Application Note

如何接收低于基准电压的输出电压

Anthony Ting, Edwin Zang

摘要

在典型降压电路中，输出电压高于基准电压。目前，基准电压约为 0.6V 或 0.8V。SoC 具有需要越来越低的电源电压的趋势，有时甚至低于 0.6V。本文介绍了接收低于基准电压的输出电压的步骤。该电路采用自适应电压调节 (AVS) 来接收较低的输出电压和动态调节输出电压，从而满足 SoC 要求。本文还介绍了该 AVS 的理论分析和仿真。提供的 TPS563252 示例用于演示如何实现这种新方法。

内容

1 引言....2
2 通过 AVS 控制让输出电压低于基准电压....3
3 使用 TPS563252 的仿真结果....6
4 使用 TPS563252 的测试结果....8
5 总结....10
6 参考文献....11

插图清单

图 1-1. 不同流程的 AVS 归一化效应示例....2
图 2-1. 通过 AVS 实现可调输出电压....3
图 2-2. 通过 AVS 实现更低的输出电压....4
图 2-3. 典型 FB 电路....4
图 2-4. 采用 AVS 的 FB 电路....4
图 3-1. TPS563252 Simplis 原理图....6
图 3-2. 不同 Vtest 电压下的输出电压波形....6
图 3-3. 波特图....7
图 4-1. 0.7V 输出电压和 1V 外部测试电压下的稳态....8
图 4-2. 0.6V 输出电压和 3V 外部测试电压下的稳态....8
图 4-3. 0.5V 输出电压和 6V 外部测试电压下的稳态....8
图 4-4. 输出电压随外部测试电压的动态变化....8
图 4-5. 0.5V 输出电压下的波特图....8
图 4-6. 0.6V 输出电压下的波特图....8
图 4-7. 0.7V 输出电压下的波特图....9
图 4-8. 波特图....9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

1 引言

如今，处理器对直流/直流电源转换器的高精度电源电压和动态可调电压等要求越来越高，旨在确保系统保持高性能运行。因此，如何设计具有价格优势的出色电源来促进系统性能提升将是未来的主题。

在设计电源时，目标输出电压通常高于基准电压。对于大多数降压 IC 来说，基准电压通常为 0.6V 至 0.8V。SoC 有时需要低于 0.6V 的电压。如何使用当前 IC 接收低于基准电压的输出电压是一项挑战。

自适应电压调节 (AVS) 是一种闭环动态功率最小化技术，可调节向主芯片或器件提供的电压以满足运行期间所需的功率。从节能角度来看，在高温环境中运行时减少主芯片的自发热，需要优化电源解决方案，如图 1-1 所示。*自适应（动态）电压（频率）调节 - 动机和实施* 应用手册详细介绍了 AVS 流程。

