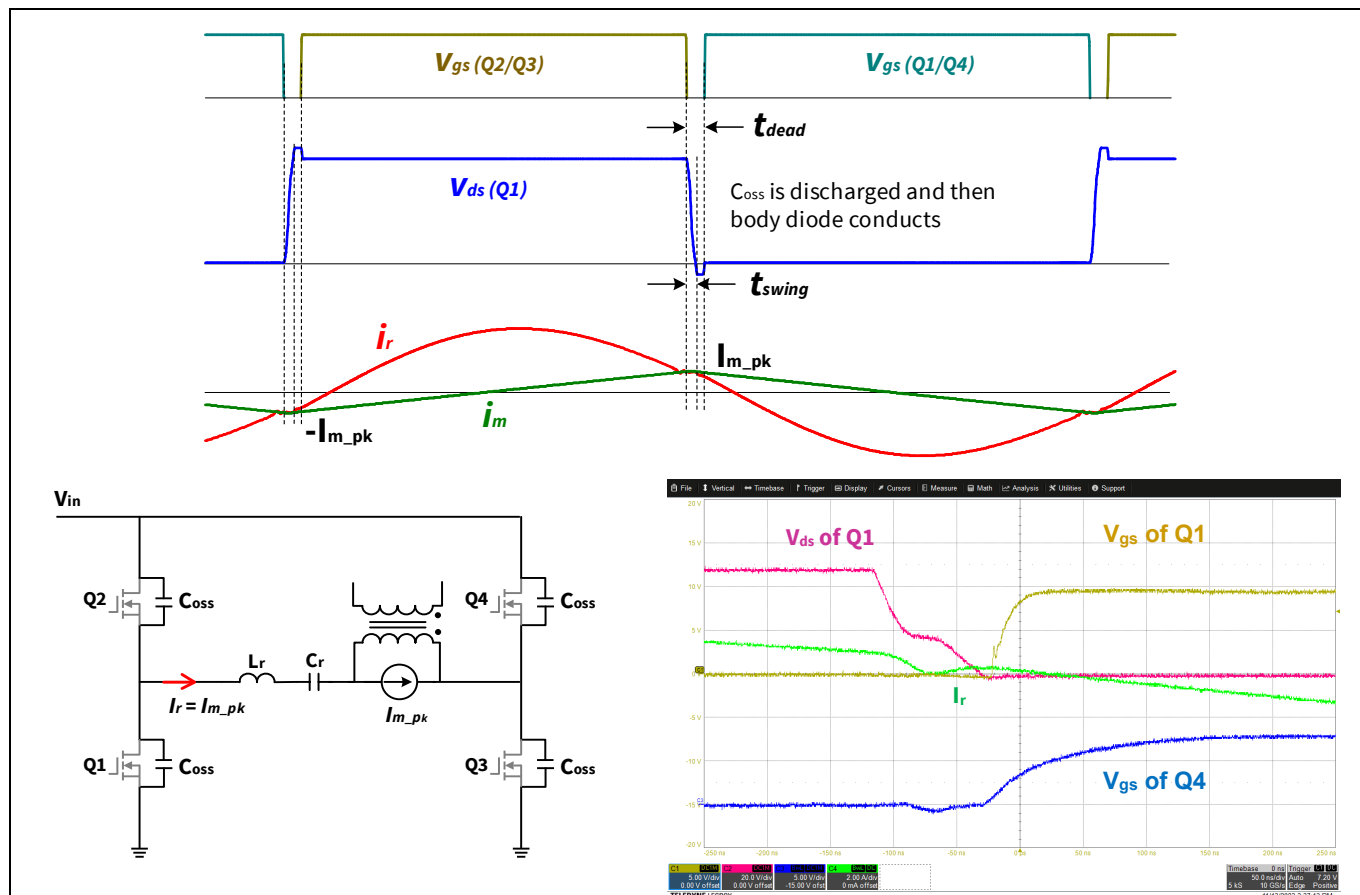


图 3 开关转换

实现 ZVS 时的最大 L_m 可参考公式 2 至公式 5 计算。

根据励磁电流波形, I_{m_pk} 可按以下方式计算:

$$nV_o = L_m \cdot \frac{2I_{m_pk}}{0.5T_{sw}}$$

公式 2

$$\text{其中, } I_{m_pk} = \frac{nV_o}{4L_m \cdot f_{sw}}$$

在开关转换期间, C_{oss} 由 I_{m_pk} 完成从 V_{in} 至零的充放电过程, 具体如下:

$$I_{m_pk} = 2m \cdot C_{ossAvg} \cdot \frac{V_{in}}{t_{swing}}$$

公式 3

$$\text{其中, } t_{swing} = \frac{2m \cdot C_{ossAvg} \cdot V_{in}}{I_{m_pk}}$$

死区时间必须大于 V_{ds} 摆动时间, 使体二极管能够导通, 从而确保实现 ZVS。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

$$t_{dead} > t_{swing}$$

公式 4

结合公式 2 至公式 4，最大 L_m 的计算公式如下：

$$L_m < \frac{t_{dead} \cdot nV_o}{8m \cdot C_{ossAvg} \cdot f_{sw} \cdot V_{in}} = \frac{t_{dead}}{8m \cdot C_{ossAvg} \cdot f_{sw}}$$

公式 5

此处假设 $nV_o = V_{in}$ ，即效率接近 100%。

此处 C_{ossAvg} 为每个 FET 在电压摆动期间的平均输出电容， m 为并联 FET 的数量。

注：由于 C_{oss} 随漏源电压而变化，因此应采用电压摆动期间 C_{oss} 的平均值。

在本设计中， $t_{dead} = 80 \text{ ns}$ ， $f_{sw} = 310 \text{ kHz}$ ， $m = 2$ ， $C_{ossAvg} \approx 1500 \text{ pF}$ 。根据公式 5， $L_m < 10.7 \mu\text{H}$ 。

死区时间的选取需综合权衡考量。若死区时间过短，则需要更大的励磁电流来对 C_{oss} 充放电，导致导通损耗增加。若死区时间过长，有效占空比降低，则导致无功率传输时环流损耗增加，这一问题在高频设计中尤为显著。

在本设计中，死区时间选定为 80 ns。为降低导通损耗，初级采用两个 ISC031N08NM6 MOSFET 并联。在 V_{ds} 电压从 V_{in} 摆动至 0 期间，每个 ISC031N08NM6 的平均 C_{oss} 约为 1500 pF，可参见 ISC031N08NM6 数据手册中的图 4。根据公式 2 至公式 5 的计算， L_m 需小于 10.7 μH 。本设计最终选定的励磁电感为 9 μH ，该数值通过在变压器磁芯之间增加两层聚酰亚胺薄膜胶带（气隙为 5 mil）实现。

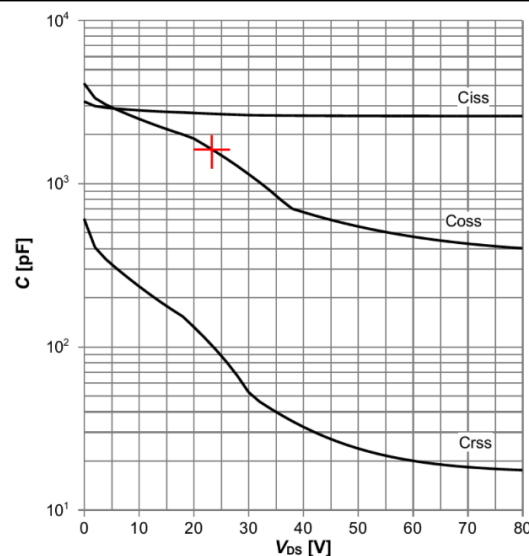


图 4 初级 MOSFET ISC031N08NM6 的电容曲线

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

基于本设计的谐振腔电压增益曲线如图 5 所示。验证表明：在整个负载范围内，谐振腔的电压增益约为 1，且对开关频率具有较宽的容差。

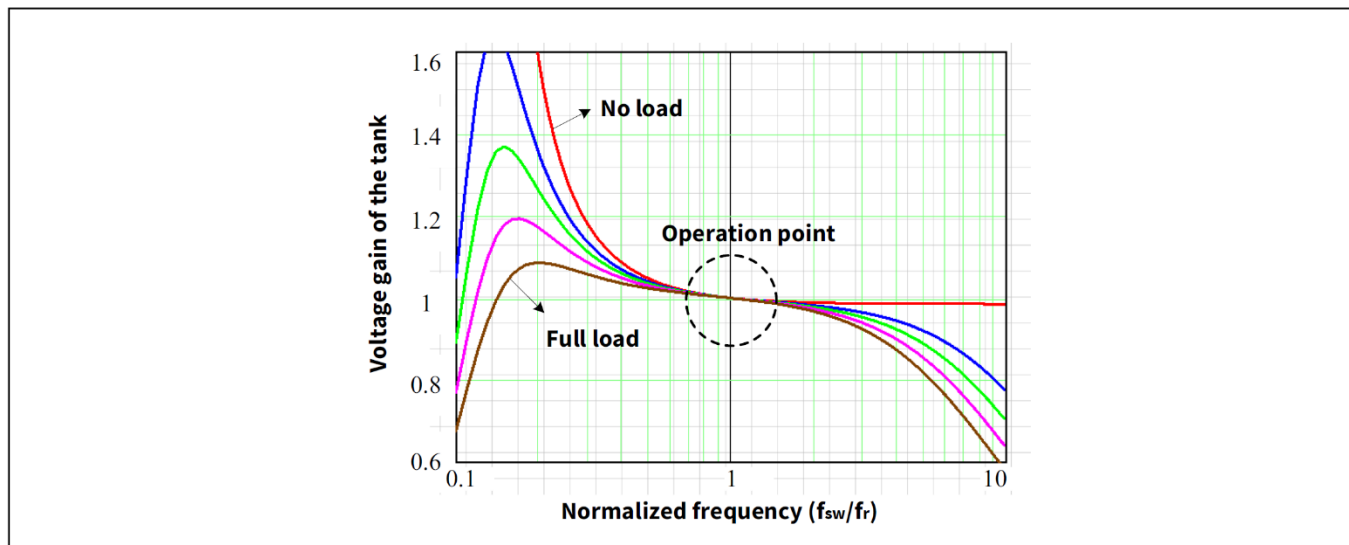


图 5 固定频率 LLC 变换器中谐振腔的电压增益曲线

1.3 SR 时序

初级栅极信号具有 50% 的占空比，并包含死区时间。次级 SR 的时序对效率优化至关重要。为最小化导通损耗，通常会采用多个 SR FET 并联的方案。由于多个 FET 并联且由单个驱动器驱动，其栅极信号的上升/下降速度远慢于初级 FET。因此，SR 的栅极下降沿必须早于初级栅极下降沿，以确保 SR 能先于初级 FET 关断。此外，SR 的实际关断时刻（即 V_{gs} 降至栅极阈值电压以下时）与初级 FET 的实际关断时刻之间，需预留一定的消隐时间（约 30 ns），以确保无负向电流流过 SR。另外，由于采用光耦合器将初级 PWM 信号与次级隔离，因此在数字控制器生成 PWM 信号时，必须考虑光耦合器的隔离延迟。该固定频率 LLC 变换器的理想时序图如图 6 所示。

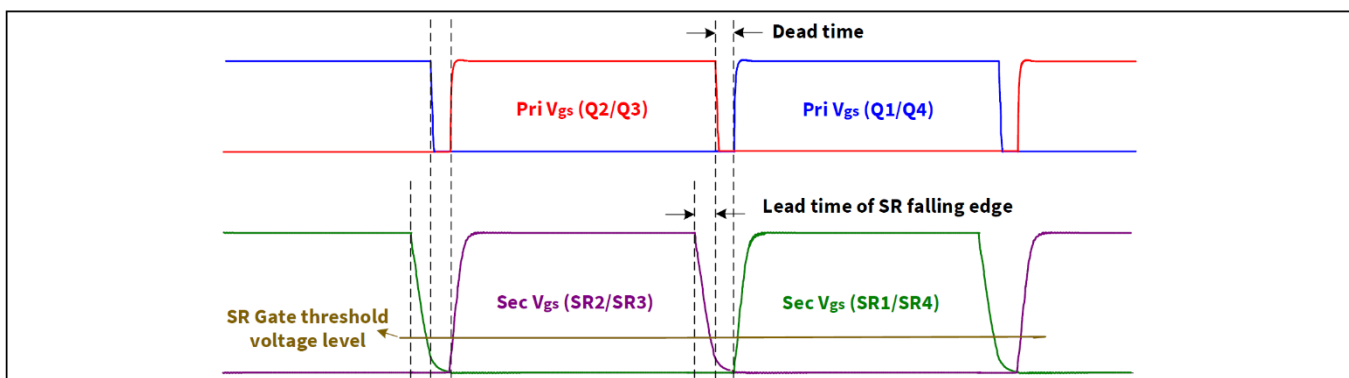


图 6 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的理想时序图

采用英飞凌数字控制器 XDPP1100-Q024，可轻松满足该 LLC 四分之一砖型变换器的上述时序要求。XDPP1100 在 PWM 配置方面具有极高的灵活性。每个 PWM 的上升沿延迟和下降沿延迟均可独立编程。图 7

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

引言与设计考量

展示了 GUI 中用于配置初级和次级 PWM 上升沿及下降沿的 PMBus 命令界面。最大延迟时间可设置至 318.75 ns，分辨率为 1.25 ns。有效的 PWM 信号以蓝绿色显示。

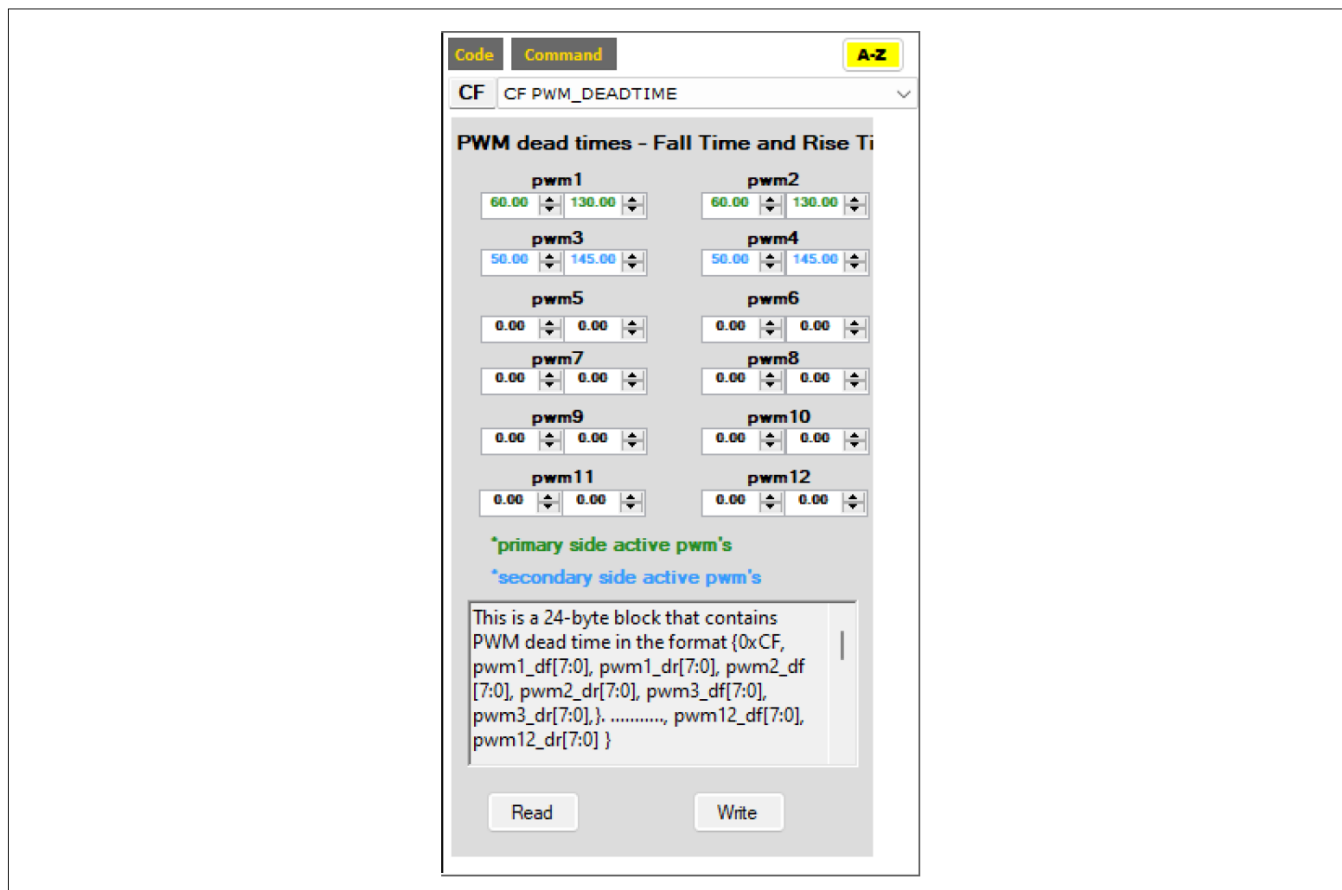


图 7 数字控制器 XDPP1100 的 PWM 上升沿和下降沿配置

1.4 软启动

为防止出现过高的电流应力，需采用软启动逐步建立输出电压。一种常见的启动方法是将开关频率从初始高值向下扫频至谐振点。变换器的最大开关频率受硬件限制（尤其受偏置电源驱动能力的限制）。如果允许的最大频率不够高（未达谐振频率的 3-4 倍以上），由于启动初期的电压增益不够低，仍可能产生较大的浪涌电流。

