

Farheen Shafique, Juergen Neuhaeusler

摘要

高效的电力输送网络 PDN 设计是一项具有挑战性的任务，因为 PDN 的所有部分都彼此相连。一个元件的变化会对所有其他元件产生重大影响。本应用手册重点介绍滤波器的设计，还论述了在添加输入滤波器或第二级输出 LC 滤波器时，如果未留意某些重要参数而设计不当所带来的稳定性问题。此外，本应用手册还介绍了一些阻尼方法，用于解决因降压转换器添加滤波器而导致的稳定性问题。

内容

1 概述.....	2
2 详细说明.....	2
2.1 输入滤波器设计.....	2
2.2 输出滤波器设计 (第 2 级).....	3
3 测量与分析.....	3
4 滤波器阻尼.....	5
5 使用阻尼滤波器进行进一步分析.....	6
6 结论.....	7
7 Reference.....	7

插图清单

图 2-1. TPS62810-Q1 降压转换器与输入滤波器和第二级输出滤波器的修改版原理图.....	2
图 3-1. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器的输出阻抗.....	4
图 3-2. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器的增益幅度和相位图.....	4
图 3-3. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器模型输出电压的时域响应.....	4
图 4-1. 无阻尼以及采用两种不同阻尼技术的输入滤波器模型.....	5
图 4-2. 采用不同阻尼技术的滤波器模型的频率图.....	6
图 5-1. 具有阻尼滤波器的降压转换器的输出阻抗曲线.....	6
图 5-2. 具有阻尼滤波器的降压转换器的增益幅度和相位图.....	7
图 5-3. 具有阻尼滤波器的降压转换器模型输出电压的时域响应.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 概述

二阶低通 LC 滤波器是经常与直流/直流转换器一起使用的滤波器类型。该滤波器用于抑制高频噪声或更大限度地减小输出电压纹波。在输入端和输出端添加滤波器后，如果未对滤波器采用阻尼策略，直流/直流转换器的总输出阻抗会出现高谐振峰值。当负载消耗电流时，由于阻抗曲线中的这些谐振峰值，输出端的电压可能会变化。另一个问题是，如果滤波器的谐振频率在控制环路的交叉频率范围内，则会影响控制环路稳定性，进而影响器件的瞬态特性。直流/直流转换器充当输入滤波器的负载，提供负变阻。当这个负动态电阻连接至输入滤波器时，将充当负振荡器电路。如果是欠阻尼系统，则会导致系统不稳定。

本应用手册详细论述了如何为直流/直流转换器设计输入滤波器和二阶 LC 滤波器，以及在设计时需要注意哪些参数。本应用手册以 [TPS6281x-Q1](#) 为例进行介绍。

2 详细说明

将输入滤波器和第二级输出滤波器与 [TPS6281x-Q1 2.75V 至 6V 可调频率降压转换器](#) 数据表直流/直流降压转换器相连的配置如图 2-1 所示。