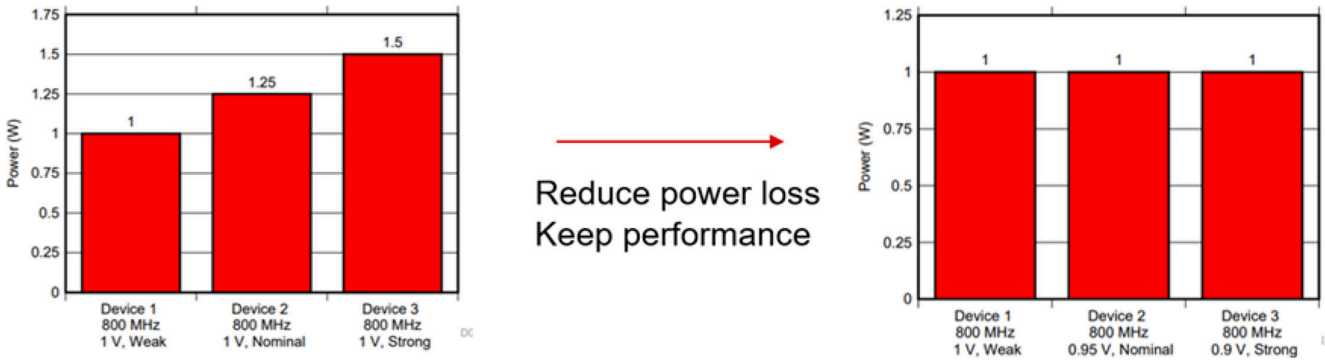

图 1-1. 不同流程的 AVS 归一化效应示例

AVS 可用于解决压降问题。主芯片要求一定的电源电压，由于 PCB 上的传导损耗，压降问题很常见。AVS 流程还用于为主芯片电源保持一定的电压电平。

本文使用 AVS 流程接收低于基准电压的输出电压。通过调节 AVS 的电压，输出电压可以低于基准电压。

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

2 通过 AVS 控制让输出电压低于基准电压

降压转换器反馈电路上的外部元件和电压源用于实现 AVS。在正常运行时，输出电压由分压电阻器 Rtop 和 Rbot 进行编程。通过 AVS，输出电压也受外部电阻器和电压源的影响。控制电路和输出电压计算如图 2-1 及方程式 1、方程式 2 和方程式 3 所示。

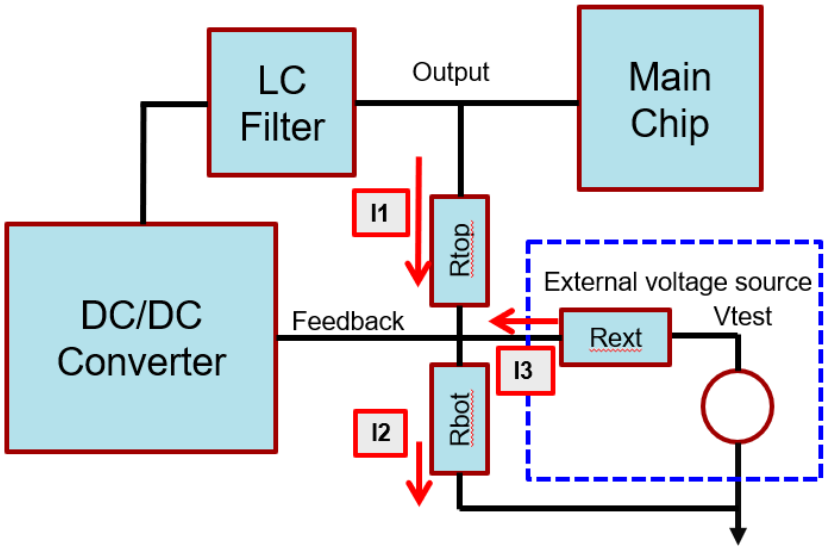

图 2-1. 通过 AVS 实现可调输出电压

$$I2 = I3 + I1 \tag{1}$$

$$\frac{VFB}{R_{bot}} = \frac{Vtest - VFB}{R_{ext}} + \frac{Vout - VFB}{R_{top}} \tag{2}$$

$$Vout = R_{top} \times \left(\frac{VFB}{R_{bot}} - \frac{Vtest - VFB}{R_{ext}}\right) + VFB \tag{3}$$

基于前面的公式，方程式 4、方程式 5 和方程式 6 展示了 Vout 和 Vtest 之间的关系。

$$Vout = R_{top} \times \frac{VFB}{R_{bot}} + VFB \ \left(if\ Vtest = VFB\right) \tag{4}$$

$$Vout = R_{top} \times \left(\frac{VFB}{R_{bot}} - \frac{Vtest - VFB}{R_{ext}}\right) + VFB \ < R_{top} \times \frac{VFB}{R_{bot}} + VFB \ \left(if\ Vtest > VFB\right) \tag{5}$$

$$Vout = R_{top} \times \left(\frac{VFB}{R_{bot}} - \frac{Vtest - VFB}{R_{ext}}\right) + VFB \ > R_{top} \times \frac{VFB}{R_{bot}} + VFB \ \left(if\ Vtest < VFB\right) \tag{6}$$