另一种软启动方法是在谐振频率下将占空比（含死区时间）从 0 爬升至近 50%。此时 LLC 变换器工作在 PWM 模式，可避免高初始浪涌电流。然而，由于谐振电感通常较小，变换器在谐振频率下工作时，尤其在严苛的恒流负载下启动时，仍可能承受极高的峰值电流。在 PWM 模式下，高电流应力还可能导致 FET 的 V_{ds} 产生较大振铃，增加启动过程中的电压应力。

本设计提出了一种占空比/频率混合软启动方案。在较高的开关频率（例如 500 kHz）下，占空比（含死区时间）从 0 逐渐爬升至近 50%。随后，将占空比固定在近 50%，同时开关频率从较高值逐渐降低至谐振频率（310 kHz）。由于变换器在较高开关频率下工作于 PWM 模式，因此可降低峰值电流。占空比/频率混合软启动的 PWM 序列如图 8 所示。

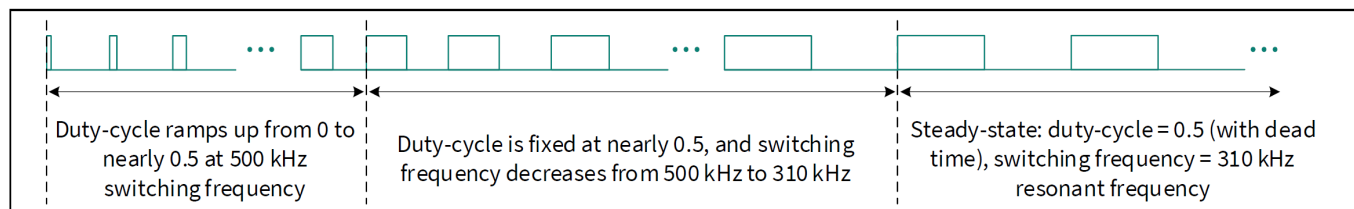


图 8 占空比/频率混合软启动的 PWM 序列

XDPP1100-Q024 数字控制器可轻松实现占空比/频率混合软启动。目前已针对启动流程开发了定制固件补丁，可将其加载至一次性可编程（OTP）存储器中。启动参数（如最大开关频率、占空比爬升时间以及频率下降时间）可通过 MFR PMBus 命令进行配置，用户可通过点击“Load PMBus Spread Sheet”按钮将相关参数导入至 GUI 中。PMBus 配置表可见 GUI 安装文件夹。

1.5 故障保护

XDPP1100-Q024 数字控制器配备两个 11 位电压检测 ADC（采样率为 50 MHz）、一个 9 位电流检测（CS）ADC（时钟速度为 25 MHz），以及一个 9 位通用遥测 ADC。该遥测 ADC 包含四个通道，可配置用于对电压、电流、阻抗和温度的数字化采集。XDPP1100-Q024 的上述专用硬件外设支持其为 LLC 四分之一砖型变换器提供更强的保护功能。

如图 2 所示，XDPP1100-Q024 控制器位于次级侧，负责检测输入电压、输出电压和输出电流。输出电压通过电阻分压器直接检测。输入电压则是在变压器次级侧的开关节点 V_{rect} 处检测，并根据电阻分压比及变压器匝数比计算得出，无需在输入电压检测中使用隔离运算放大器或其他类型隔离器。输出电流由配备放大器的 PCB 铜分流器进行检测。PCB 铜分流器的温度由 NTC 热敏电阻进行检测，并用于 CS 温度补偿。温度补偿旨在消除因过热导致的铜电阻漂移，从而在整个温度范围内实现精确的输出电流遥测。

通过 XDPP1100 GUI，可在 LLC 四分之一砖型变换器中配置三级过流保护（OCP）。第一级 OCP 由 IOUT_OC_FAULT 提供，该保护基于低通滤波后的平均输出电流。其响应速度最慢，因此故障阈值 IOUT_OC_FAULT_LIMIT 应设置为最低。第二级 OCP 由 IOUT_OC_FAST_FAULT 提供，该保护基于未经滤波处理的平均输出电流。其响应速度较快，因此故障阈值 IOUT_OC_FAST_FAULT_LIMIT 应设置得高于 IOUT_OC_FAULT_LIMIT。第三级 OCP 由 SCP 寄存器提供。当单次 ADC 采样中检测到的输出电流超过 SCP 阈值（isp0_scp_thresh）时，SCP 故障触发。其响应速度最快，因此 SCP 阈值应设置为最高。

除三级 OCP 外，LLC 四分之一砖型变换器还具备输出 OVP/UVP 和输入 OVP/UVP 功能。XDPP1100 的故障检测通过硬件（HW）实现，故障响应由固件（FW）管理。HW 与 FW 相结合，兼具了快速保护与灵活故障响应的优势。有关故障保护配置及附加功能的更多详细信息，可参见 XDPP1100 应用笔记 [6]。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

电源板信息

2 电源板信息

2.1 规格参数

1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的规格参数如表 1 所示。

表 1 规格参数

参数	最小值	典型值	最大值	单位
输入电压范围 (V_{in})	42	48	60	V DC
V_{in} 导通阈值	34	–	–	V
V_{in} 关断阈值	32	–	–	V
输入电流 (100%负载时)	–	20	–	A
输出电压范围 (V_{out})	10	12	15	V DC
输出电流 (I_{out})	–	80	–	A DC
输出功率	–	960	1200	W
输出电压纹波 (满载时峰峰值, 使用 1800 μ F 钽电容器测得)	–	–	400	mV
动态负载响应 (50%至 100%负载瞬变, 电流变化率为 1 A/ μ s, 使用 1800 μ F 钽电容器测得) : - 输出电压偏差 (峰峰值) - 稳定时间	–	–	680 200	mV μ s
推荐输出电容	1000	–	10000	μ F
效率 (V_{in} = 48 V DC, 25°C时) : 25%负载 50%负载 75%负载 100%负载	–	97.02 97.27 96.76 96.05	–	%
开关频率	–	310	–	kHz
风速	–	600	–	LFM
工作温度 (环境温度)	–40	–	50	°C

2.2 原理图

图 9 和图 10 分别展示了 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的功率级与控制电路原理图。初级全桥的每个桥臂均使用两个 OptiMOS™ 6 80 V MOSFET (ISC031N08NM6, 3.3 m Ω) 并联, 并由单个 2EDL8034-G3C 驱动器驱动。次级全桥的每个桥臂均使用四个 OptiMOS™ 5 25 V MOSFET (IQE006NE2LM5, 0.65 m Ω) 并联, 并由单个 2EDL8034-G3C 驱动器驱动。

LLC 变换器

电源板信息

XDPP1100-Q024 数字控制器用于 PWM 生成、软启动实现，以及遥测与保护功能。电压 ADC VSEN/VREF 用于输出电压检测；另一路电压 ADC VRSEN/VRREF 通过变压器次级绕组用于输入电压检测；高速电流 ADC ISEN/IREF 用于输出电流检测。TSEN 用于检测 PCB 铜分流器的温度，以实现 CS 温度补偿。

