

Athos Zhao, Miranda Gu, Andrew Xiong

摘要

大多数降压转换器具有有限的占空比。为了获得更大的占空比以支持较低输入电压下的额定输出，一些转换器会在占空比较高时降低其频率。然而，对于那些具有 D-CAP3™（恒定导通时间）控制的转换器，它可通过延长导通时间（即导通时间延长 (OTE) 运行）来实现此目标。本应用手册详细介绍了这种基于 TPS56837 的大负荷功能，包括实现大负荷、OTE 在 D-CAP3™ 控制模式下的性能和优势。

内容

1 引言.....	2
2 D-CAP3 控制架构.....	2
2.1 自适应导通时间控制.....	2
2.2 D-CAP3 控制.....	3
3 大占空比运行.....	4
3.1 降压转换器的最短关断时间性能.....	4
3.2 导通时间延长功能.....	4
4 基准测试和比较.....	6
4.1 TPS56837 和 TPS56637 之间的比较.....	6
4.2 TPS56837 和 TPS568230 之间的导通时间延长比较.....	7
4.3 通过导通时间延长功能改善负载瞬态.....	8
5 总结.....	9
6 参考文献.....	9
7 同样来自 TI.....	10

插图清单

图 2-1. 自适应导通时间控制 (AOT 控制).....	2
图 2-2. D-CAP3 详细控制方框图.....	3
图 3-1. 未触发最短关断时间的正常运行.....	4
图 3-2. 已触发最短关断时间的运行.....	4
图 3-3. 导通时间延长功能的流程图.....	5
图 3-4. TPS56837 的导通时间延长.....	5
图 4-1. 无导通时间延长的正常运行 (Vin=8V).....	6
图 4-2. 导通时间延长 (Vin=6.48V).....	6
图 4-3. 导通时间延长 (Vin=5.52V).....	6
图 4-4. 导通时间延长 (Vin=5.12V).....	6
图 4-5. TPS56637 的 6V 输入至 4V 输入.....	7
图 4-6. TPS56837 的 6V 输入至 4V 输入.....	7
图 4-7. 频率随占空比的变化.....	7
图 4-8. TPS568230 的线路瞬态 (VIN 从 8V 至 6V).....	8
图 4-9. TPS56837 的线路瞬态 (VIN 从 8V 至 6V).....	8
图 4-10. 未触发导通时间延长功能时的 TPS56637 负载瞬态.....	8
图 4-11. 触发导通时间延长功能时的 TPS56837 负载瞬态.....	8

表格清单

表 4-1. TPS56837 的工作台设置.....	6
-----------------------------	---

商标

D-CAP3™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

对于 D-CAP3™ 转换器，其中一些转换器不具有大占空比特性，其最大占空比由最短关断时间和频率决定。一些转换器（例如 TPS568230）可以多次延长其导通时间，以支持更大的占空比，[实现 TPS568230 的大占空比运行](#)应用手册中对此进行了介绍。其他转换器（例如 TPS56837）能够平稳地延长导通时间。本应用手册将详细介绍 TPS56837 的这种特性。

TPS56837 是一款易于使用的高效同步降压转换器，具有 4.5V 至 28V 的宽输入电压范围，并在 0.6V 至 13V 的输出电压范围内支持高达 8A 的持续输出电流。TPS56837 包含导通时间延长功能，可支持高达 98% 的大占空比运行。

2 D-CAP3 控制架构

D-CAP3™ 模式控制架构具有内部补偿电路，并结合了自适应导通时间控制（AOT 控制）以实现伪固定频率运行。

2.1 自适应导通时间控制

自适应导通时间控制是降压稳压器的一种非线性控制架构。在每个开关周期的开始，高侧 MOSFET 将开启。内部一次性计时器到时后，此 MOSFET 将关闭。导通时间时长是根据输出电压 V_{OUT} 按比例设置的，它与转换器输入电压 V_{IN} 成反比，以便在输入电压工作范围内保持伪固定频率。当反馈电压降至基准电压之下时，导通时间计时器将重置，高侧 MOSFET 将再次开启。