如果需要较低的输出电压，则 Vtest 电压需要大于方程式 4、方程式 5 和方程式 6 中的基准电压。如果 Vtest 持续上升，直到电流 I3 超过 I2，则电流 I1 通过 Rtop 改变方向。输出电压低于基准电压。图 2-2 展示了电流方向。

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

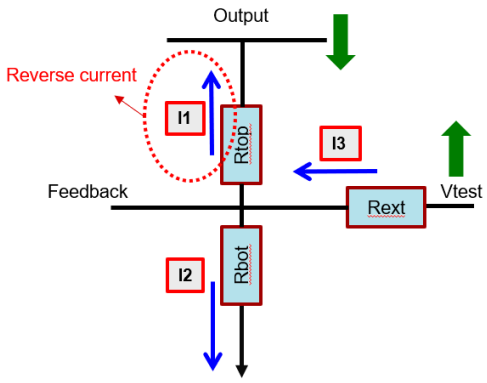

图 2-2. 通过 AVS 实现更低的输出电压

AVS 流程会改变 FB 电路，对功率级和内部环路参数没有影响。AVS 流程会将 Vfb 的功能更改为 Vout。对于较低的输出电压，通常不建议添加 CFF（前馈电容）。典型的 FB 电路如图 2-3 所示。FB 电路的功能如方程式 7 所示。

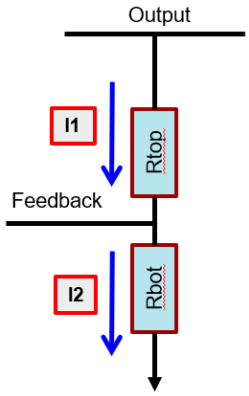

图 2-3. 典型 FB 电路

$$\frac{VFB}{Vout} = \frac{R_{bot}}{R_{bot} + R_{top}} \tag{7}$$

图 2-4 中展示了采用 AVS 流程的 FB 电路。进行交流分析时 Vtest 应为 0。方程式 8 中展示了采用 AVS 流程的 FB 电路的函数（基于方程式 2）。

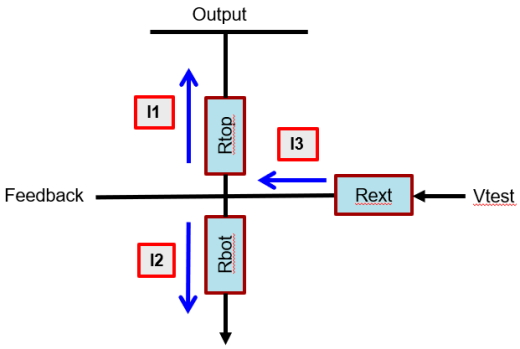

图 2-4. 采用 AVS 的 FB 电路

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

$$\frac{VFB}{Vout} = \frac{R_{top}//R_{bot}//R_{ext}}{R_{top}} \tag{8}$$

比较 FB 转换函数，根据[*基于底部检测纹波注入固定导通时间频域分析的 D-CAP2TM 频率响应模型*]，AVS 流程对直流增益有一定影响。如果使用典型 FB 电路的直流增益将 FB 电路的直流增益除以 AVS，则增益变化如方程式 9 所示。如果直流增益变化过大，则会影响带宽和相位裕度。为了使方程式 9 等于 1，根据方程式 10，AVS 电阻器 R_{ext} 设置为远大于分压电阻器。

$$\frac{\frac{VFB}{Vout}(typ)}{\frac{VFB}{Vout}(AVS)} = \frac{\frac{R_{bot}}{R_{bot}+R_{top}}}{\frac{R_{top}//R_{bot}//R_{ext}}{R_{top}}} = \frac{R_{top}//R_{bot}}{R_{top}//R_{bot}//R_{ext}} \tag{9}$$

$$\frac{\frac{VFB}{Vout}(typ)}{\frac{VFB}{Vout}(AVS)} = \frac{R_{top}//R_{bot}}{R_{top}//R_{bot}//R_{ext}} \approx \frac{R_{top}//R_{bot}}{R_{top}//R_{bot}} = 1 \tag{10}$$