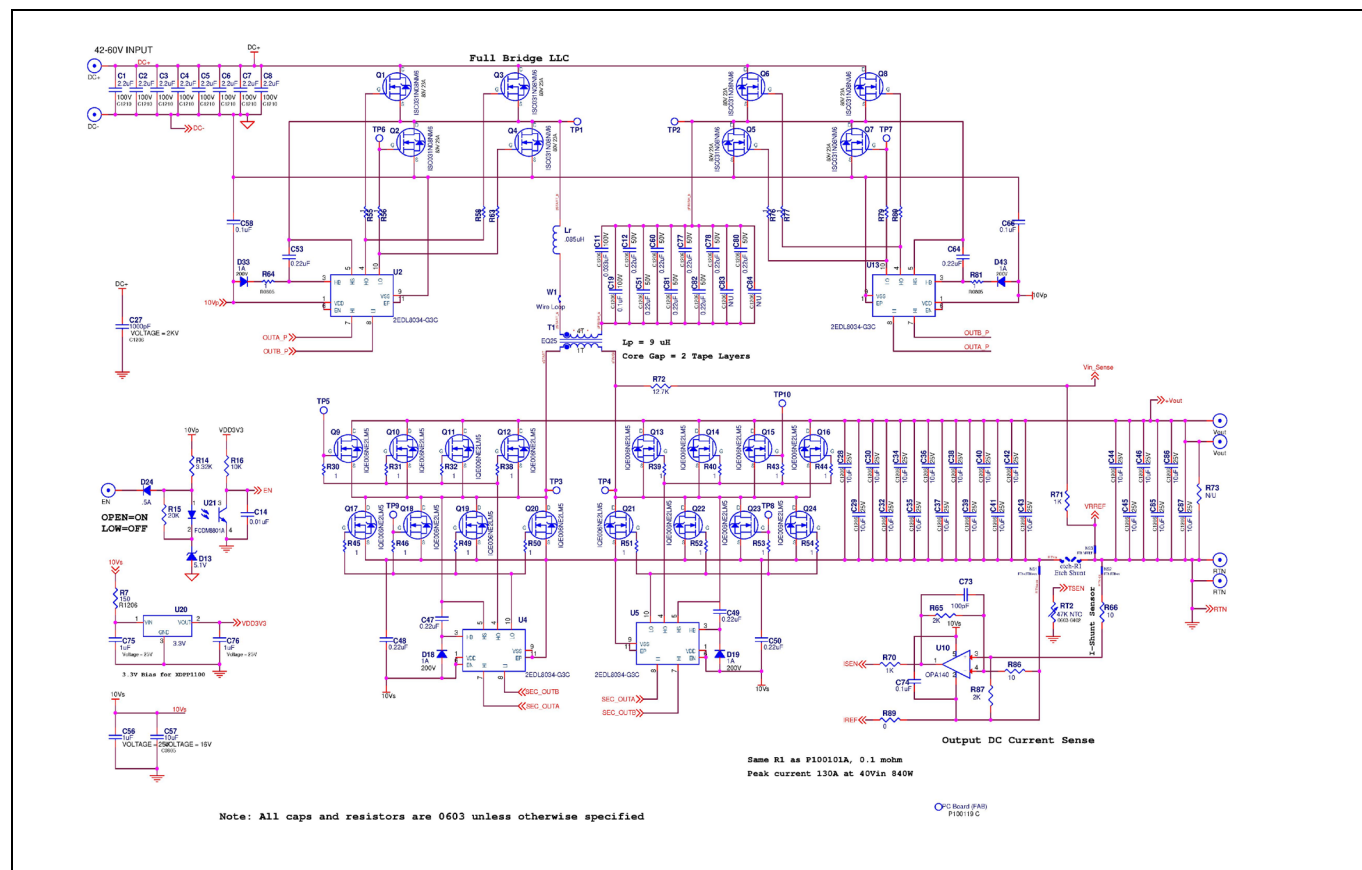


图 9 功率级原理图

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率

LLC 变换器

电源板信息

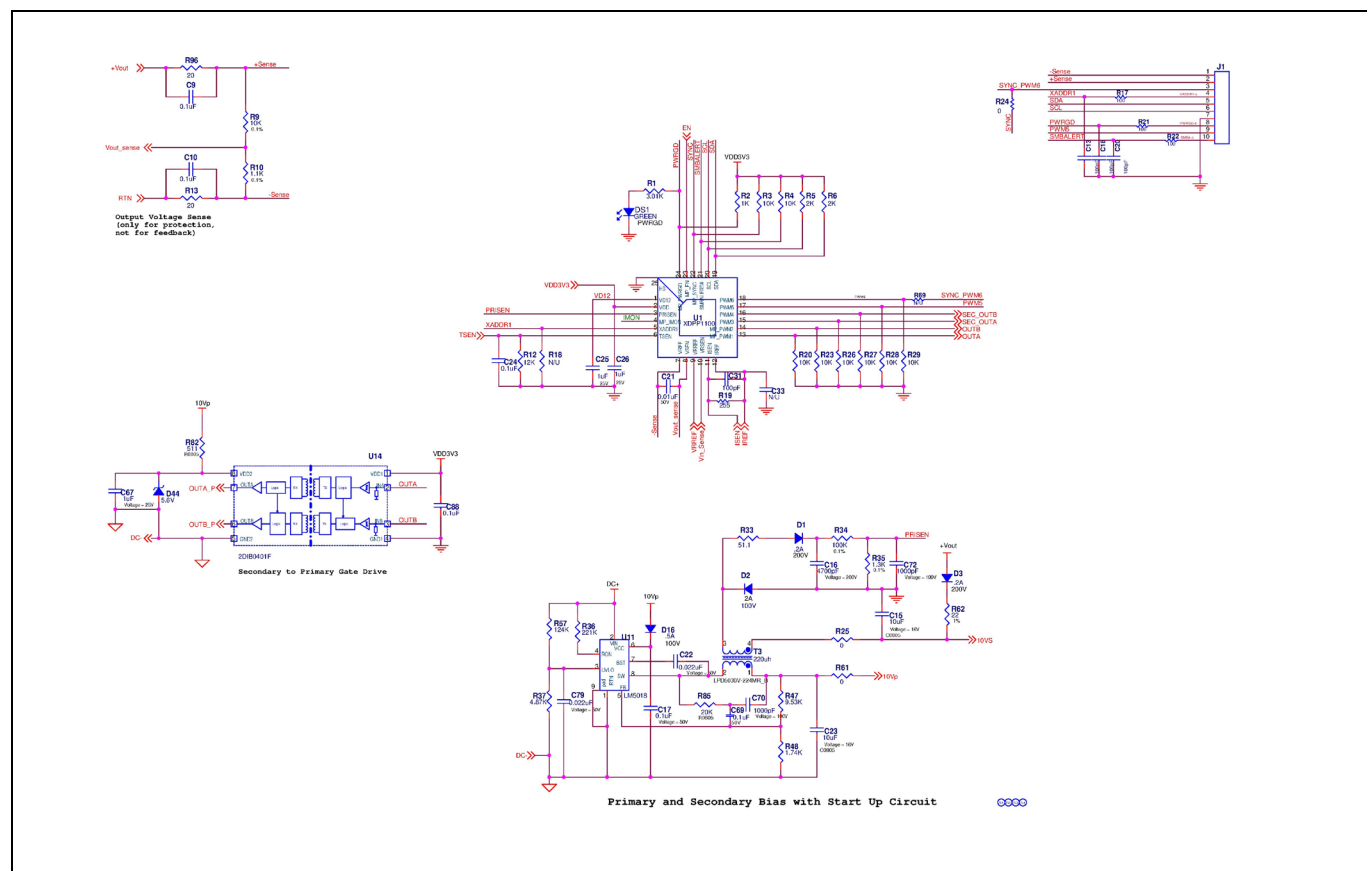


图 10 控制和偏置电路原理图

图 11 和图 12 分别为 PCB 顶层和底层的参考图，展示了各元器件的具体位置。测量测试点在图中高亮。

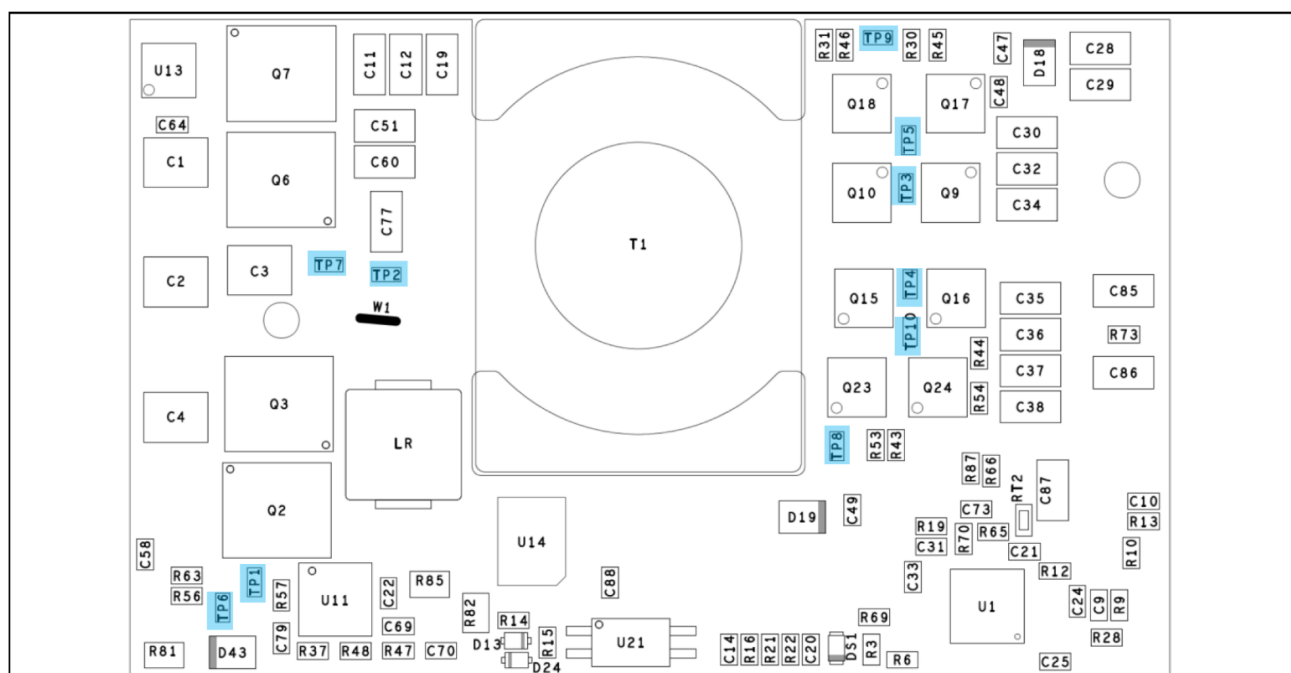


图 11 装配参考图—PCB 顶层

LLC 变换器

电源板信息

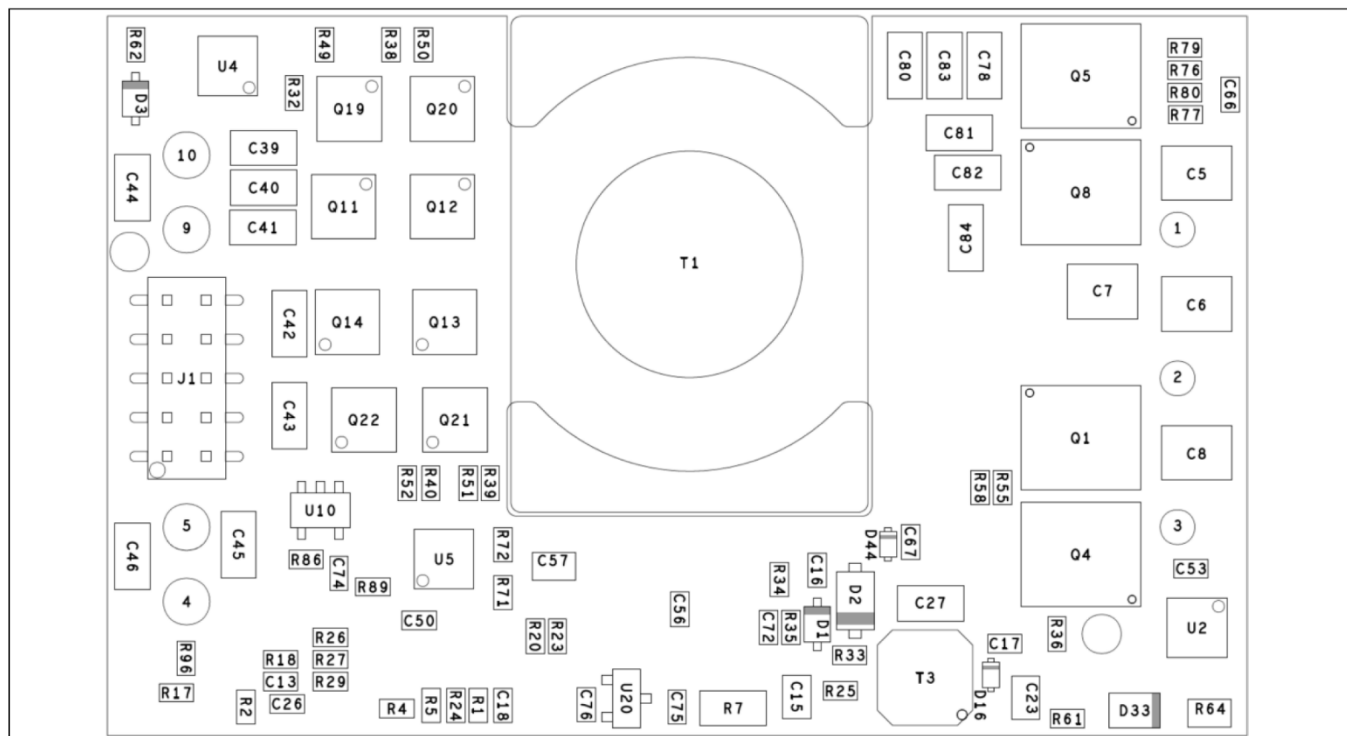


图 12 装配参考图—PCB 底层

2.3 变压器

该变压器采用平面结构，初级与次级的匝比为 4:1。磁芯规格为 EQ25，并配一块 ML27D 铁氧体平板。初级绕组由四层 PCB 串联构成，次级绕组由十层 PCB 并联构成。为最小化漏感和邻近效应损耗，初级绕组与次级绕组采用交错排布。结构细节见图 13。

在本设计中，实现 ZVS 需要 9 μH 的励磁电感。为达到所需电感，在 EQ25 磁芯与铁氧体板之间添加了两层 TestEquity TST22-0250 聚酰亚胺薄膜胶带（总气隙为 5 mil）。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

电源板信息

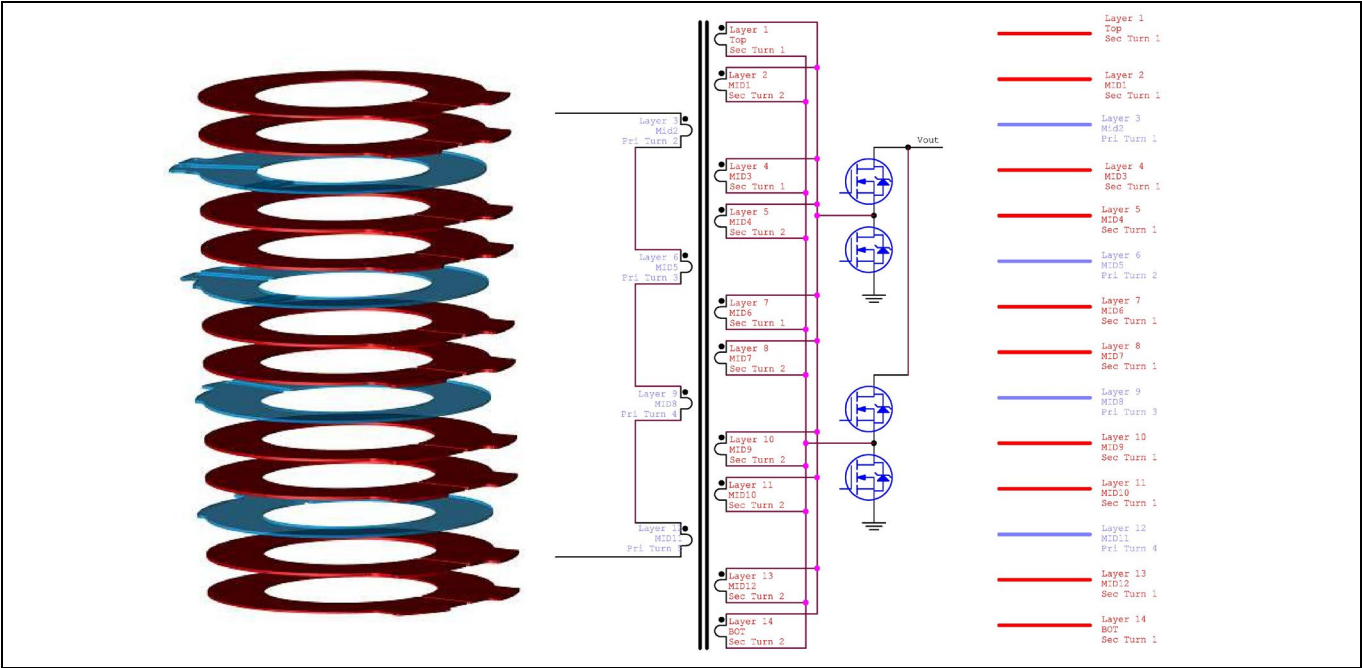


图 13 平面变压器结构

2.4 电路板布局

图 14 展示了 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的元器件位置布局。该板（不含外壳）的外形尺寸为 $2.30" \times 1.45" \times 0.51"$ ($58.4 \text{ mm} \times 36.8 \text{ mm} \times 12.9 \text{ mm}$)，对应功率密度约为 564 W/in^3 (34.6 W/cm^3)。该 PCB 为 14 层板：内层均为 6 oz 铜厚，厚度为 8.23 mil (0.209 mm)；顶层和底层为 4 oz 铜厚，厚度为 5.5 mil (0.140 mm)。有关该 LLC 四分之一砖型变换器的机械外形图和物料清单（表 4），可参见附录。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率

LLC 变换器

电源板信息

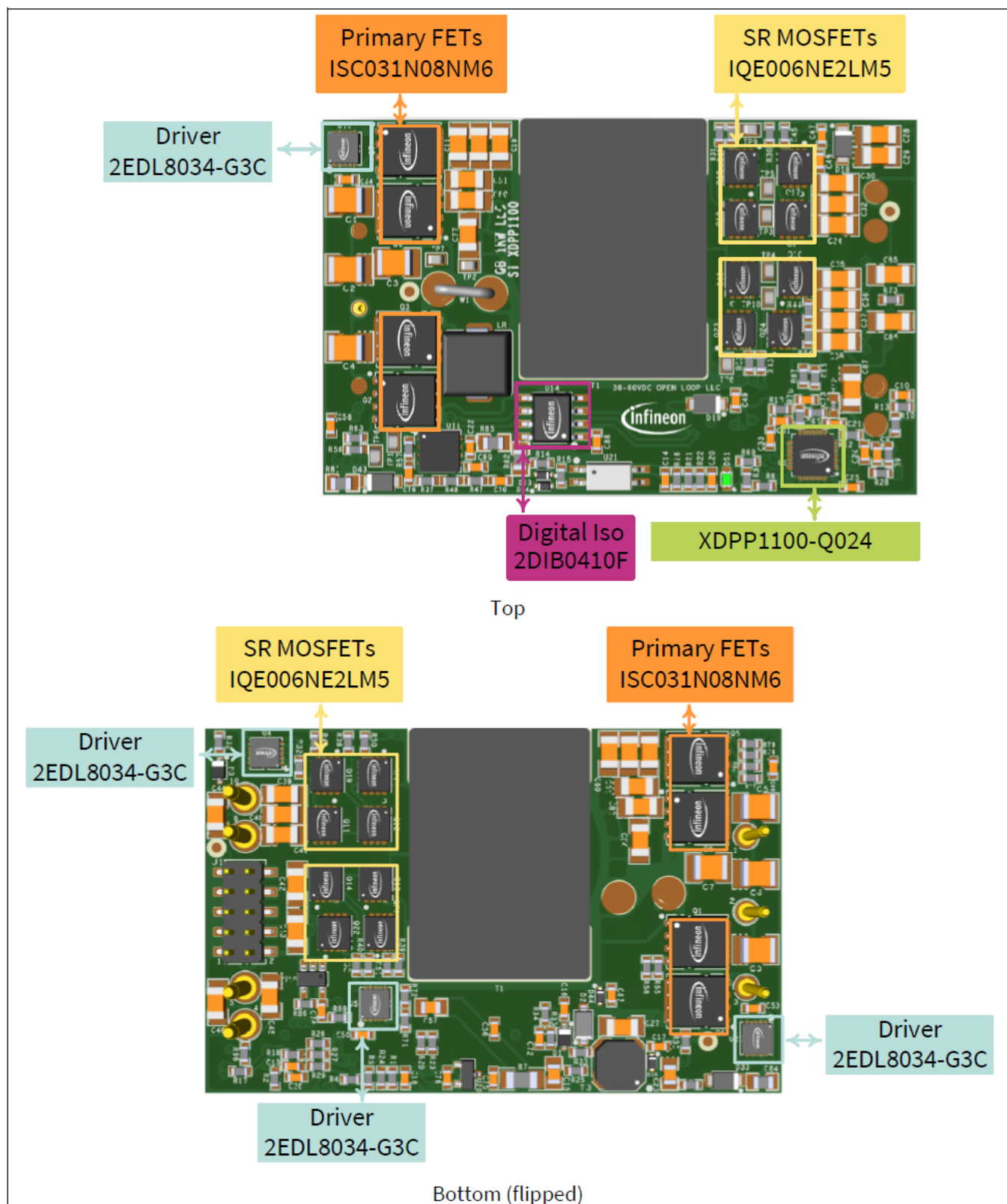


图 14 各部分元件布局

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率
LLC 变换器

电源板信息

2.5 功率损耗分析

表 2 汇总了主要耗损源及其相应的损耗值。在 $V_{in} = 48\text{ V}$ 且 $I_{out} = 80\text{ A}$ 条件下，估算的总功率损耗为 30.84 W。实测总功率损耗为 38.4 W。损耗明细如图 15 所示。

表 2 损耗明细 ($V_{in} = 48\text{ V}$, $I_{out} = 80\text{ A}$)

元器件	损耗类型	单项损耗	累计损耗
初级 MOSFET	导通损耗	2.70 W	3.82 W
	体二极管损耗	0.29 W	
	驱动损耗	0.83 W	
次级 MOSFET	导通损耗	4.48 W	8.21 W
	基体二极管损耗	0.70 W	
	驱动损耗	3.03 W	
变压器	导通损耗	7.40 W	8.77 W
	磁芯损耗	1.37 W	
谐振电感	导通损耗	0.13 W	1.23 W
	磁芯损耗	1.10 W	
谐振电容	-	-	0.17 W
输出电容	-	-	0.23 W
辅助偏置电路	-	-	1.06 W
高电流 PCB 走线和过孔	-	-	7.35 W
总损耗	-	-	30.84 W