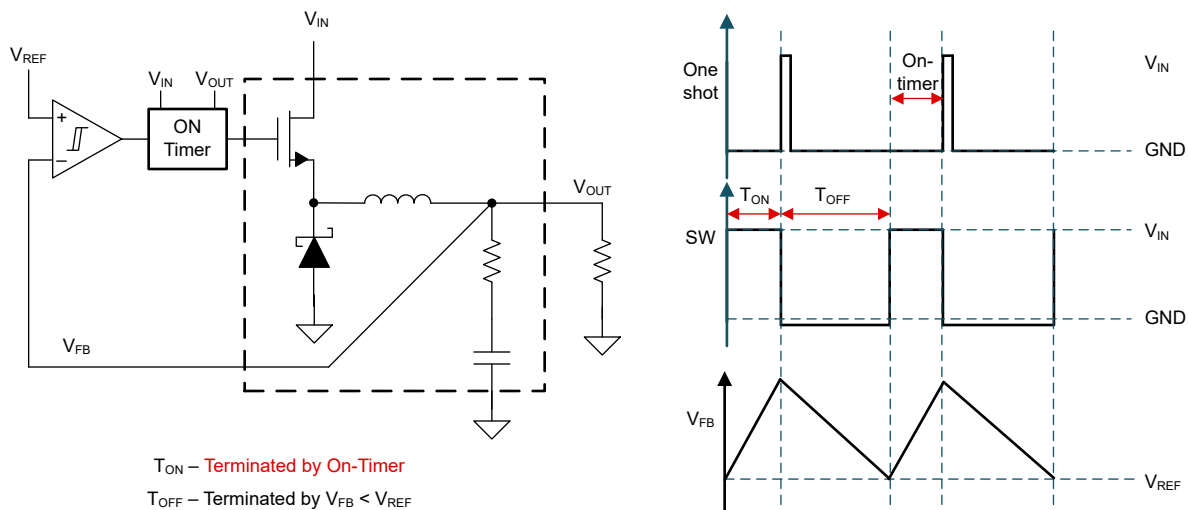


图 2-1. 自适应导通时间控制（AOT 控制）

在 ACOT 控制中，伪固定频率是根据 [方程式 1](#) 和 [方程式 2](#) 中的计算设计的。

$$T_{ON} = D \times T_{SW} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \times F_{SW}} \quad (1)$$

$$F_{SW} = \frac{1}{T_{SW}} \quad (2)$$

根据 [方程式 1](#)，如果 T_{ON} 通过 V_{OUT} 和 V_{IN} 进行调节，则开关频率 F_{SW} 将保持恒定。对于 TPS56837 器件，开关频率 F_{SW} 可选为 500kHz、800kHz 或 1.2MHz。