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

3 使用 TPS563252 的仿真结果

采用 TPS563252 Simplis 模型的电路旨在进行直流和交流分析。TPS563252 是一款具有 1.2MHz 高频率和高精度基准电压的器件。TPS563252 的基准电压为 0.6V。如果 SoC 需要 0.5V 至 0.7V 的电源电压，则电源电压典型值为 0.6V。如果 Vtest 电压为 0，则输出电压为最大值。将底部分压电阻器设置为 10kΩ，将顶部分压电阻器设置为 2kΩ。根据前面的分析，将 AVS 电阻器设置为 47kΩ，这在不同的输出电压下对环路影响较小。根据方程式 3，AVS 的电压范围为 1.07V 至 5.77V。图 3-1 展示了 TPS563252 的 Simplis 原理图。

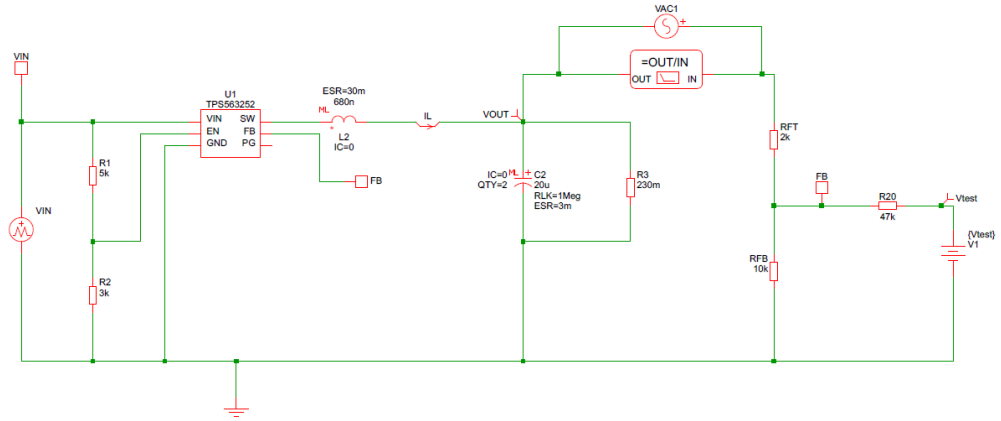

图 3-1. TPS563252 Simplis 原理图

图 3-2 展示了 Vtest 电压为 1.07V、3.1V 和 5.77V 时的输出电压。根据稳态分析，输出电压稳定平缓。通过这种方法，接收到低于基准电压的所需输出电压。