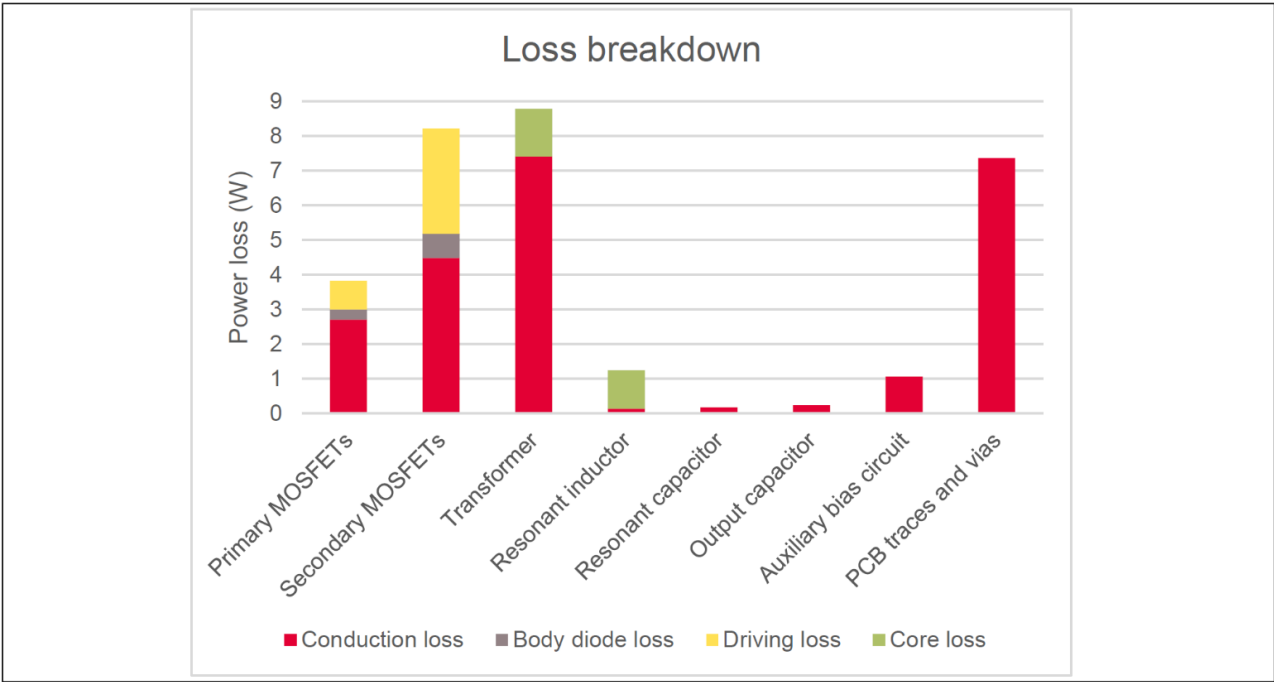


图 15 功率损耗明细

2.6 散热方案与测试配置

四分之一砖型测试夹具是四分之一砖型变换器的测试平台。它提供电源连接端子、通信与调试端口，以及散热风扇。图 16 为该测试夹具的原理图。夹具配备一个用于 I²C 和 PMBus 通信的 I²C 连接器，以及一个用于固件调试的 SWD 调试端口。风扇应由外部 DC 电源供电，电压范围为 5 V 至 12 V，以实现不同的风量。该电源是实现 XDPP1100 与 USB 适配器之间通信的必要条件。

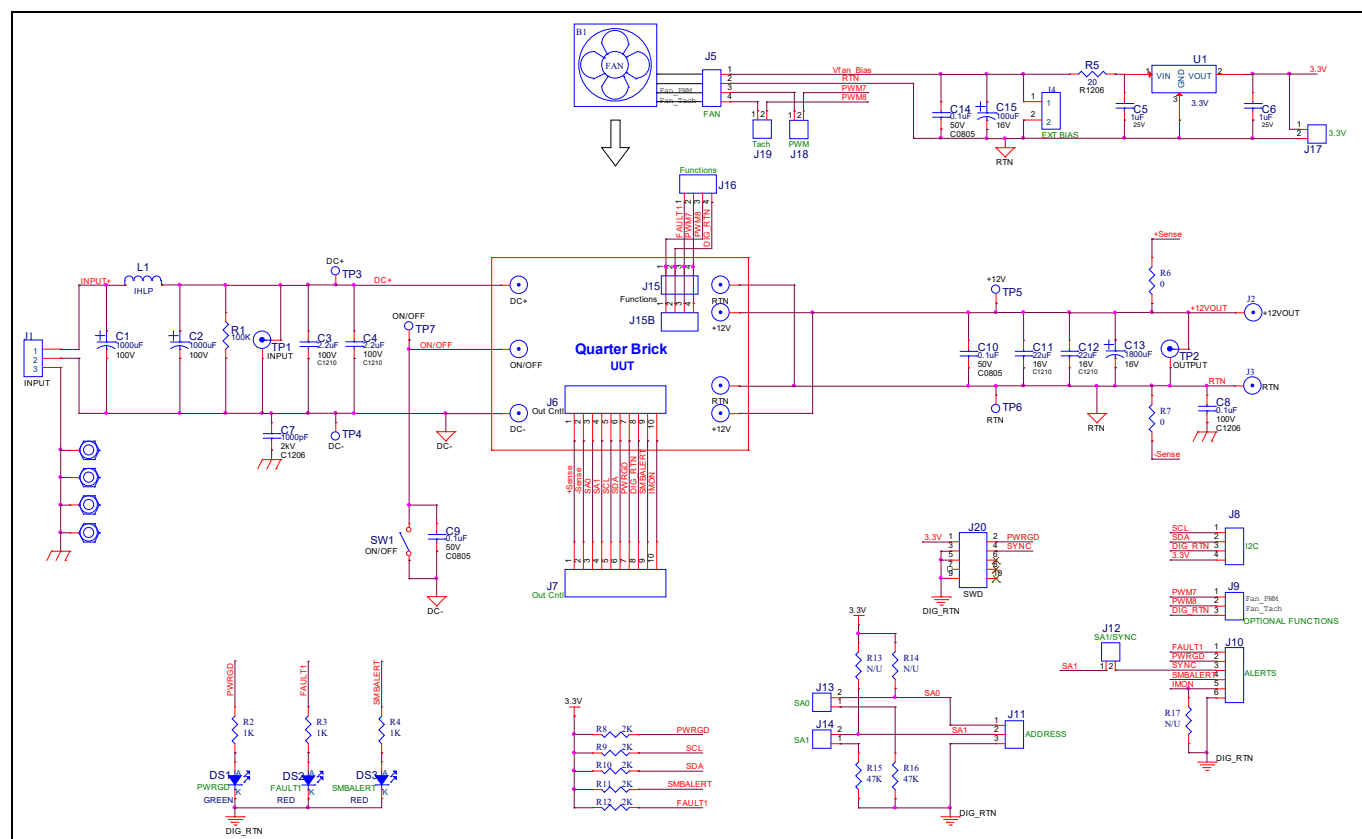


图 16 测试夹具原理图

初级侧的开关 SW1 是开启四分之一砖型变换器的使能开关。务必确保使能开关极性可由 PMBus 命令 ON_OFF_CONFIG 配置。若希望 EN 为“低电平有效”，用户应写入 PMBus 命令 ON_OFF_CONFIG 并将极性设置为“低电平有效”。选择“低电平有效”时，测试夹具上的开/关标签与实际的开/关状态一致。若选择“高电平有效”，则开/关标签的状态将与实际状态相反。

当向外部偏置连接器施加 5 V 至 12 V 电压时，测试夹具上的 3.3 V LDO 稳压器为 SDA/SCL I²C 通信总线提供上拉电压。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

电源板信息

使用测试夹具的 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器测试配置如图 17 所示。

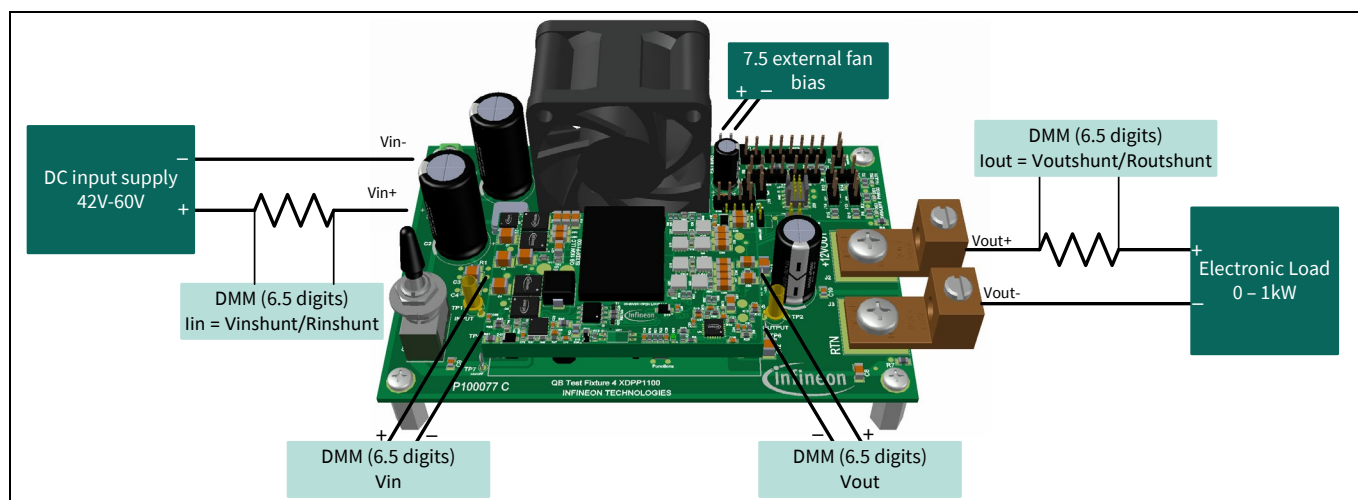


图 17 使用测试夹具的测试配置

运行电路板所需的连接步骤：

1. 将四分之一砖型变换器连接至测试夹具。确保测试夹具上的 DC 输入端、12 V 输出端及信号连接器 J6 均接触良好。
2. 将 48 V 输入电源连接至 J1。
3. 将负载连接至 J2 和 J3。
4. 在 J4 (EXT BIAS) 处使用 5-12 V DC 电源为风扇供电。
5. 将 XDPP1100 USB 适配器 (USB007 revA) 连接至 J8。通过识别接地引脚 G (黑色线) 确定连接方向。USB007 的蓝色线不使用。
6. 确保开关 SW1 处于关闭位置。
7. 开启 48 V 输入电源。辅助电源启用至少需要 35 V 的电压。
8. 辅助电源的次级侧电压 (10VS) 应提供 $10\text{ V} \pm 1\text{ V}$ 的输出。
9. 该演示板出厂时已在 OTP 中预置了默认补丁和配置，一旦从 XDPP1100 GUI 发出运行命令，即可启动。
10. 要发出运行命令，打开 XDPP1100 GUI 并点击“Auto populate”。该选项位于左上角，“file”选项的正下方。
11. 向 PMBus 命令 0×01 运行写入“ON”，并将 SW1 转至开启位置（两个操作的先后顺序不重要）。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

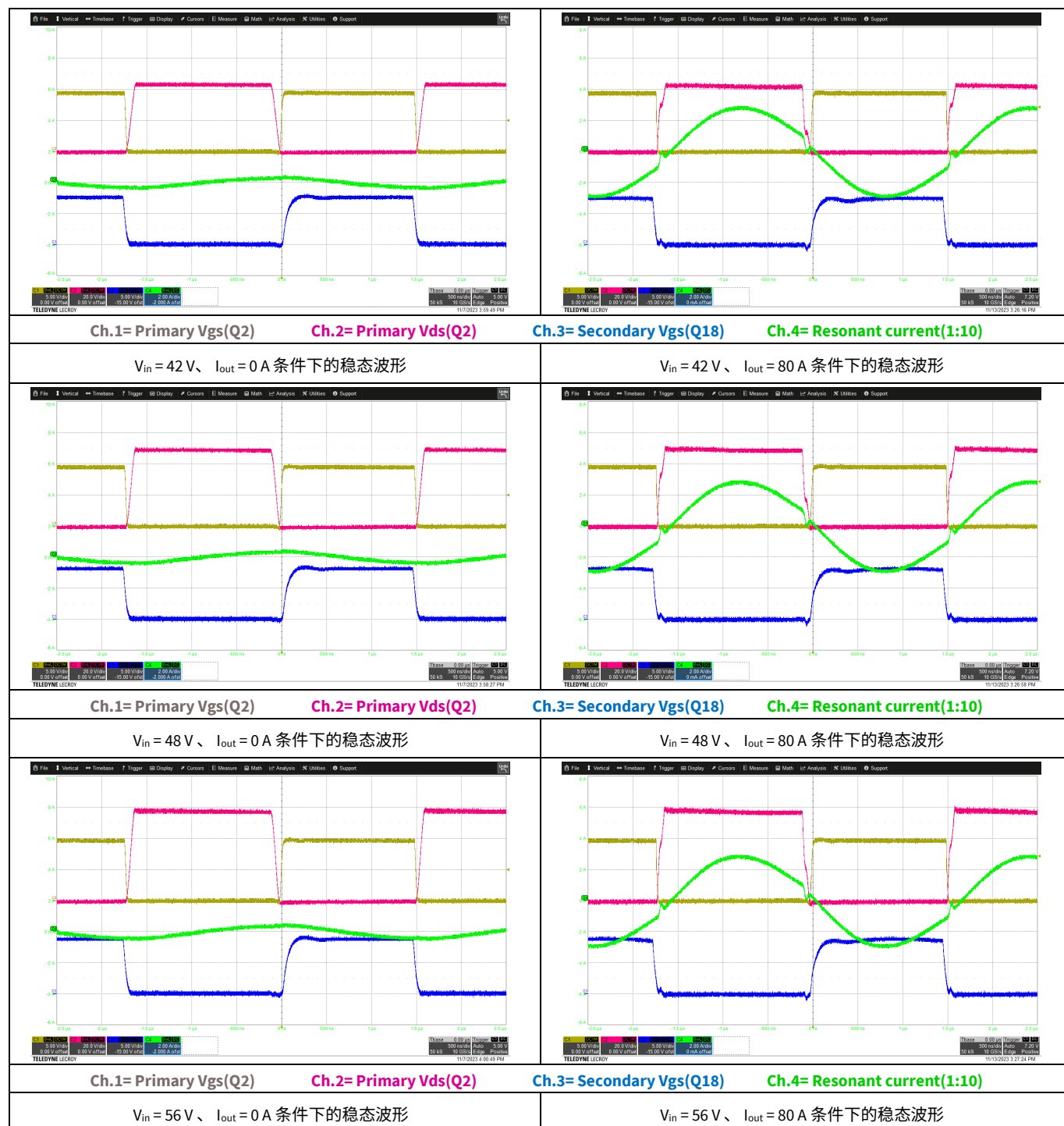
LLC 变换器

实验结果

3 实验结果

3.1 稳态波形

图 18 展示了安装在英飞凌测试夹具上的 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的关键稳态实测波形。由图可见，在宽输入电压及宽负载范围内可实现 ZVS。