2.2 D-CAP3 控制

图 2-2 展示了 D-CAP3™ 转换器的详细控制方框图。

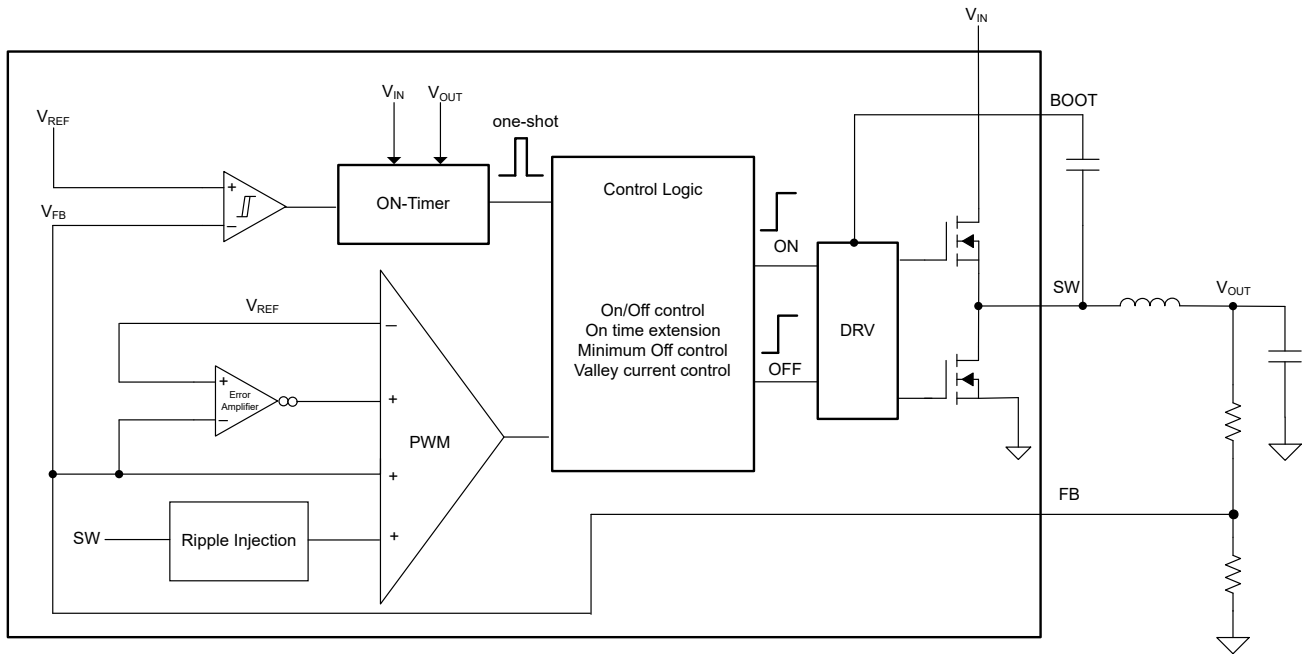


图 2-2. D-CAP3 详细控制方框图

为了提高环路稳定性，并使输出电压几乎没有纹波，添加了额外的纹波注入电路。还包含一个误差放大器，可提升输出电压精度。

在 D-CAP3™ 器件的控制块中，自举电容器需要在低侧 MOSFET 导通期间充电，同时，通过在这段关断时间内测量 SW 节点电压来监测电感器谷值电流，这两者都要求尽可能短的关断时间。

我们知道，大多数高侧 MOSFET 都是 N-MOS，需要栅极驱动器的电压高于 V_{in} 来保持高侧 MOS 导通，该电压由 BOOT 电容器提供。该电容器在关断时间内充电，因此关断时间具有最小值，可确保 BOOT 电容器的电荷足够。

对于 D-CAP3™ 转换器，一次性计时器到期时，高侧 MOSFET 将关断，低侧 MOSFET 将导通。低侧 MOSFET 的导通过程会引起 SW 振铃。测量 SW 节点电压时，需要包括消隐时间，以消除内部 SW 节点振铃。此延时时间会导致高侧 MOSFET 具有尽可能短的关断时间。

3 大占空比运行

3.1 降压转换器的最短关断时间性能

占空比随着输入电压接近输出电压而增加，高侧开关的关断时间变短。当关断时间达到最小值时，便不能再下降，即使输入电压继续降低，也会保持最小值。

图 3-1 展示了正常运行期间的波形。当 FB 电压低于内部基准电压时，导通时间开始；当单次脉冲在恒定导通时间计时器之后时，关断时间开始。最短关断时间信号在关断时间开始后启动计时器，并保持数据表中显示的恒定最短关断时间值。如果关断时间长于最短关断时间，该信号将不起作用。