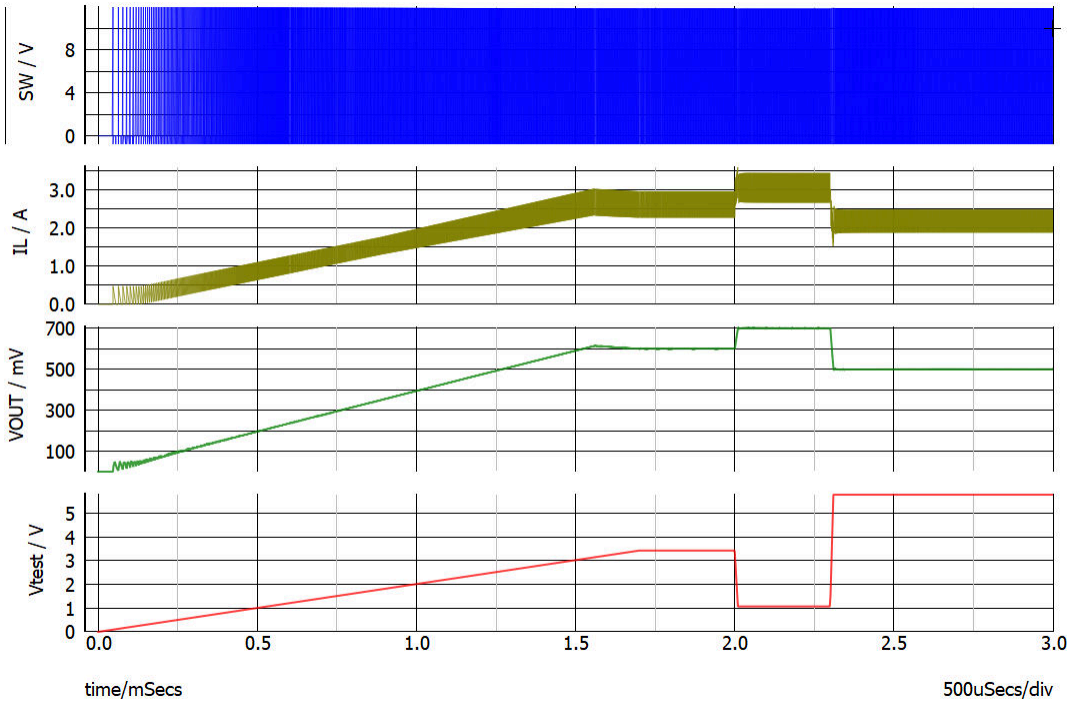

图 3-2. 不同 Vtest 电压下的输出电压波形

图 3-3 的波特图通过运行交流仿真接收。增益和相位曲线几乎相同。根据相位裕度，波特图是稳定的。

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

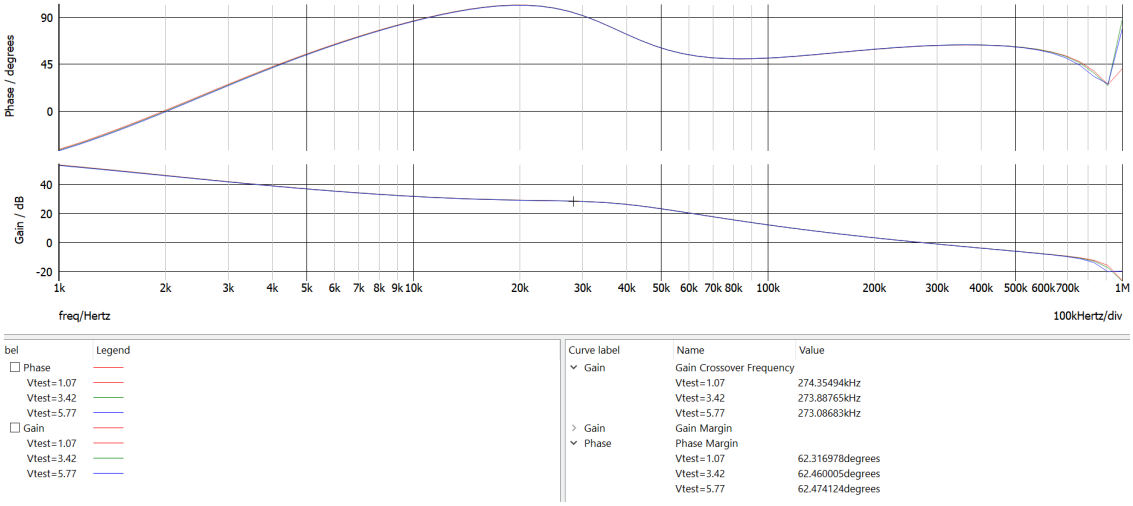

图 3-3. 波特图

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

4 使用 TPS563252 的测试结果

此 AVS 流程也在 TPS563252EVM 电路板上进行了测试。请参阅 *TPS563252 和 TPS563257 降压转换器评估模块用户指南* 中的 EVM 详细信息。更新 BOM 以匹配 Simplis 原理图。