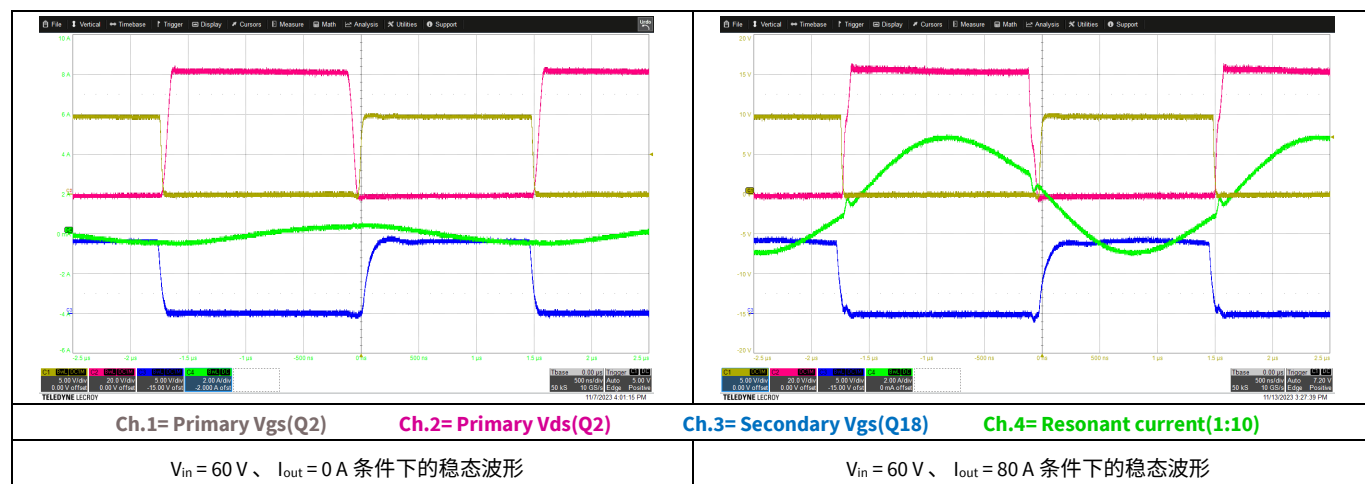
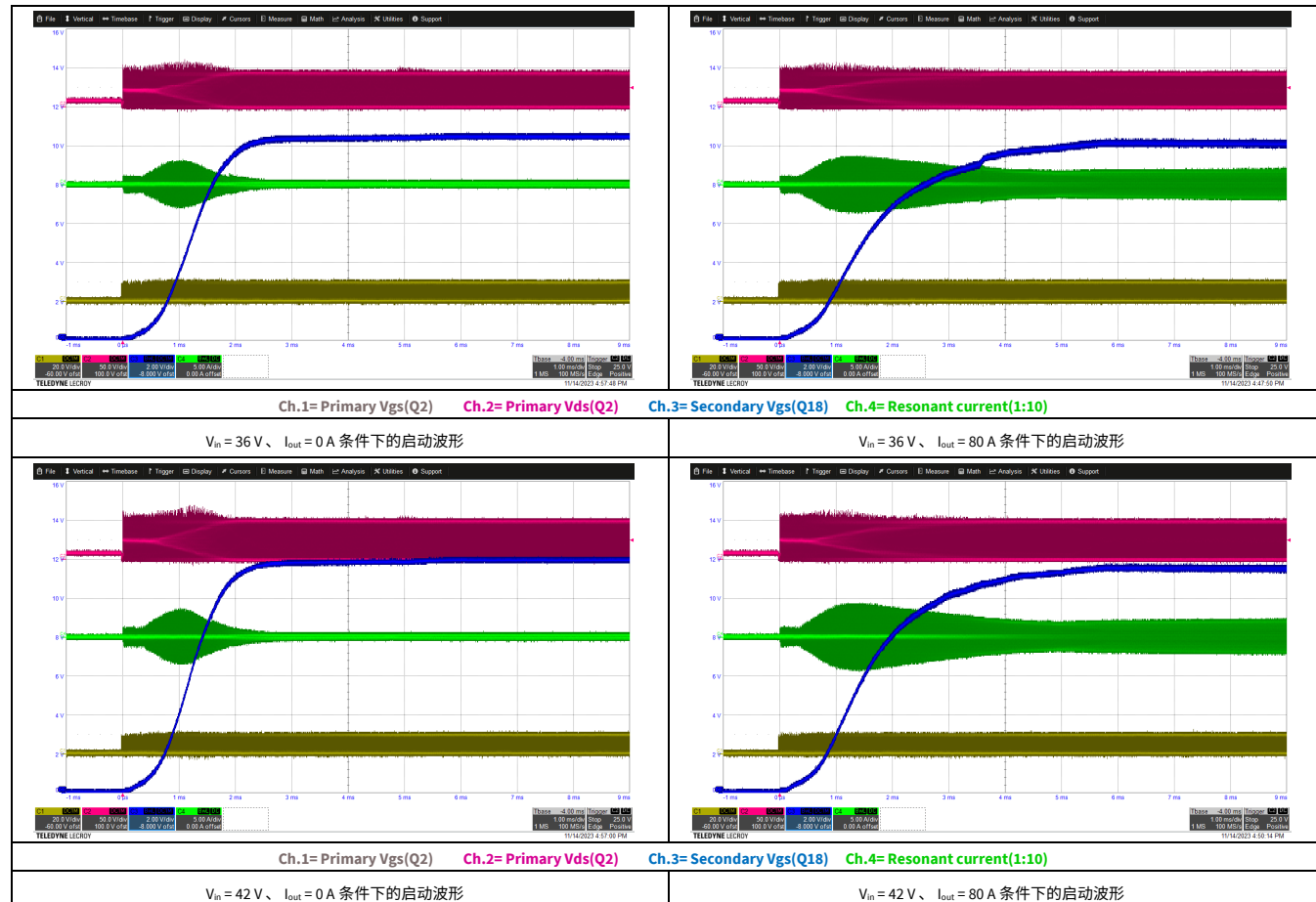


图 18 稳态波形

3.2 启动波形

本设计已在宽输入电压及宽负载范围内对占空比/频率混合软启动进行测试。图 19 展示了在阻性负载条件下测得的软启动波形。图 20 展示了在恒流负载条件下测得的软启动波形。



采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率

LLC 变换器

实验结果

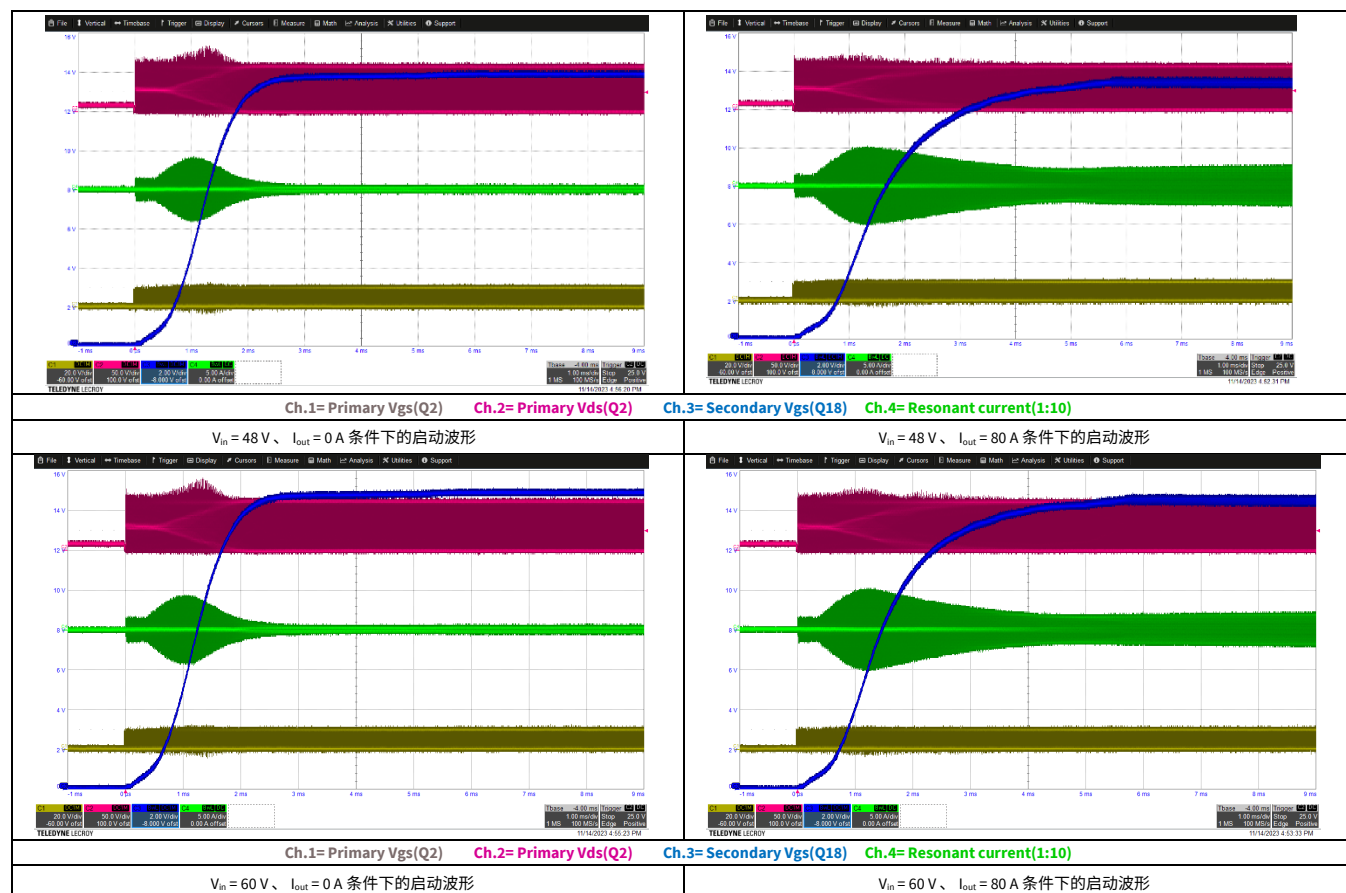
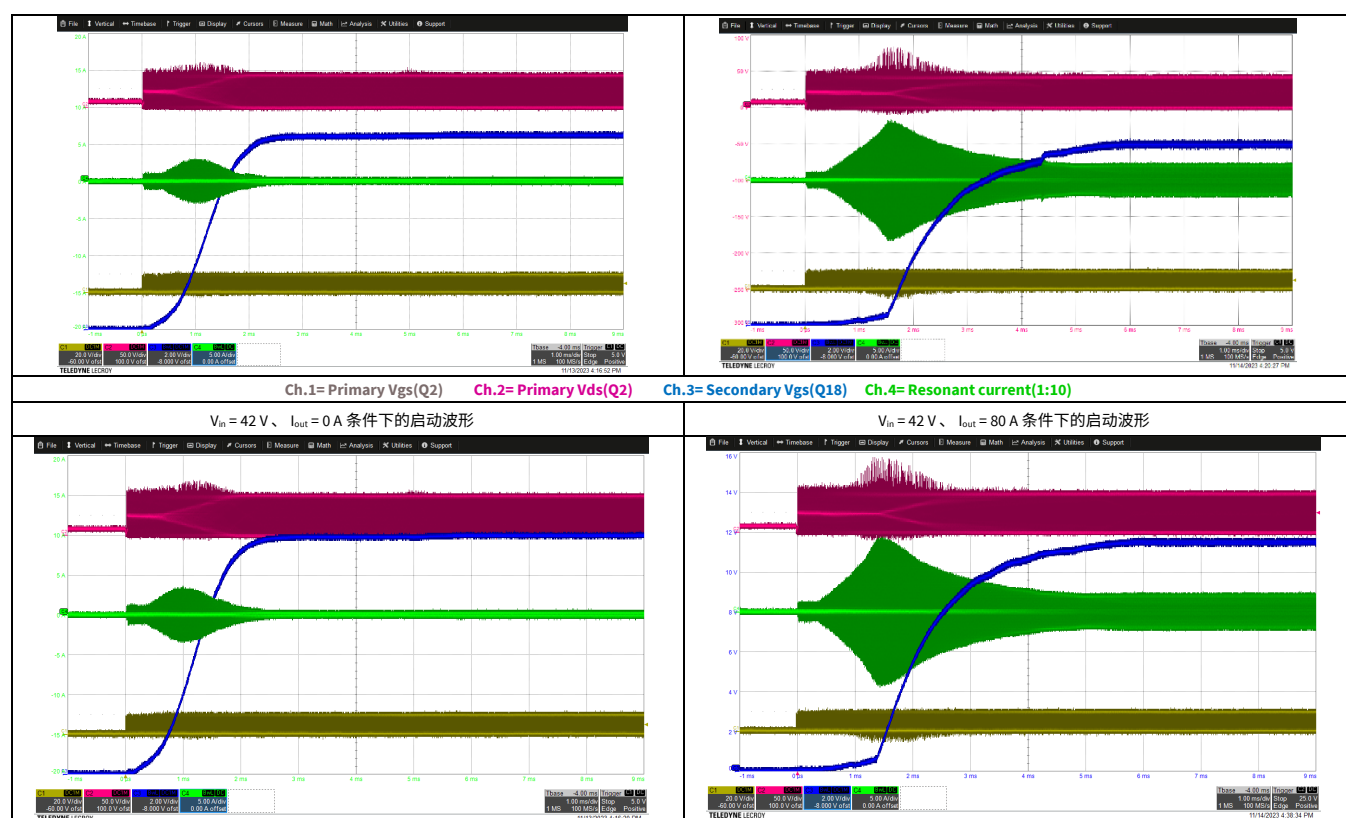


图 19 阻性负载条件下的启动波形



采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

LLC 变换器

实验结果

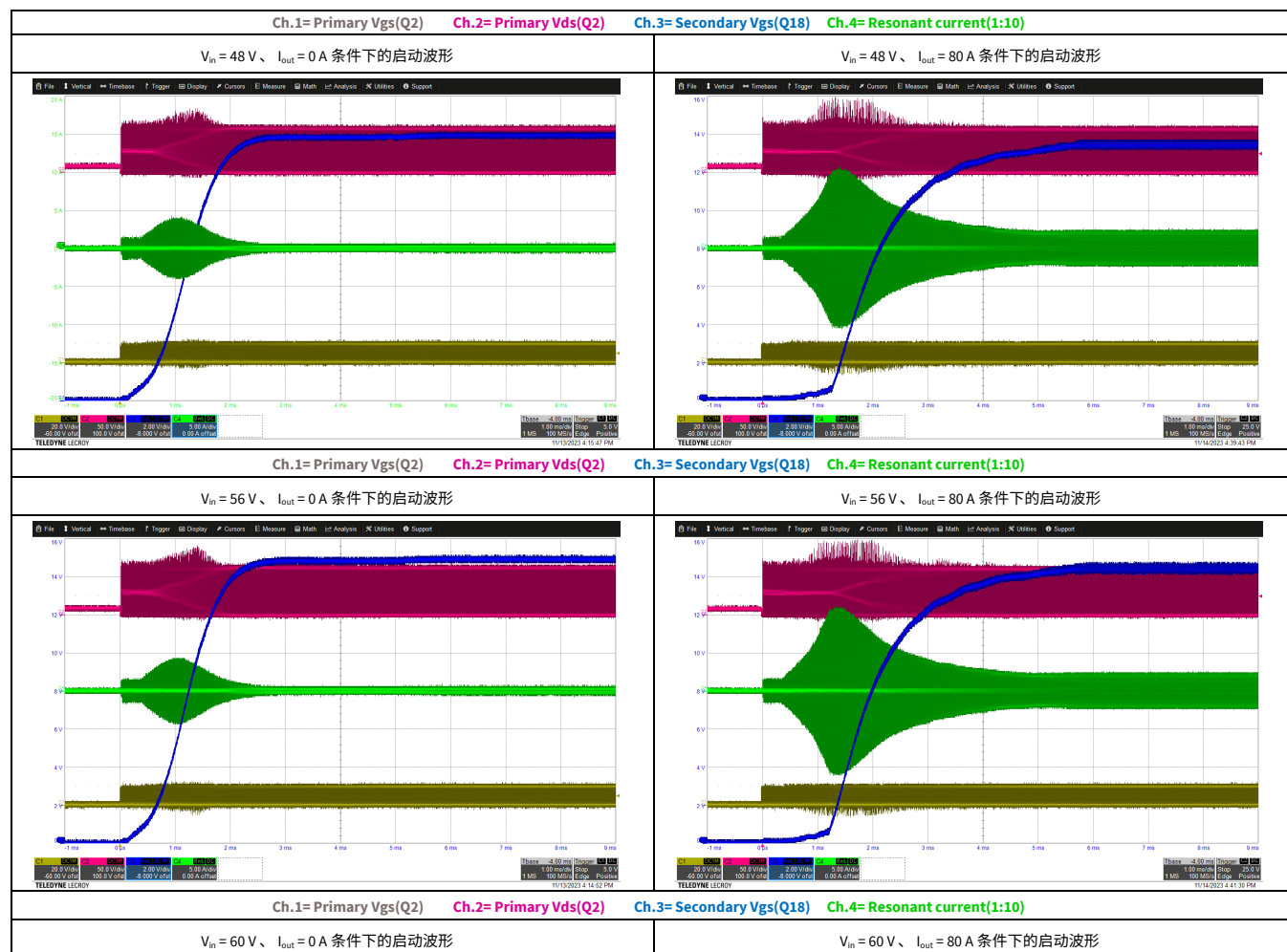
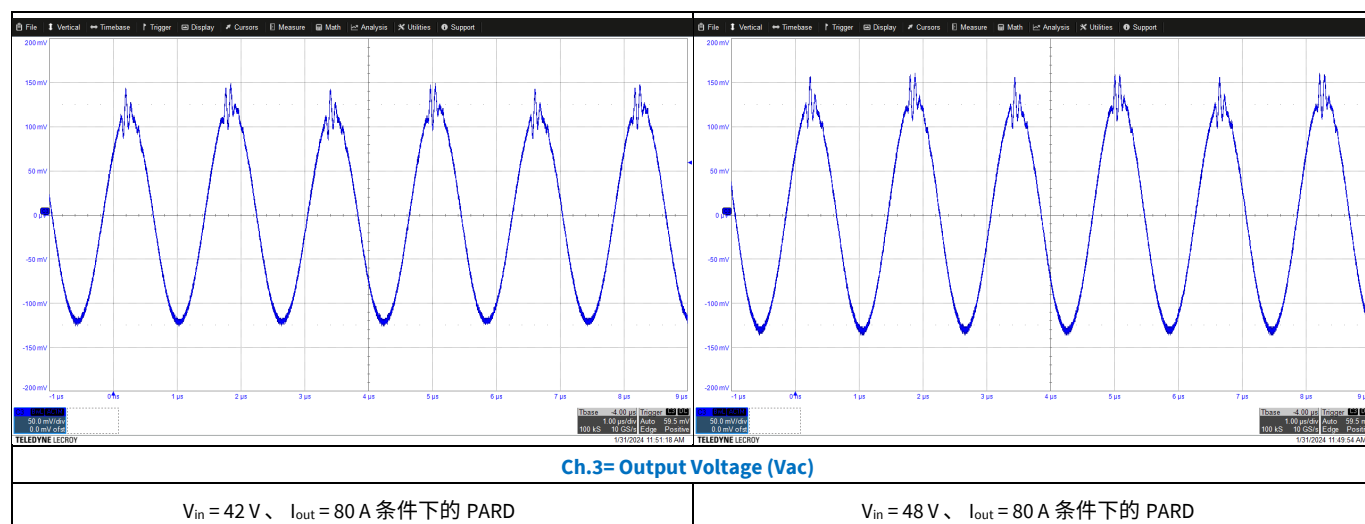