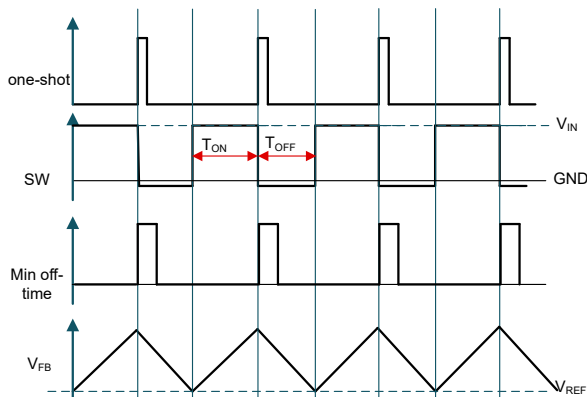


图 3-1. 未触发最短关断时间的正常运行

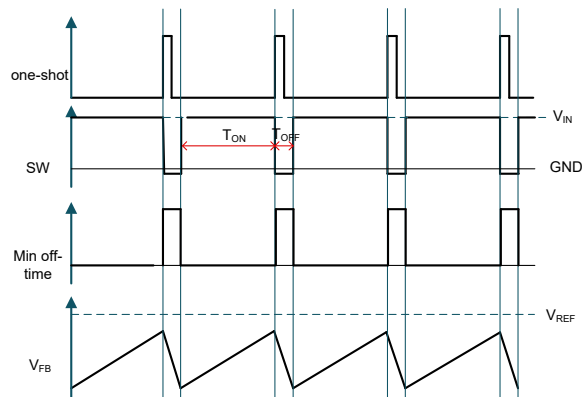


图 3-2. 已触发最短关断时间的运行

图 3-2 展示了触发最短关断时间时转换器的运行情况。在环路决定的关断时间小于最短关断时间后，即使 FB 电压低于基准电压，关断时间也不再遵循 V_{FB} 比较器，而是仅运行恒定的最小值，而导通时间仍由一次性电路决定，并与 V_{OUT}/V_{IN} 成比例。在这两个限制下，输出电压最终将降至额定基准值以下并达到另一种平衡。

如果没有导通时间延长功能，很明显，在触发最短关断时间时，占空比是固定的。根据方程式 3，由于 T_{off} 具有最小值，因此占空比 D 具有最大值。如果 F_{SW} 为固定值，则 $T_{OFF(min)}$ 越小，意味着可以支持的占空比越大。或者，如果 $T_{OFF(min)}$ 是固定的，则可以用较小的 F_{SW} 支持较大的占空比。

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{SW}} = 1 - \frac{T_{OFF}}{T_{SW}} = 1 - F_{SW} \times T_{OFF} \quad (3)$$

3.2 导通时间延长功能

为了支持更高的占空比运行，TPS56837 包含导通时间延长功能。在正常运行期间，此功能的运作方式是将高侧 FET 导通时间增加到超过该时间，从而降低工作频率并保持大占空比。

从应用手册 [实现 TPS568230 的大占空比运行](#) 中，我们可以知道 TPS568230 通过两次或三次一次性触发信号延长其导通时间。但是，与 TPS568230 的 OTE 不同，TPS56837 使用高级一次性电路来延长其导通时间计时器。