图 4-1 至图 4-3 展示了稳态状态。从稳态波形可以看出，输出电压和开关波形是稳定的。图 图 4-4 展示了使用外部测试电压时输出电压的动态变化。通道 1 是动态变化范围为 1.07V 至 5.77V 的 Vtest 电压。输出电压随 Vtest 电压而变化。根据波形来看，输出电压随外部输出电压平稳变化。图 4-5 至 图 4-7 展示了不同输出电压下的波特图。相位裕度和增益裕度用于显示稳定性。图 4-8 将三个波特图组合在一起来检查是否存在差异。根据波形来看，外部测试电压对波特图没有影响。

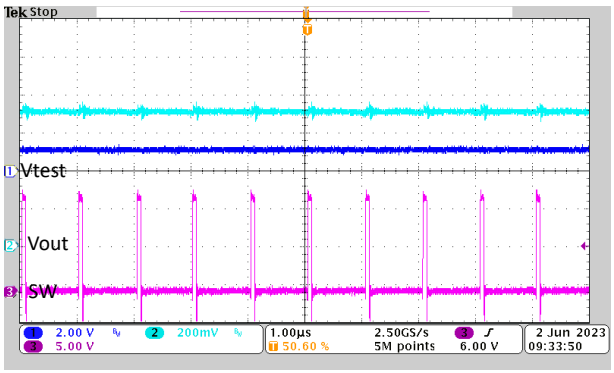

图 4-1. 0.7V 输出电压和 1V 外部测试电压下的稳态

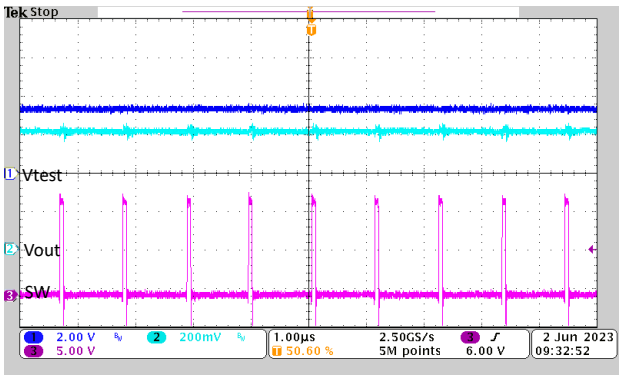

图 4-2. 0.6V 输出电压和 3V 外部测试电压下的稳态

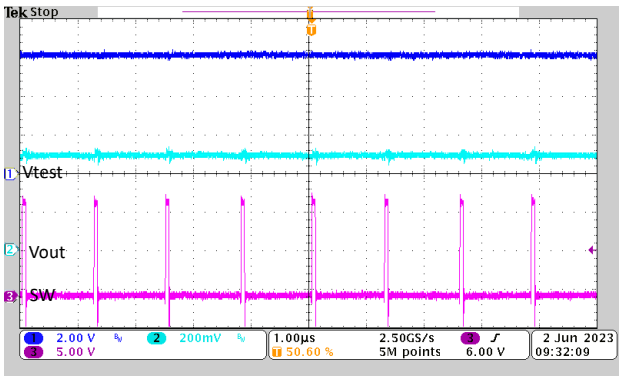

图 4-3. 0.5V 输出电压和 6V 外部测试电压下的稳态

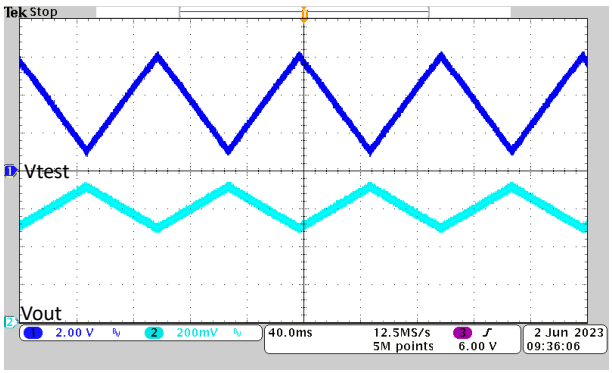

图 4-4. 输出电压随外部测试电压的动态变化

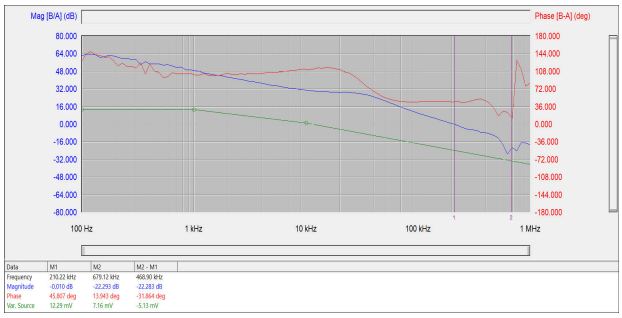