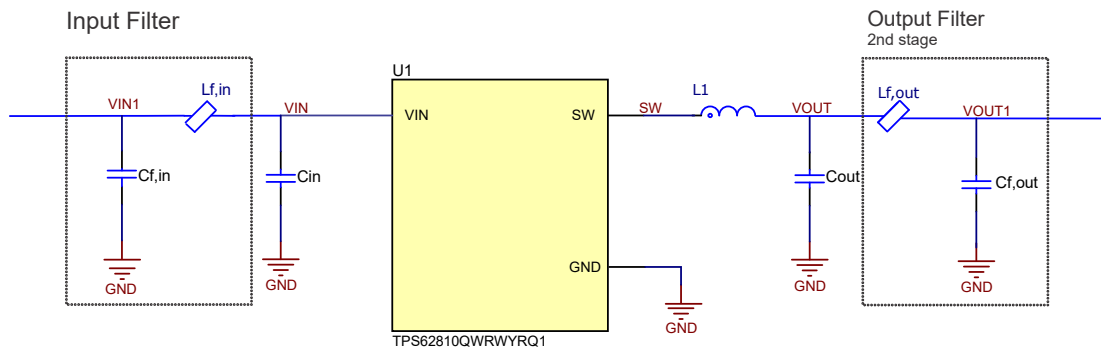


图 2-1. TPS62810-Q1 降压转换器与输入滤波器和第二级输出滤波器的修改版原理图

2.1 输入滤波器设计

增益和输出阻抗是设计输入滤波器时需要考虑的两个重要参数。整个电路的最大阻抗需要保持在转换器的目标阻抗限值以下。可以使用 [方程式 1](#) 计算出直流/直流转换器的目标阻抗 Z_{target} 。

$$Z_{target} = \frac{2 \cdot V_{dd} \cdot \Delta V}{I_{max}} \quad (1)$$

在该公式中， V_{dd} 是电源轨的电源电压， I_{max} 是芯片在最坏情况下的最大电流， ΔV 是电源轨电压电平的最大允许变化。在目标阻抗计算中，使用瞬态电流是因为此电流的斜率会触发 PDN 阻抗的高谐振频率，从而导致输出电压显著变化。

下面进一步介绍了为输入滤波器选择电感值和电容值的设计步骤。增益值是在设计输入滤波器的第一步计算出的。不使用滤波器时的最大输入电流幅值 I_{in_max} 以及所需的输入电流幅值 I_{req} 对于计算滤波器增益非常重要。最大输入纹波电流可通过 [方程式 2](#) 计算得出。工作条件如下：输入电压 V_{in} 为 5V、输出电压 V_o 为 3.3V、开关频率 f_{sw} 为 2.25MHz、最大负载电流 I_o 为 1A。

$$I_{in_max} = I_o \cdot \sqrt{D(1-D) + \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{V_o}{L \cdot f_{sw} \cdot I_o} \right)^2 \cdot (1-D)^2 \cdot D} \quad (2)$$

在 [方程式 2](#) 中， I_o 是最大负载电流， D 是占空比， V_o 是输出电压， L 是电感值。然后，可以根据所需的输入电流 I_{req} 幅值和计算出的最大输入纹波电流值 I_{in_max} ，使用 [方程式 3](#) 来计算增益。

$$Gain = \sqrt{\frac{I_{req}}{I_{in_max}}} \quad (3)$$

在下一步中，可以使用[方程式 4](#)，根据增益和开关频率 f_{sw} 确定截止频率 $f_{c/o}$ 。

$$Gain = \frac{f_{c/o}}{f_{sw}} \quad (4)$$

此外，第三步还计算转换器的输入阻抗。所有这些值均来自 [TPS6281x-Q1 2.75V 至 6V 可调频率降压转换器](#) 数据表中针对器件工作条件绘制的效率与输出电流关系图。

$$Z_{in:c} = \frac{V_{in}^2 \cdot \eta}{P_{out}} \quad (5)$$

为了实现整个系统的稳定性，滤波器的输出阻抗 $Z_{out,f}$ 需要小于转换器的输入阻抗 $Z_{in,c}$ 。转换器输入阻抗的八分之一似乎是滤波器输出阻抗的合理限值。

$$Z_{out,f} < \frac{1}{8} \cdot Z_{in:c} \quad (6)$$

在上述公式中计算所有数据后，得出增益值为 0.030，交叉频率为 69.5kHz，滤波器输出阻抗为 1.2 Ω。保留这些值作为基本参数，选择 $L_{f,in}$ 和 $C_{f,in}$ 的值。交流阻抗公式有助于给出最小滤波电容和最大滤波电感值，从而遵守计算得出的阻抗限值。

$$Z_R = R \quad : \quad Z_L = j\omega L \quad , \quad Z_C = \frac{j}{\omega C} \quad (7)$$