导通时间延长功能根据图 3-3 流程图中实现。

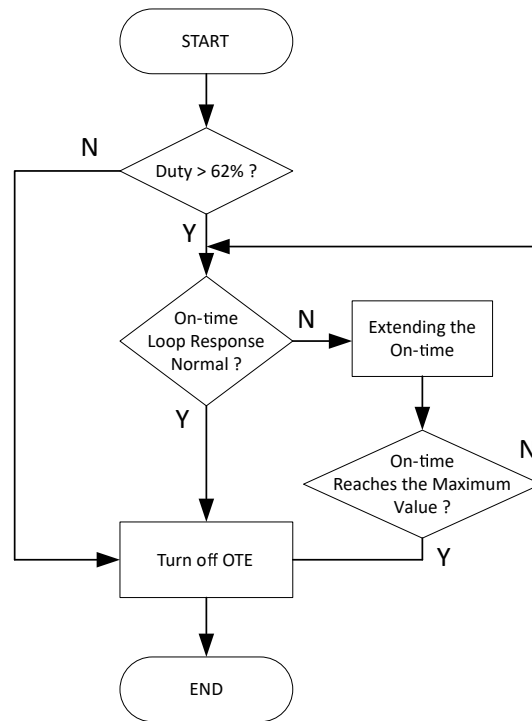


图 3-3. 导通时间延长功能的流程图

TPS56837 仅在导通期间实现大占空比运行。当占空比大于 62% 时，器件开始检测其环路响应信号，并决定是否逐周期延长导通时间。然而，导通时间仍然具有最大值，一旦达到最大值，便不能继续延长。图 3-4 所示为 OTE 下的性能。导通时间计时器根据环路响应信号进行延长，反馈电压可保持在基准点附近。

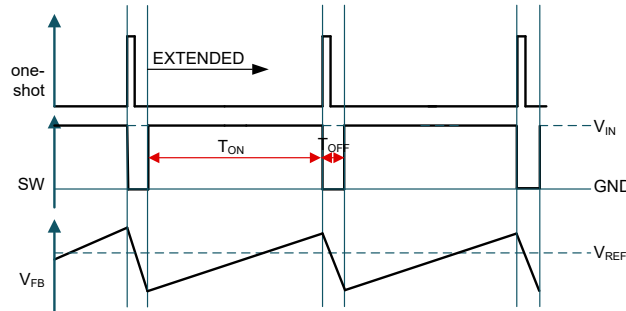


图 3-4. TPS56837 的导通时间延长

4 基准测试和比较

基准测试是在 TPS56837EVM 上完成的。有关详细信息，请参阅 [TPS56837EVM 评估模块用户指南](#)。表 4-1 中列出了工作台测试设置和配置。

表 4-1. TPS56837 的工作台设置

V _{OUT} (V)	L (μH)	C _{out} (μF)	CFF (pF) / C15	RFF (kΩ) / R14	R _{top} (kΩ) / R9	R _{bot} (kΩ) / R8	模式
5	3.3	4 × 22μF (1206 , 10V)	100	0	220	30	PSM / 500kHz

图 4-1 至图 4-4 中的波形展示了在不同输入电压下触发导通时间延长功能和不触发导通时间延长功能时的 SW 行为。

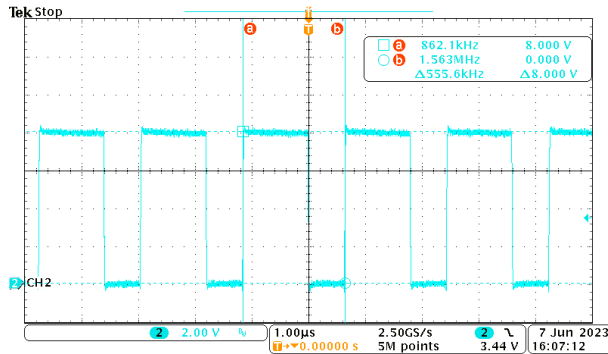


图 4-1. 无导通时间延长的正常运行 (Vin=8V)

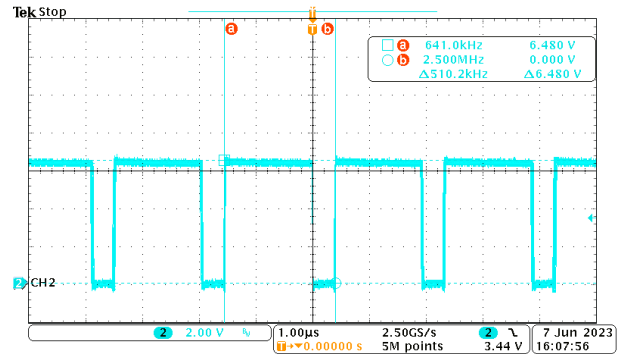


图 4-2. 导通时间延长 (Vin=6.48V)