图 20 恒流负载条件下的启动波形

3.3 输出 PARD

图 21 展示了宽输入电压及宽负载范围下的输出周期和随机偏差 (PARD)。在 $V_{in} = 48\text{ V}$ 满载条件下，典型输出 PARD（峰峰值）为 280 mV。



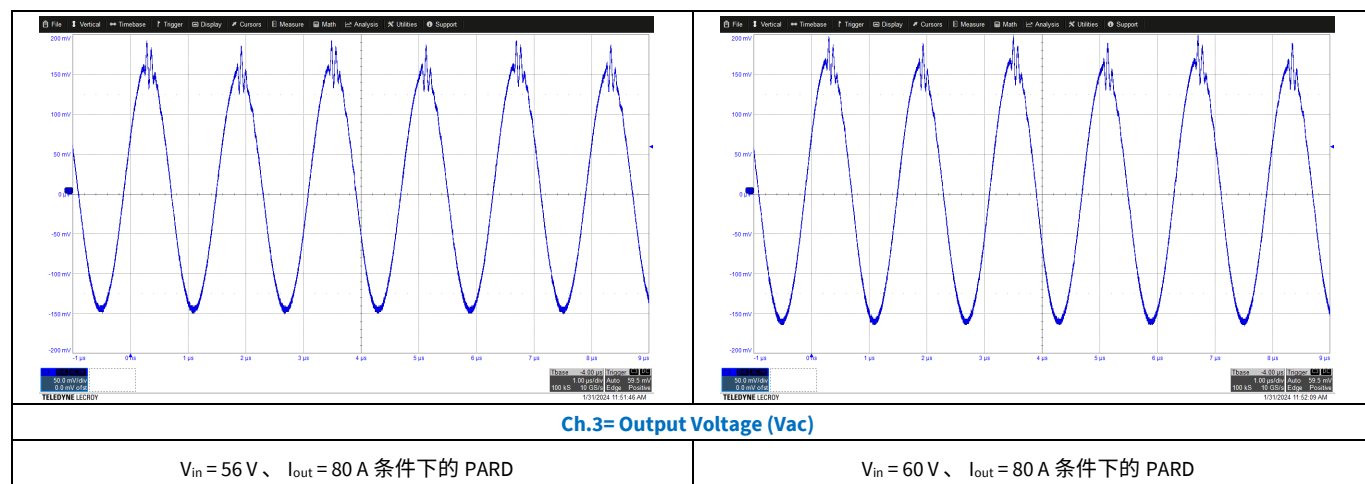
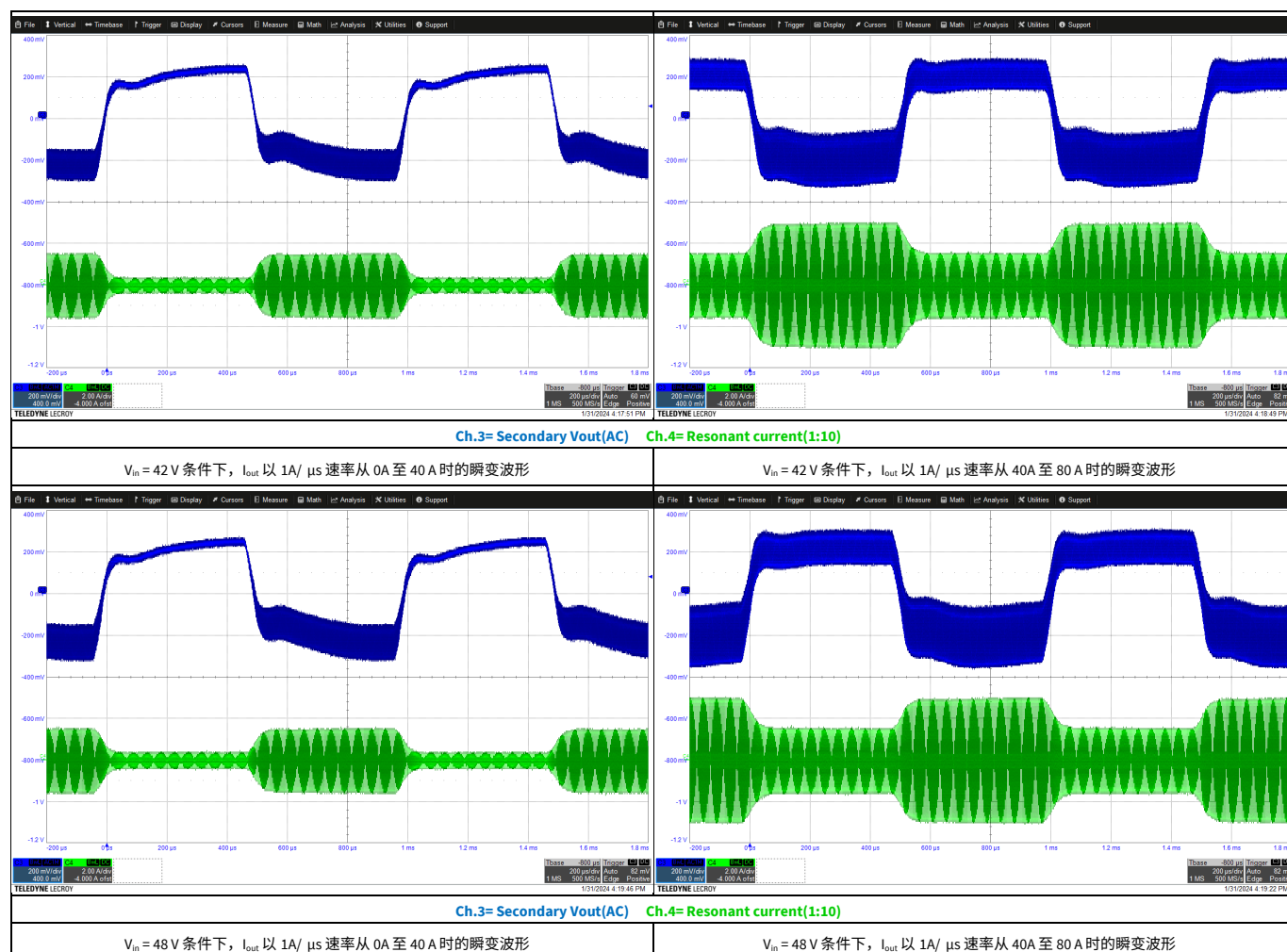


图 21 输出 PARD 波形

3.4 负载瞬变响应

图 22 展示了宽输入电压及宽负载范围内的输出负载瞬变波形。需注意，该转换器为非稳压型。最大输出电压偏差为 680 mV（负载从 50%至 100%，电流变化率为 1 A/μs 时测得）。



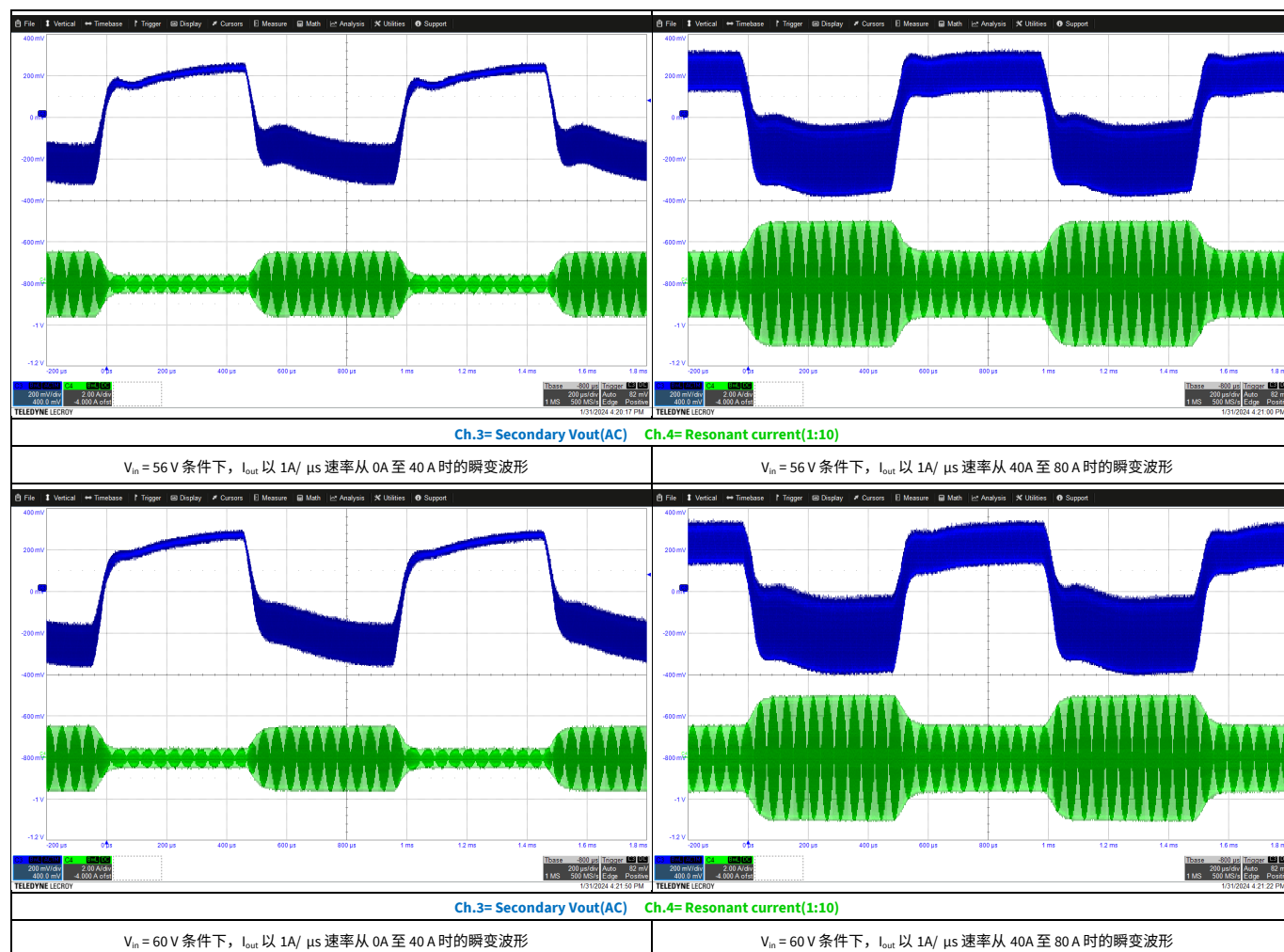
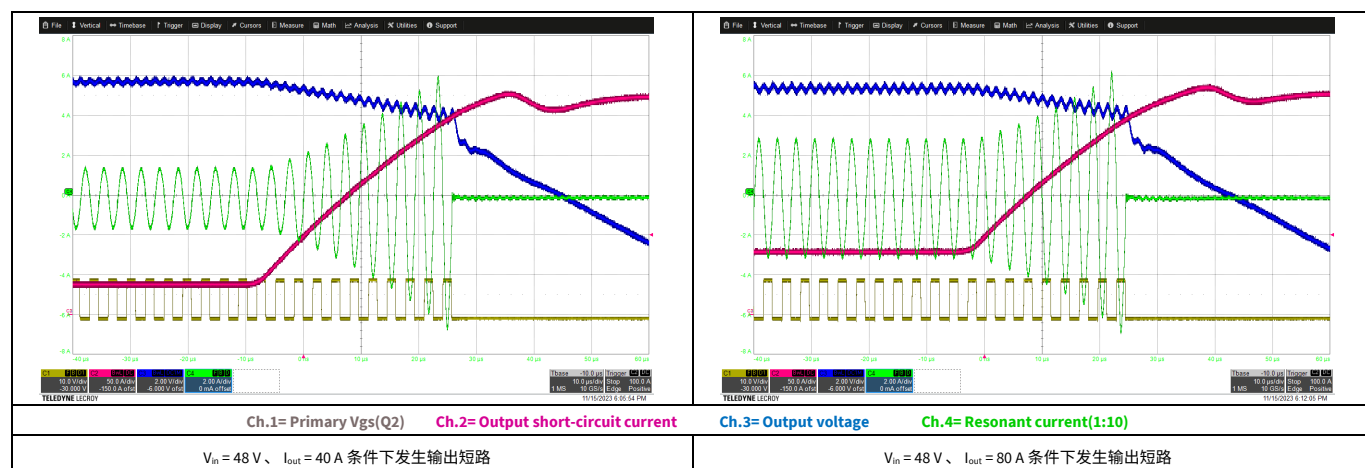


图 22 负载瞬变波形

3.5 输出 SCP

测试中使用 DC 断路器将输出端短路。图 23 展示了输出 SCP 的波形。当流经 PCB 铜分流器的次级电流超过 SCP 阈值时，变换器将通过关断 PWM 来提供保护。在测试中，SCP 阈值为 90 A，对应该阈值的峰值谐振电流约为 37 A。需注意，输出短路电流（红色波形）主要由测试夹具上的大容量输出电容提供。



实验结果

图 23 输出 SCP

3.6 效率

表 3 展示了宽输入电压及宽负载范围内的效率数据，该数据于 600 FPM 风速条件下测得。效率曲线如图 24 所示。输出电压随负载及输入电压变化的波动范围如图 25 所示。

表 3 测得效率（百分比）

输出电流	$V_{in} = 42\text{ V}$	$V_{in} = 48\text{ V}$	$V_{in} = 56\text{ V}$	$V_{in} = 60\text{ V}$
10 A	95.19	95.14	94.86	94.63
20 A	96.90	96.94	96.88	96.78
30 A	97.11	97.37	97.30	97.30
40 A	97.03	97.32	97.36	97.38
50 A	96.77	97.03	97.31	97.37
60 A	96.40	96.72	96.98	97.07
70 A	95.98	96.36	96.69	96.81
80 A	95.53	95.97	96.35	96.50