在[方程式 7](#)中插入滤波器的最大阻抗值和截止频率后，可得出最大滤波电感为 2.7μH，最小滤波电容为 1.9μH。使用 $L_{f,in}$ 为 530nH 的电感器和 $C_{f,in}$ 为 10μF 的电容器进一步分析滤波器元件，查看其对整个降压转换器稳定性的影响。

2.2 输出滤波器设计 (第 2 级)

输出滤波器的第二级通常用于提高器件的纹波性能，适用于对输出电压变化更敏感的应用。滤波器第二级的最大阻抗限制 $Z_{out,max}$ 可通过[方程式 8](#) 确定。

$$Z_{out,max} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I} \quad (8)$$

在[方程式 8](#)中， ΔV_{out} 是允许的最大输出电压变化，占本设计输出电压的 5%， ΔI 是输出电流的最大变化，即 1A。为输出滤波器的第二级选择的截止频率为 79kHz，计算得出的最大阻抗限值为 0.17 Ω。在[方程式 7](#)中插入这些值后，可得到 12 μF 的最小电容限值和 340nH 的最大电感值。为输出滤波器的第二级选择这些值作为 $L_{f,out}$ 和 $C_{f,out}$ 。

3 测量与分析

[TPS6281x-Q1 2.75V 至 6V 可调频率降压转换器](#) 数据表直流/直流降压转换器的输入端和输出端设计的滤波器采用[图 3-1](#)所示的配置进行连接。在转换器的输入端和输出端添加设计的滤波器后，接下来将显示测量的输出阻抗、负载瞬态响应和波特图响应。