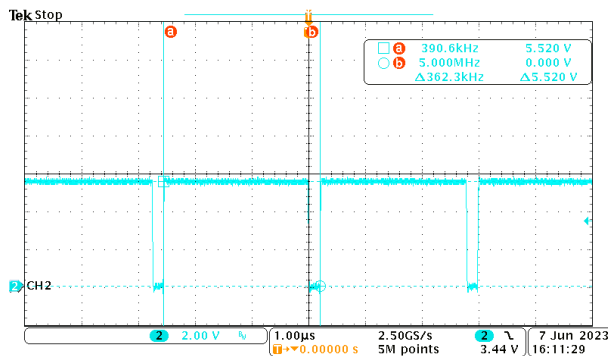


图 4-3. 导通时间延长 (Vin=5.52V)

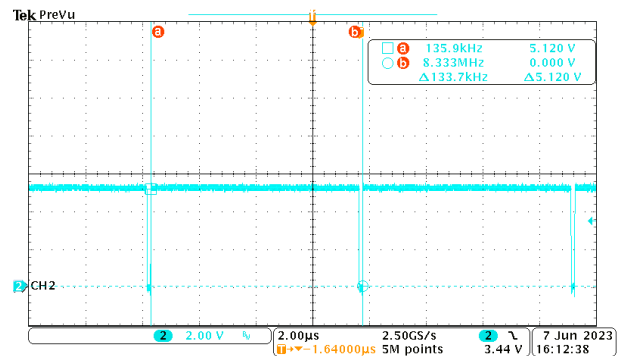


图 4-4. 导通时间延长 (Vin=5.12V)

4.1 TPS56837 和 TPS56637 之间的比较

TPS56637 是一款采用 D-CAP3™ 控制的 6A 同步降压转换器。它与 TPS56837 引脚对引脚兼容，但不具有大占空比功能。

根据前面的分析，TPS56637 可支持的最大占空比仅取决于频率和尽可能短的关断时间。因此，我们可以根据 [方程式 3](#) 获得最大占空比。考虑到实际频率为 550kHz，而最短关断时间为 200ns，我们可以计算出最大占空比为 89%。这意味着，如果输出电压为 5V，则输入电压将高于约 $5 \div 89\% = 5.62V$ 。