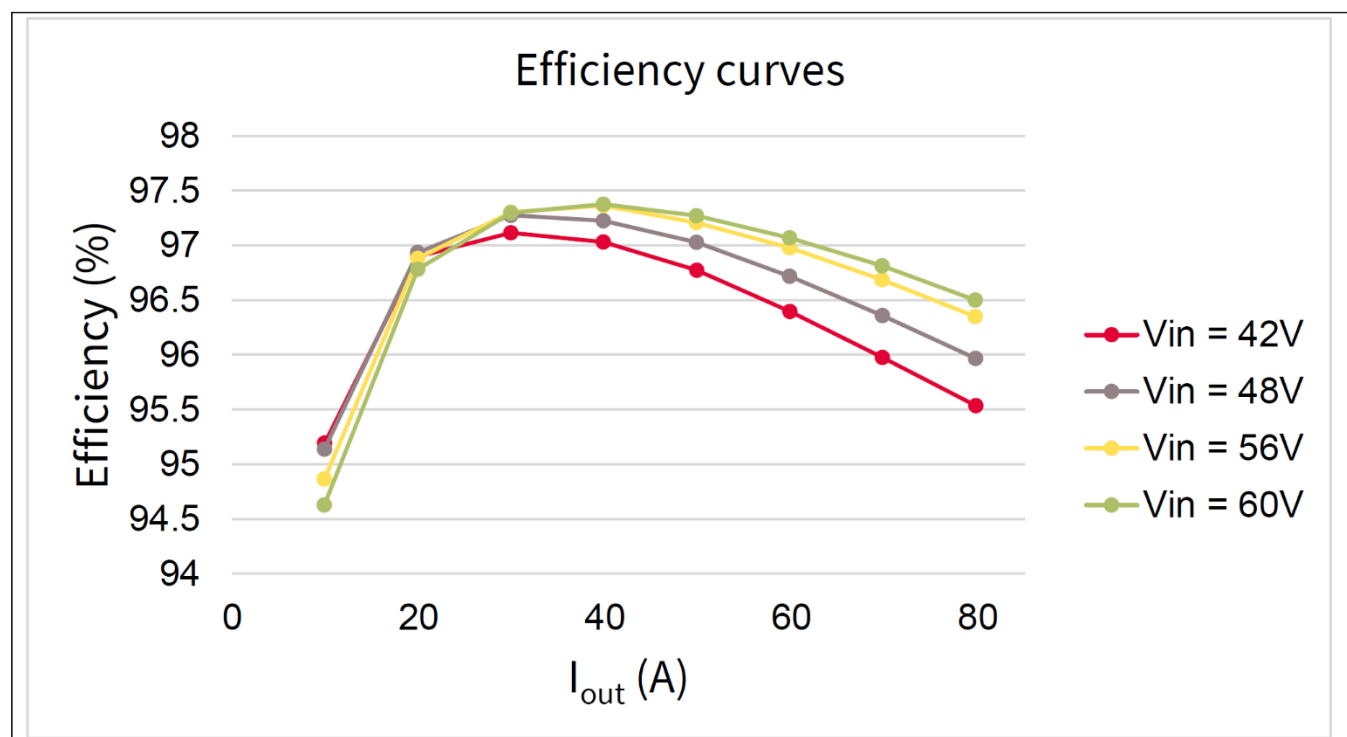


图 24 宽输入电压及宽负载范围内的效率曲线图

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率
LLC 变换器

实验结果

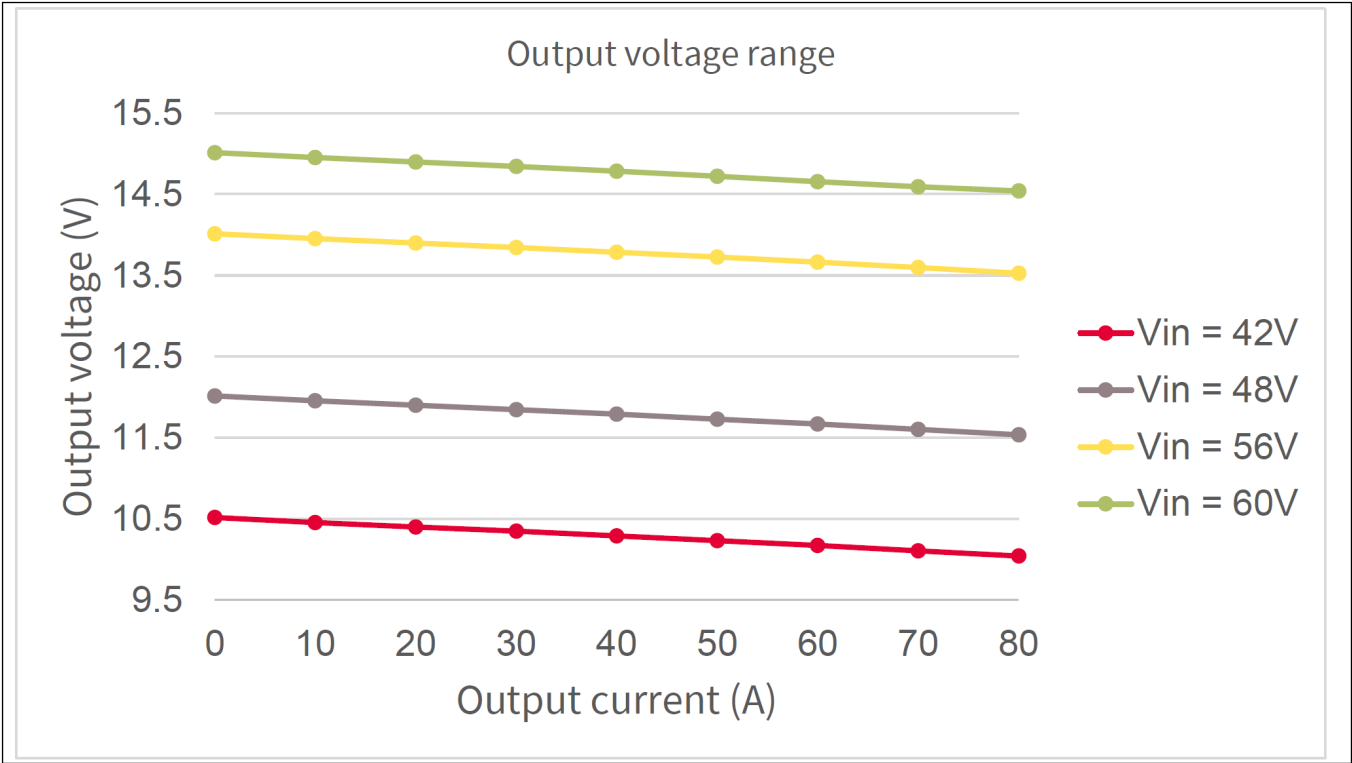


图 25 输出电压随负载及输入电压的变化范围

3.7 热成像图

图 26 至 图 29 展示了宽输入电压及宽负载范围内测得的热成像图。测试风速为 600 FPM（风扇偏置电压为 7.5 V）。

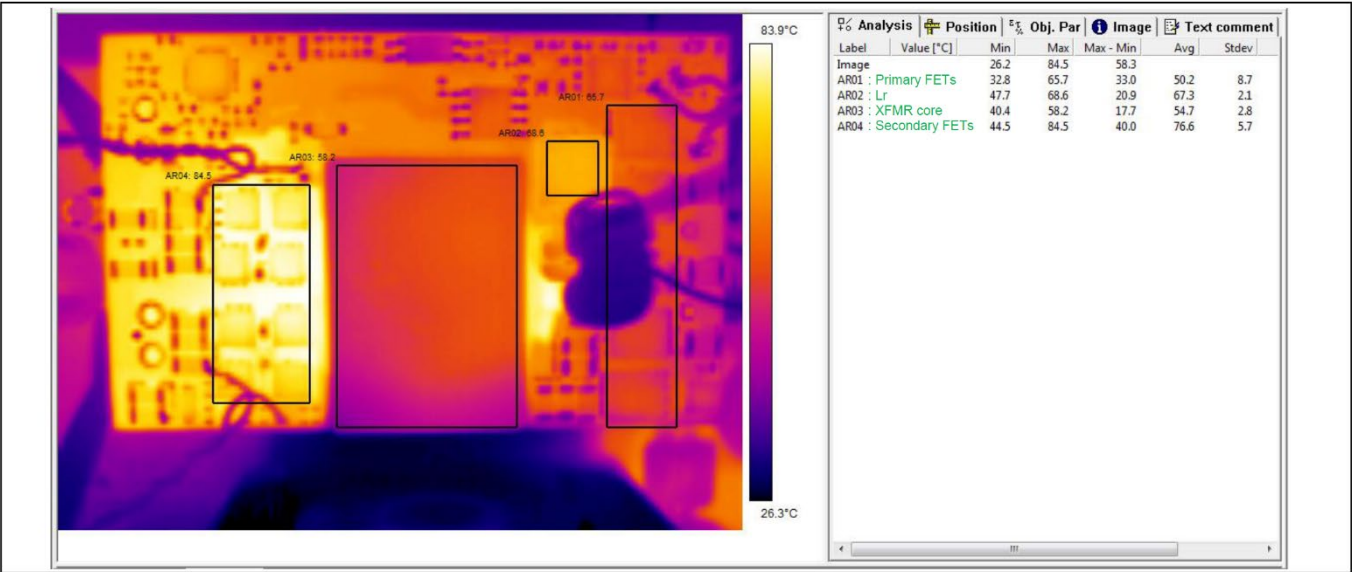


图 26 $V_{in} = 42\text{ V}$ 和 $I_{out} = 80\text{ A}$ 时的热成像图

实验结果

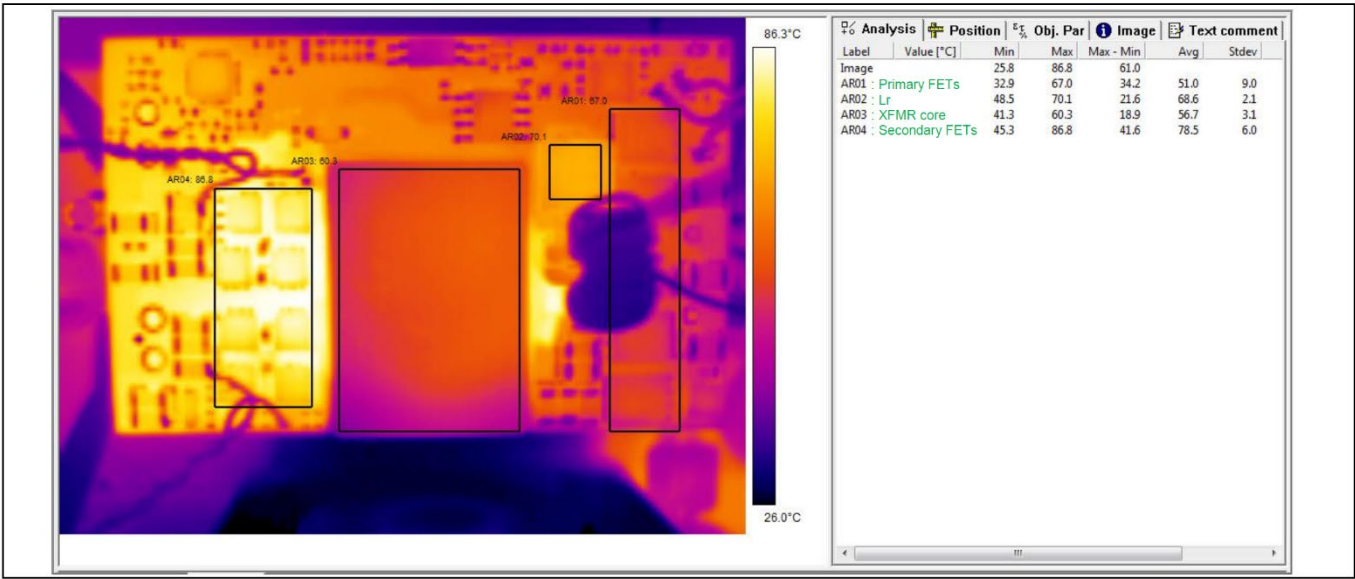


图 27 $V_{in} = 48\text{ V}$ 和 $I_{out} = 80\text{ A}$ 时的热成像图

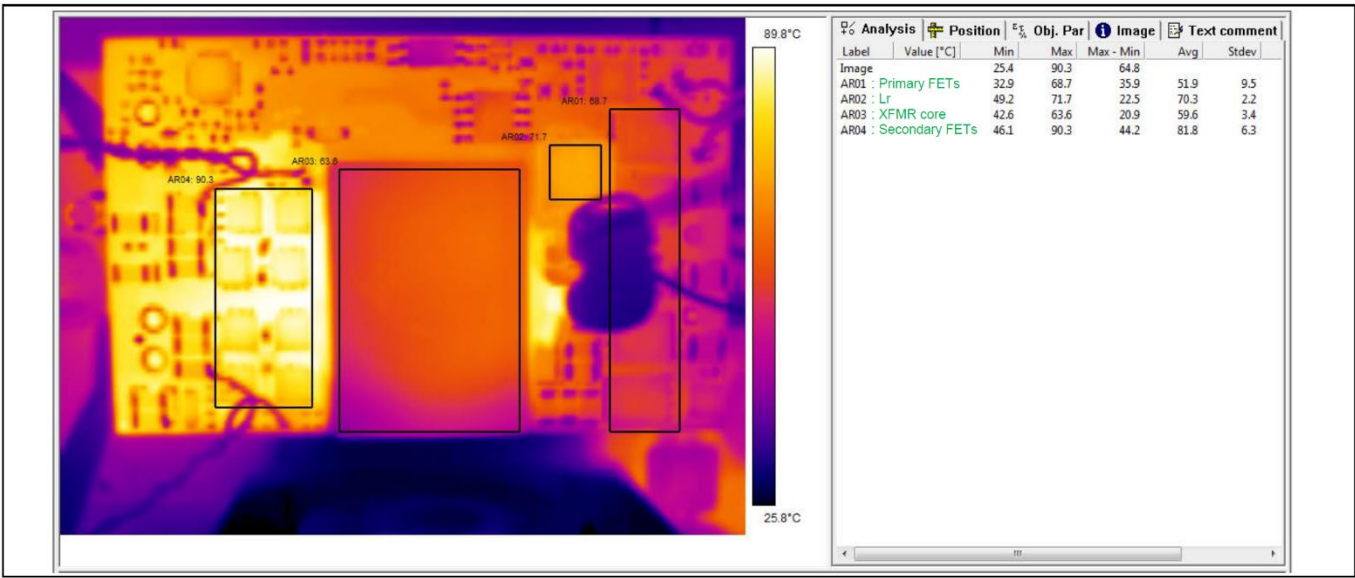


图 28 $V_{in} = 56\text{ V}$ 和 $I_{out} = 80\text{ A}$ 时的热成像图

实验结果

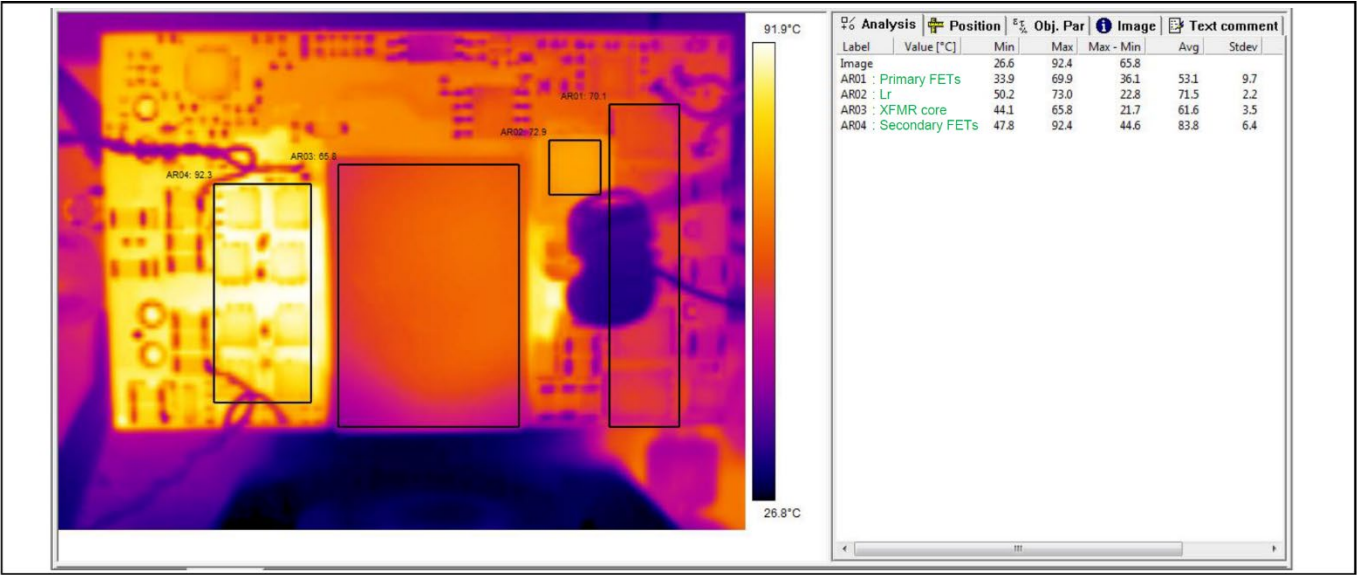


图 29 $V_{in} = 60\text{ V}$ 和 $I_{out} = 80\text{ A}$ 时的热成像图

总结

4 总结

本文档介绍了英飞凌面向 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的完整解决方案。该参考板采用符合 DOSA 标准的四分之一砖型封装，得益于英飞凌半导体器件的优异性能，实现了 97.3% 的峰值效率和 564 W/in³ (34.6 W/cm³) 的功率密度。