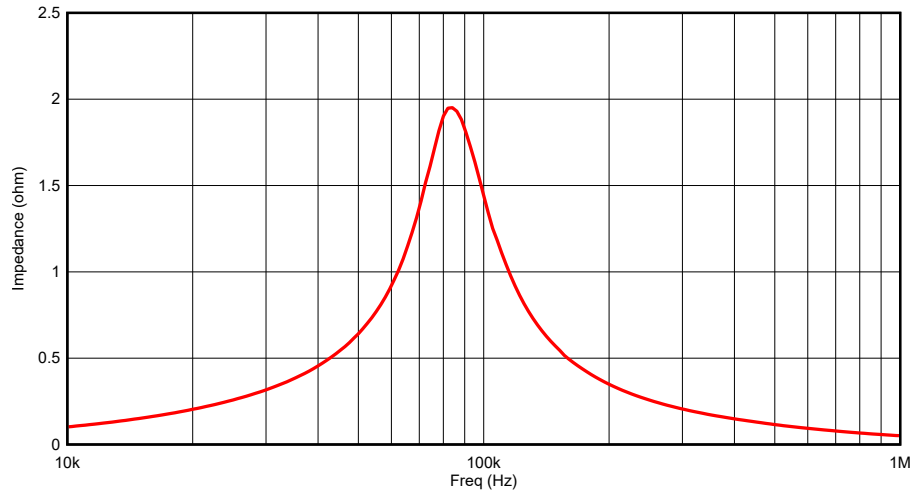


图 3-1. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器的输出阻抗

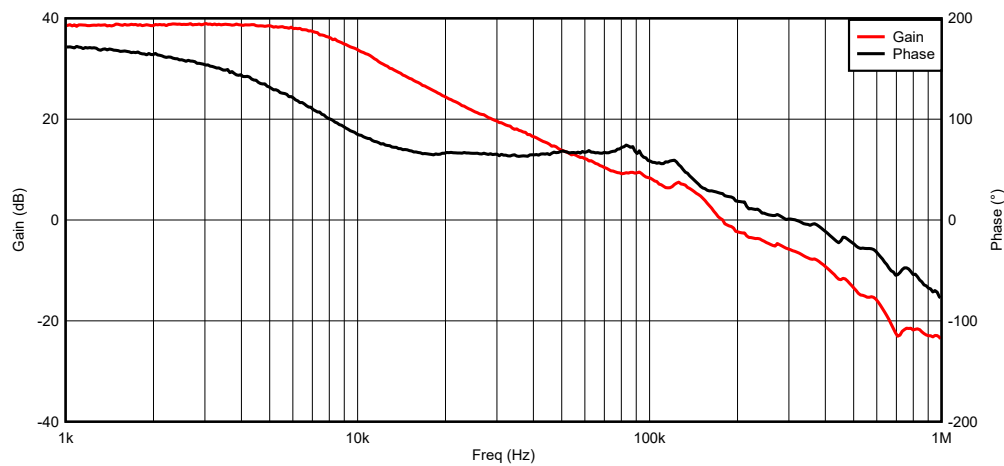


图 3-2. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器的增益幅度和相位图

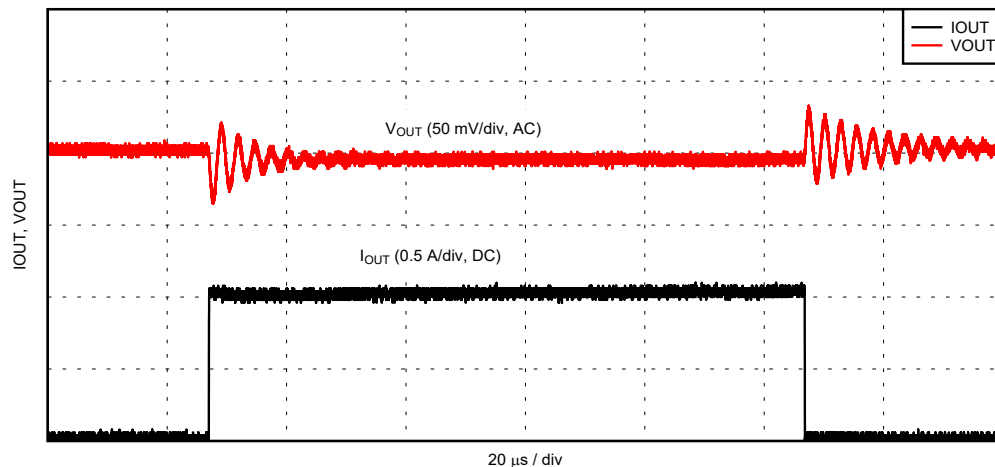


图 3-3. 具有欠阻尼滤波器的降压转换器模型输出电压的时域响应

输出阻抗可根据[如何测量直流/直流转换器的配电网阻抗](#)应用手册测量得出。在图 3-1 中的输出阻抗图中，第一个谐振峰值可以在 83.4kHz 的频率下看到，接近输出滤波器连接的第二级的谐振频率 79kHz。同时，还测量了控制环路的增益和相位响应，如图 3-2 所示，得出的相位裕度约为 26°。这种低相位裕度会导致输出电压出现不必要的振荡，从而严重影响电压敏感型应用的运行。瞬态输出电压响应随着相位裕度的减小而产生振荡，这在图 3-3 中的瞬态输出电压响应中也很明显。

这样可以了解转换器的输出阻抗与控制环路稳定性之间的关系。当谐振峰值由负载电流触发时，输出阻抗曲线中谐振峰值的高品质因数会导致较低的相位裕度，从而导致系统的瞬态响应不佳。下一部分论述了滤波器的阻尼方法，这些方法可以通过抑制由添加滤波器引起的谐振峰值来协助解决器件稳定性问题。

4 滤波器阻尼

有两种不同的滤波器阻尼方式可以帮助降低滤波器谐振的品质因数。图 4-1(a) 是不带阻尼的滤波器模型。图 4-1(b) 是具有串联阻尼电阻 R_d 的滤波器阻尼技术，图 4-1(c) 是具有 R_d - C_d 并联支路的滤波器阻尼方法。