图 4-5 和图 4-6 展示了 TPS56837EVM 和 TPS56637EVM 的线路压降性能。EVM 测试设置与表 4-1 相同。

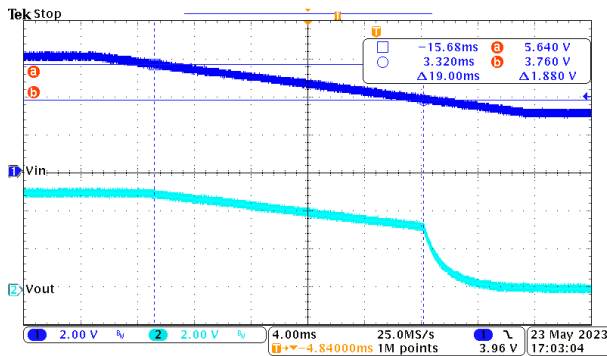


图 4-5. TPS56637 的 6V 输入至 4V 输入

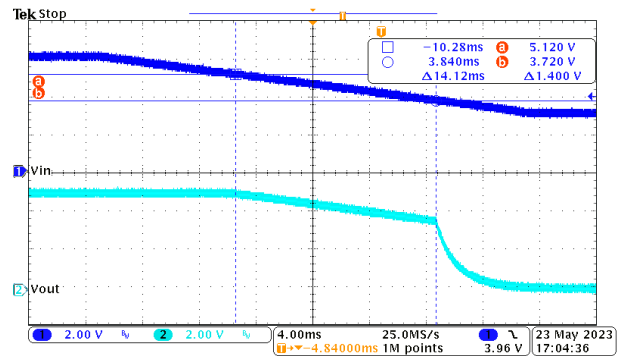


图 4-6. TPS56837 的 6V 输入至 4V 输入

从波形可以明显看出，TPS56837 可以支持 5V 输出，具有更宽的输入电压范围。当输入低于 5.64V 时，TPS56637 会出现输出压降，而 TPS56837 的输入电压为 5.12V。电压降至 3.7V 以下后，由于输入 UVLO，两个器件均关断。

4.2 TPS56837 和 TPS568230 之间的导通时间延长比较

TPS568230 和 TPS56837 都具有导通时间延长功能，但其实现方式不同。

TPS568230 的 OTE 由其占空比决定。当 $1.2 < V_{IN}/V_{OUT} \leq 1.6$ 时，TON 将延长一个时间间隔。当 $V_{IN}/V_{OUT} \leq 1.2$ 时，TON 将延长两个时间间隔。因此，这会导致 OTE 运行期间频率突然变化。

TPS56837 的 OTE 可以在 OTE 运行期间平稳地降低其频率，从而在 OTE 运行期间实现更佳的性能。

图 4-7 提供了频率随 TPS568230 和 TPS56837 的占空比的变化。

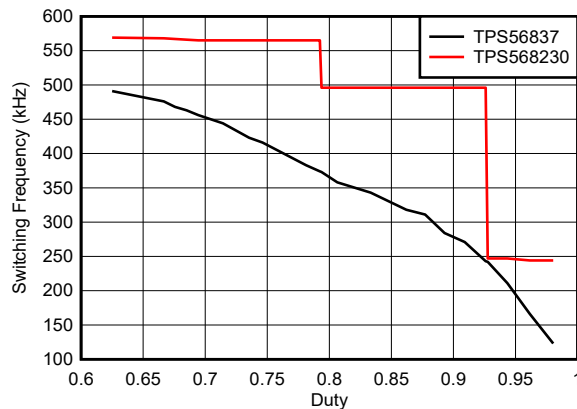


图 4-7. 频率随占空比的变化

对于 TPS568230，由于导通时间和频率的突然变化，输出电压在其 OTE 条件的边界处会有一个瞬态过程。另一方面，在 OTE 过程中，TPS56837 的频率会平稳变化，具有更好的线路瞬态性能。

图 4-8 和图 4-9 展示了大占空比条件下的线路瞬态性能。很明显，我们可以看到 TPS568230 在两个边界处具有大约 12mV 的电压过冲，而 TPS56837 则没有。

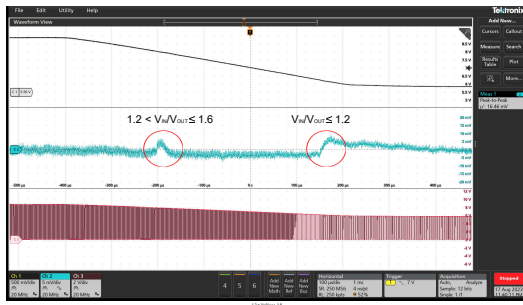


图 4-8. TPS568230 的线路瞬态 (VIN 从 8V 至 6V)