初级侧 OptiMOS™ 6 80 V MOSFET (ISC031N08NM6) 具备优异的 FOM 和卓越的开关性能。其低输出电容降低了 LLC 变换器实现 ZVS 所需的励磁电流，从而大幅减少了环流损耗。次级侧 OptiMOS™ 5 25 V MOSFET (IQE006NE2LM5) 拥有业界领先的 $R_{DS(on)}$ ，显著降低了 LLC 变换器中 SR 的导通损耗。其紧凑的封装尺寸 (PQFN 3.3 mm × 3.3 mm 封装) 允许在相同空间内并联更多 FET，从而进一步降低导通损耗并提升热管理性能。初级和次级 FET 均由英飞凌 2EDL8034-G3C EiceDRIVER™ 栅极驱动器 (采用 SON-10 3 mm × 3 mm 封装) 驱动。英飞凌 2DIB0410F ISOFACE™ 双通道数字隔离器采用无芯技术，为驱动初级栅极驱动器提供高抗噪性和稳健的隔离通信。

在固定频率 LLC 四分之一砖型变换器中，英飞凌数字电源控制器 XDPP1100-Q024 发挥着关键作用：它实现了最优 PWM 时序生成、占空比/频率混合软启动，并提供了增强的保护功能。作为业界最小的数字电源控制器，其集成多种优化电源控制处理模块和预编程外设，有助于提升隔离型 DC-DC 变换器的性能、减少外部元器件数量，并大幅降低固件开发工作量。

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率 LLC 变换器

附录

5 附录

5.1 机械外形图

图 30 展示了 1 kW 固定频率 LLC 四分之一砖型变换器的机械外形图。

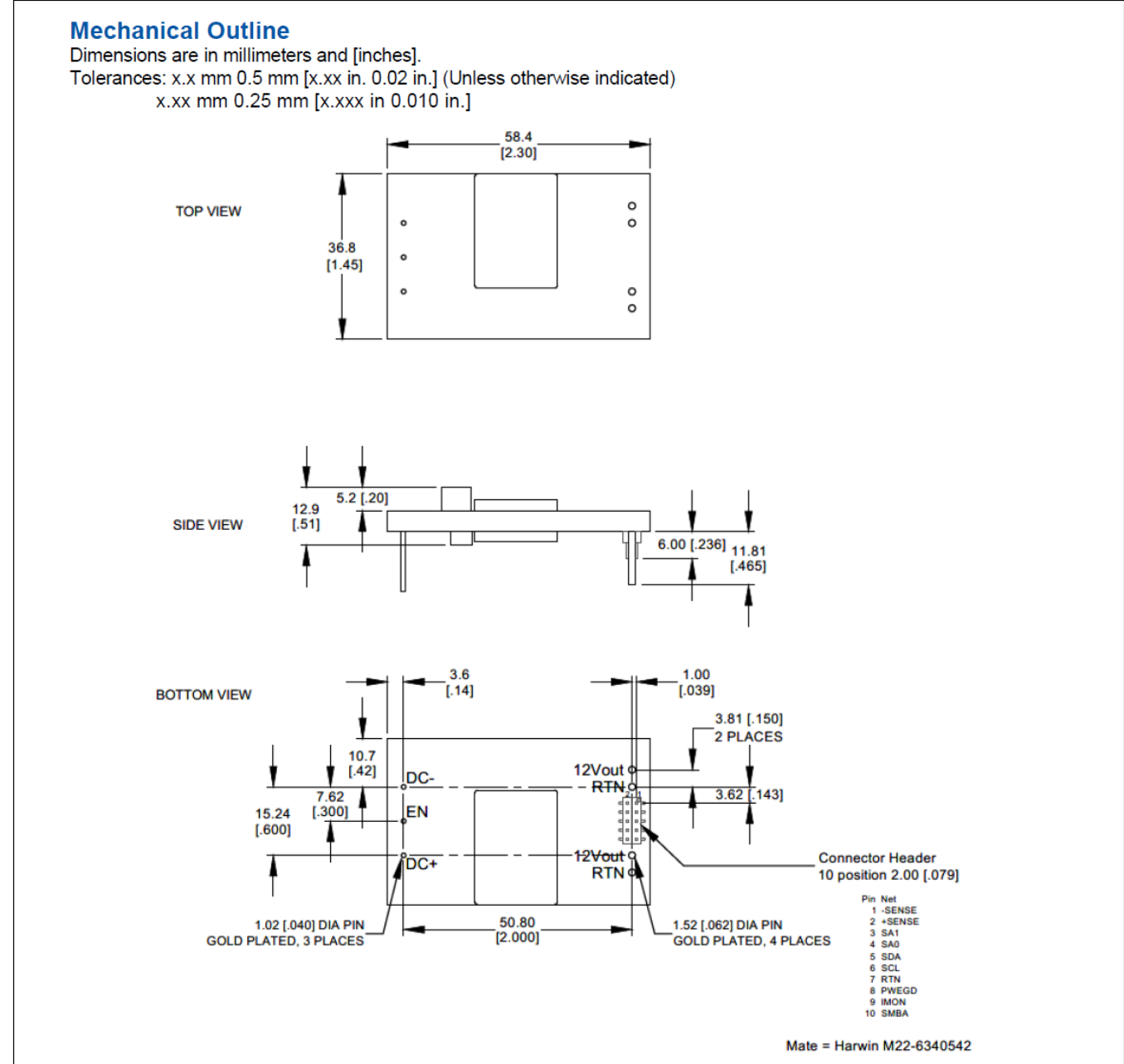


图 30 机械外形图

LLC 变换器

附录

5.2 物料清单

表 4 BOM

项目	数量	位号	制造商	型号
1	1	BRD1	-	P100119 C
2	8	C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C8	TDK	C3225X7R2A225K230AM
3	9	C9、C10、C17、C24、C58、C66、C69、C74、C88	TDK	C1608X7R1H104K080AA
4	1	C11	TDK	C3216NP02A333J160
5	8	C12、C51、C60、C77、C78、C80、C81、C82	Murata	GRM31C5C1H224JE02L
6	5	C13、C18、C20、C31、C73	TDK	C1608C0G2A101K080AA
7	2	C14、C21	TDK	C1608X7R1H103K080AA
8	3	C15、C23、C57	Samsung	CL21B106KOQNNNE
9	1	C16	Kemet	C0603C472K2RACTU
10	1	C19	TDK	C3216C0G2A104J160AE
11	2	C22、C79	TDK	C1608X7R1H223K080AA
12	6	C25、C26、C56、C67、C75、C76	TDK	C1608X7R1E105K080AB
13	1	C27	Kemet	C1206C102JGRCTU
14	20	C28、C29、C30、C32、C34、C35、C36、C37、C38、C39、C40、C41、C42、C43、C44、C45、C46、C85、C86、C87	TDK	CGA5L1X8L1E106K160AC
15	1	C33	TDK	Not Used
16	6	C47、C48、C49、C50、C53、C64	TDK	C1608X7R1H224K080AB
17	2	C70、C72	TDK	C1608C0G2A102J080AA
18	2	C83、C84	-	Not Used
19	1	DS1	Würth	150060GS75000
20	2	D1、D3	On	BAS20HT1G
21	1	D2	On	MBR2H100SFT3G
22	1	D13	On	MM5Z5V1T1G
23	2	D16、D24	NXP	BAS516、135
24	4	D18、D19、D33、D43	Toshiba	CRH01(TE85L, Q, M)
25	1	D44	ON	MM5Z5V6T1G
26	1	J1	Harwin	M22-5320505
27	1	Lr	ICE	LP02-800-1S
28	8	Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6、Q7、Q8	Infineon	ISC031N08NM6
29	16	Q9、Q10、Q11、Q12、Q13、Q14、Q15、Q16、Q17、Q18、Q19、Q20、Q21、Q22、Q23、Q24	Infineon	IQE006NE2LM5ATMA1
30	1	RT2	Murata	NCP15WB473F03RC
31	1	R1	Panasonic	ERJ-3EKF3011V
32	3	R2、R70、R71	Panasonic	ERJ-3EKF1001V
33	9	R3、R4、R16、R20、R23、R26、R27、R28、R29	Panasonic	ERJ-3EKF1002V

LLC 变换器

附录

项目	数量	位号	制造商	型号
34	4	R5、R6、R65、R87	Panasonic	ERJ-3EKF2001V
35	1	R7	Panasonic	ERJ-8ENF1500V
36	1	R9	Panasonic	ERA-3AEB103V
37	1	R10	Panasonic	ERA-3AEB112V
38	1	R12	Panasonic	ERJ-3EKF1202V
39	2	R13、R96	Panasonic	ERJ-3EKF20R0V
40	1	R14	Panasonic	ERJ-3EKF3321V
41	1	R15	Panasonic	ERJ-3EKF2002V
42	3	R17、R21、R22	Panasonic	ERJ-3EKF1000V
43	3	R18、R69、R73	Panasonic	未使用
44	1	R19	Panasonic	ERJ-3EKF2550V
45	4	R24、R25、R61、R89	Panasonic	ERJ-3GEY0R00V
46	24	R30、R31、R32、R38、R39、R40、R43、R44、R45、R46、R49、R50、R51、R52、R53、R54、R55、R56、R58、R63、R76、R77、R79、R80	Panasonic	ERJ-3RQF1R0V
47	1	R33	Panasonic	ERJ-3EKF51R1V
48	1	R34	Panasonic	ERA-3AEB104V
49	1	R35	Panasonic	ERA-3AEB132V
50	1	R36	Panasonic	ERJ-3EKF2213V
51	1	R37	Panasonic	ERJ-3EKF4871V
52	1	R47	Panasonic	ERJ-3EKF9531V
53	1	R48	Panasonic	ERJ-3EKF1741V
54	1	R57	Panasonic	ERJ-3EKF1243V
55	1	R62	Panasonic	ERJ-3EKF22R0V
56	2	R64、R81	Panasonic	ERJ-6RQF1R0V
57	2	R66、R86	Panasonic	ERJ-3EKF10R0V
58	1	R72	Panasonic	ERJ-3EKF1272V
59	1	R82	Panasonic	ERJ-6ENF5110V
60	1	R85	Panasonic	ERJ-6ENF2002V
61	10	TP1、TP2、TP3、TP4、TP5、TP6、TP7、TP8、TP9、TP10	HARWIN	S2761-46R
62	1	T1	Proterial	EQ25-ML27D 和 PLT-ML27D
63	1	T3	Coilcraft	LPD5030V-224MR_B
64	1	U1	Infineon	XDPP1100-Q024
65	4	U2、U4、U5、U13	Infineon	2EDL8034-G3C
66	1	U10	TI	OPA140AIDBVT
67	1	U11	TI	LM5018SD/NOPB
68	1	U14	Infineon	2DIB0401F

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率
LLC 变换器



附录

项目	数量	位号	制造商	型号
69	1	U20	LT	LT1460KCS3-3.3#TRMPBF
70	1	U21	Fairchild	FODM8801A
71	1	W1	Belden	8019 000100
72	3	1、2、3	Mil Max	3104-3-00-15-00-00-08-0
73	4	4、5、9、10	Mil Max	4357-0-00-15-00-00-03-0

参考文献

参考文献

- [1] Infineon Technologies AG: *OptiMOS™ 6 80 V MOSFET ISC031N08NM6*, Datasheet; [Available online](#).
- [2] Infineon Technologies AG: *OptiMOS™ 5 25 V MOSFET IQE006NE2LM5*, Datasheet; [Available online](#).
- [3] Infineon Technologies AG: *EiceDRIVER™ gate driver 2EDL8034G3C*, Datasheet; [Available online](#).
- [4] Infineon Technologies AG: *Dual-channel digital isolator 2DIB0410F*, Datasheet; [Available online](#).
- [5] Infineon Technologies AG: *Digital power controller XDPP1100*, Datasheet; [Available online](#).
- [6] Infineon Technologies AG: *Application note, “The XDPP1100 digital power supply controller”*, Infineon Technologies, July 2020; [Available online](#).
- [7] Infineon Technologies AG: *Download XDPP1100 GUI*; [Available online](#).

采用 XDPP1100 数字控制器的 1 kW 48 V 转 12 V 电信四分之一砖型固定频率
LLC 变换器

修订记录

修订记录

Document revision	Date	Description of changes
V 1.0	2020-09-30	First release
V 1.1	2020-10-30	Added power loss analysis
V 1.2	2024-02-01	Introduce EiceDRIVER™ gate driver 2EDL803X-G3C, and 2DIB0410F ISOFACE™ dual-channel digital isolator

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-02-01

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

**© 2024 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.**

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference

AN_2401_PL88_2401_234423

Important notice

The information contained in this application note is given as a hint for the implementation of the product only and shall in no event be regarded as a description or warranty of a certain functionality, condition or quality of the product. Before implementation of the product, the recipient of this application note must verify any function and other technical information given herein in the real application. Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind (including without limitation warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party) with respect to any and all information given in this application note.

The data contained in this document is exclusively intended for technically trained staff. It is the responsibility of customer's technical departments to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product information given in this document with respect to such application.

Warnings

Due to technical requirements products may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by Infineon Technologies in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, Infineon Technologies' products may not be used in any applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can reasonably be expected to result in personal injury.



免责声明

请注意，本文件的原文使用英文撰写，为方便客户浏览英飞凌提供了中文译文。该中文译文仅供参考，并不可作为任何论点之依据。

由于翻译过程中可能使用了自动化程序，以及语言翻译和转换过程中的差异，最后的中文译文与最新的英文版本原文含义可能存在不尽相同之处。

因此，我们同时提供该中文译文版本的最新英文原文供您阅读，请参见 <http://www.infineon.com>

英文原文和中文译文版本之间若存有任何歧异，以最新的英文版本为准，并且仅认可英文版本为正式文件。

您如果使用本文件，即表示您同意并理解上述说明。英飞凌不对因翻译过程中可能存在的任何不完整或不准确信息而产生的任何直接或间接损失或损害负责。英飞凌不承担中文译文版本的完整性和准确性责任。如果您不同意上述说明，请不要使用本文件。

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

重要通知

版本 2026-09-16

Infineon Technologies AG 出版，
德国 Neubiberg 85579

版权 © 2026 Infineon Technologies AG
及其关联公司。
保留所有权利。

**Do you have a question about this
document?**

Email:

erratum@infineon.com

Infineon Technologies AG 及其关联公司（以下简称“英飞凌”）销售或提供和交付的产品（可能也包括样品，且可能由硬件或软件或两者组成）（以下简称“产品”），应遵守客户与英飞凌签订的框架供应合同或其他书面协议的条款和条件，如无上合同或其他书面协议，则应遵守适用的英飞凌销售条件。只有在英飞凌明确书面同意的情况下，客户的一般条款和条件或对适用的英飞凌销售条件的偏离才对英飞凌具有约束力。

为避免疑义，英飞凌不承担侵犯第三方权利的所有保证和默示保证，例如对特定用途/目的的适用性或适销性的保证。

英飞凌对与样品、应用或客户对任何产品的具体使用有关的任何信息或本文件中给出的任何示例或典型值概不负责。

本文件中包含的数据仅供具有技术资格和技能的客户代表使用。客户有责任评估产品对预期应用和客户特定用途的适用性，并在预期应用和客户特定用途中验证本文件中包含的所有相关技术数据。客户有责任正确设计、编程和测试预期应用的功能性和安全性，并遵守与其使用相关的法律要求。

除非英飞凌另行明确批准，否则产品不得用于任何因产品故障或使用产品的任何后果可合理预期会导致人身伤害的应用。但是，上述规定并不妨碍客户在英飞凌明确设计和销售的使用领域中使用任何产品，但是客户对应用负有全部责任。

英飞凌明确保留根据适用法律，如《德国版权法》（UrhG）第 44b 条，将其内容用于商业资料和数据勘探（TDM）的权利。

如果产品包含安全功能：

由于任何计算设备都不可能绝对安全，尽管产品采取了安全措施，但英飞凌不保证产品不会被入侵、数据不会被盗或遗失，或不会发生其他漏洞（以下简称“安全漏洞”），英飞凌对任何安全漏洞不承担任何责任。

如果本文件包含或引用软件：

根据美国、德国和世界其他国家的知识产权法律和条约，该软件归英飞凌所有。英飞凌保留所有权利。因此，您只能按照软件附带的软件授权协议的规定使用本软件。

如果没有适用的软件授权协议，英飞凌特此授予您个人的、非排他性的、不可转让的软件知识产权授权（无权转授权）：(a) 对于以源代码形式提供的软件，仅在贵组织内部修改和复制该软件用于英飞凌硬件产品；及 (b) 对于以二进制代码 (binary code) 形式对外向终端用户分发该软件，仅得用于英飞凌硬件产品。禁止对本软件进行任何其他使用、复制、修改、翻译或编译。有关产品、技术、交货条款和条件以及价格的详细信息，请联系离您最近的英飞凌办公室或访问 <https://www.infineon.com>。