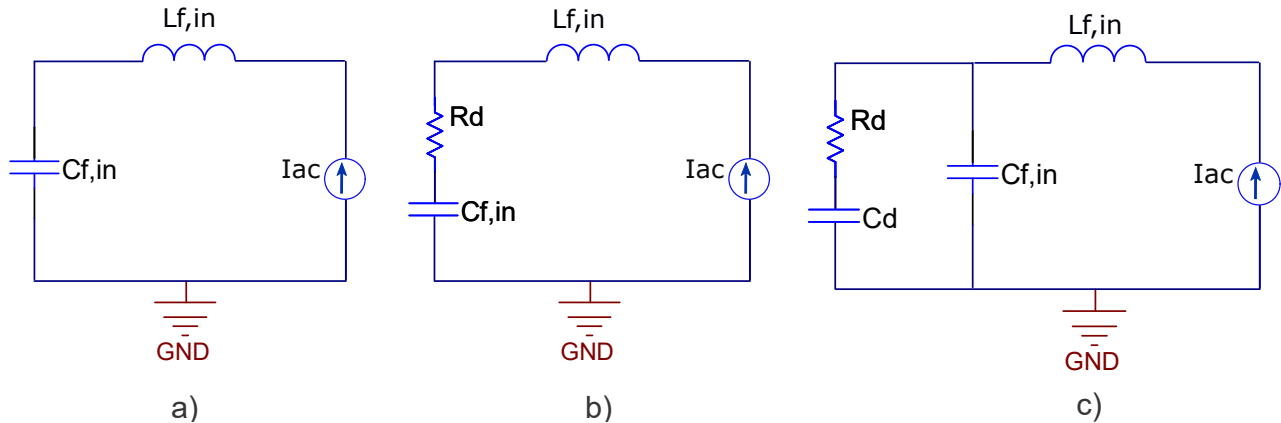


图 4-1. 无阻尼以及采用两种不同阻尼技术的输入滤波器模型

品质因数 Q 是决定任何谐振阻尼的参数。高品质因数可实现更剧烈的谐振峰值。方程式 9 有助于确定串联 RLC 电路的品质因数。

$$Q = \frac{1}{R_d} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

R_d 是阻尼电阻，可根据特定的 Q 值计算得到， Q 值是根据系统所需的阻尼来选择的。对于临界阻尼系统， Q 取为 1。在方程式 9 中插入 Q 值后，它会将公式转换为方程式 10。

$$R_d = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

此处以输入滤波器为例。借助 $L_{f,in}$ 和 $C_{f,in}$ ，通过方程式 11 确定的 R_d 为 0.23Ω 。在第二种方法中， R_d - C_d 并联支路与滤波器一起用于抑制滤波器的谐振。已计算出阻尼电阻 R_d 值。为了避免影响滤波器截止频率，阻尼电容器 C_d 需要大于滤波电容器。至少五倍的滤波电容器似乎是一个合理的容值。