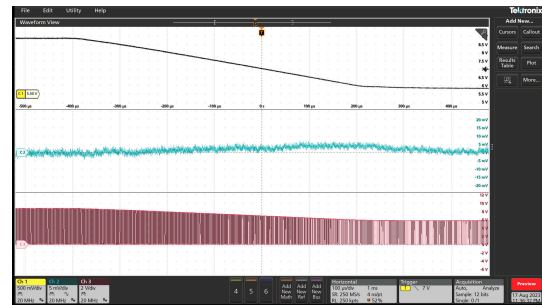
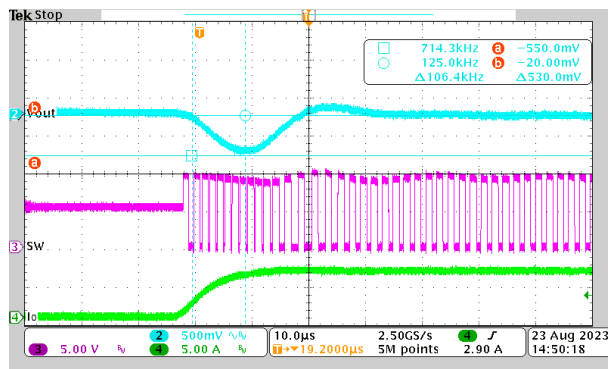


图 4-9. TPS56837 的线路瞬态 (VIN 从 8V 至 6V)

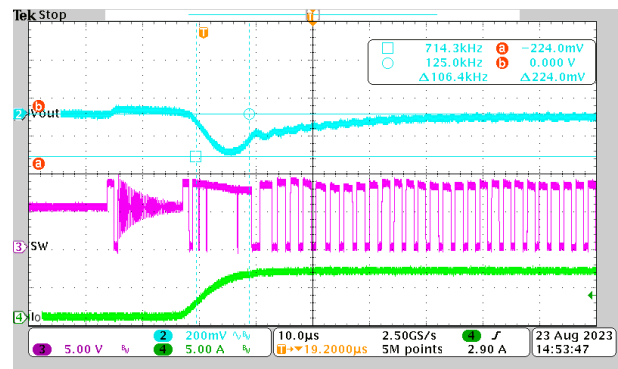
4.3 通过导通时间延长功能改善负载瞬态

除了提高线路压降性能，导通时间延长功能还可改善负载瞬态响应。图 4-10 和图 4-11 展示了比较 TPS56837 和 TPS56637 的负载瞬态测试结果。设置与前面所示的设置相同。这些图展示了从轻负载到重负载瞬态期间的下冲改善情况。TPS56637 的下冲为 530mV，而具有导通时间延长功能的 TPS56837 的下冲为 224mV。

当负载从 0A 变为 8A 时，输入电压将下降约 1V，输出电压也将下降并影响环路响应，这两者都将使导通时间延长功能生效。从图 4-11 可以看出，SW 信号表示导通时间延长。与图 4-10 中的非导通时间延长功能相比，通过这种较长的 HSFET 导通时间，可以向输出端充入更多能量，使 V_{OUT} 的压降小于负载变化时的压降。



V_{IN} = 8V, V_{OUT} = 5V, I_{OUT} 为 0A 至 6A, 压摆率 = 2.5A/us
图 4-10. 未触发导通时间延长功能时的 TPS56637 负载瞬态



V_{IN} = 8V, V_{OUT} = 5V, I_{OUT} 为 0A 至 6A, 压摆率 = 2.5A/us
图 4-11. 触发导通时间延长功能时的 TPS56837 负载瞬态

5 总结

TPS56837 器件设计有导通时间延长功能，可支持高达 98% 的大占空比运行。借助于这种改进，线路压降、频率调节、线路瞬态和负载瞬态性能也得到了提升。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TPS56837 4.5V 至 28V 输入、8A 同步降压转换器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [TPS56637 4.5V 至 28V 输入、6A 同步降压转换器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [实现 TPS568230 的大占空比运行](#)。
4. 德州仪器 (TI), [TPS56837 降压控制器评估模块用户指南](#)。

7 同样来自 TI

有多种 D-CAP3 转换器具有与 TPS56837 相同的大占空比运行模式，包括 TPS566231、TPS56C231、TPS568231、TPS51383、TPS51386、TPS51385、TPS568236、TPS56x24x、TPS56x25x、TPS563203/6、TPS562203/6、TPSM86325x。

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