$$C_d = 5C_{in} = 75 \mu F \quad (11)$$

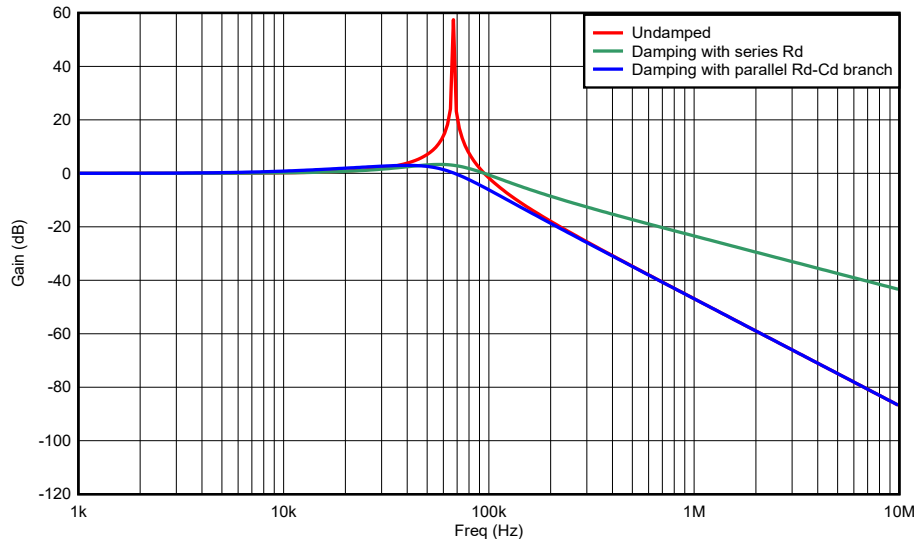


图 4-2. 采用不同阻尼技术的滤波器模型的频率图

在图 4-2 的增益频率图中可以观察到，与滤波电容器并联的额外串联阻尼电容器和电阻器有助于抑制谐振峰值，且不影响设计滤波器的衰减水平；而图 4-1 中的技术 (b) 可抑制谐振峰值，但也会影响滤波器截止频率后的衰减水平。下一部分将在输入和输出滤波器添加阻尼支路后，再次观察所有测量结果。

5 使用阻尼滤波器进行进一步分析

在使用滤波器添加并联阻尼分支 (R_d-C_d) 后，再次测量转换器的输出阻抗、波特图和负载瞬态响应。

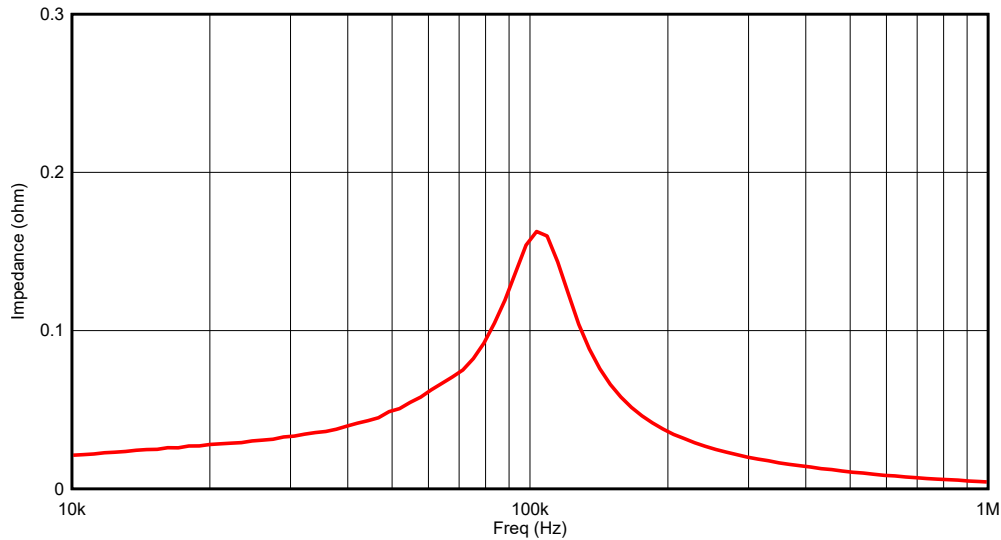


图 5-1. 具有阻尼滤波器的降压转换器的输出阻抗曲线

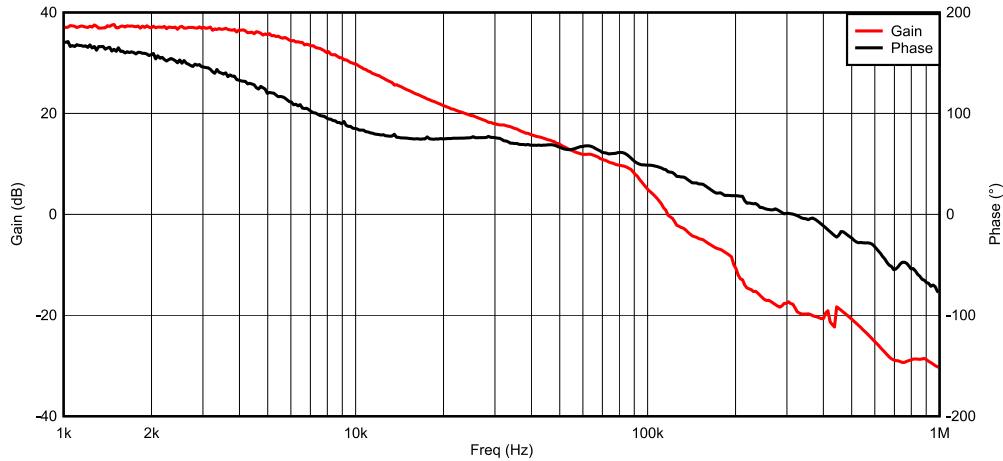


图 5-2. 具有阻尼滤波器的降压转换器的增益幅度和相位图

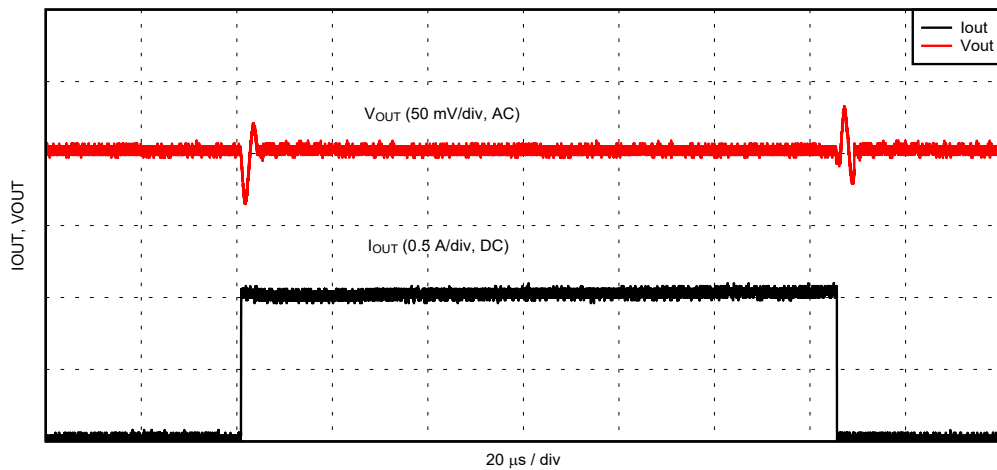


图 5-3. 具有阻尼滤波器的降压转换器模型输出电压的时域响应

在图 5-1 中可以看出，通过滤波器增加阻尼有助于减少输出阻抗曲线中的峰值，并将最大阻抗值减少到 0.15Ω 。与具有滤波器的串联 R_d 相比，这种阻尼方法还有助于减少过多的功率损耗，如图 4-1(b) 所示。在图 5-2 中，通过阻尼滤波器，相位裕度也从 26° 提高到了 45.9° 。图 5-3 显示了器件的瞬态响应，其中的振荡已适当阻尼。因此，可以观察到，向滤波器添加阻尼分支有助于抑制滤波器谐振，从而改善相位裕度。此外，与采用无阻尼滤波器的系统的瞬态响应相比，负载瞬态响应似乎也是合理的。

6 结论

此分析的结论是，将输入和输出滤波器集成到降压转换器电路中，可在滤除高频噪声的同时减少输入和输出电压纹波。当滤波器的输出阻抗影响转换器的闭环传递函数时，就会遇到难题。但是，通过精心设计，可将这些元件引起的谐振适当衰减并降低品质因数。如果负载在阻抗曲线的任何谐振频率下励磁，那么在最坏的情况下，它不应在供电网络中激发电压噪声。

7 Reference

- 德州仪器 (TI), [TPS6281x-Q1 2.75V 至 6V 可调频率降压转换器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [如何测量直流/直流转换器的配电网阻抗](#) 应用手册。

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