图 4-5. 0.5V 输出电压下的波特图

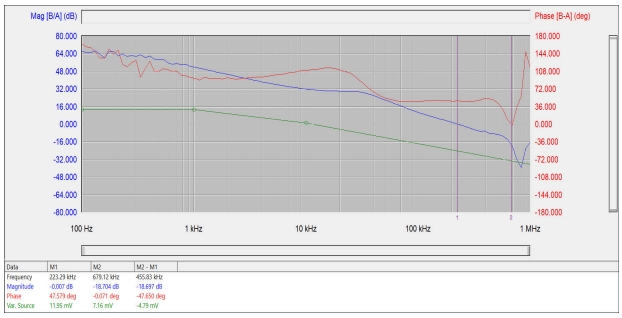

图 4-6. 0.6V 输出电压下的波特图

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

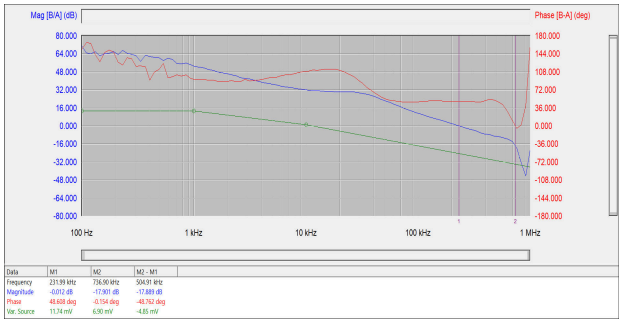

图 4-7. 0.7V 输出电压下的波特图

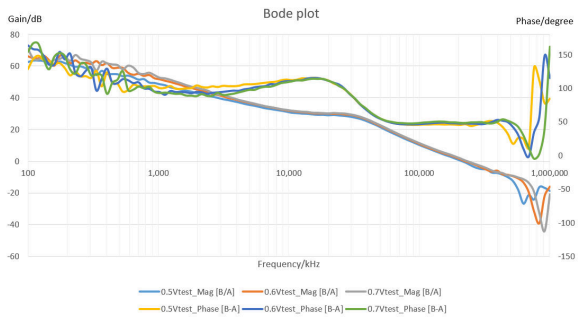

图 4-8. 波特图

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

5 总结

在常规的电源设计中，在设计非常低的输出时要经常检查 FB 有多低。这种设计会对电源工程师产生限制。本文介绍了如何通过 AVS 流程接收低于基准电压的输出电压。本文还介绍了如何设置 AVS 电阻器和外部强制电压并分析稳定性。最后，TPS563252 用于通过仿真和测试来构建具有 AVS 电路的原理图，从而实现灵活性。

English Document: SLUAAO0
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

6 参考文献

- 德州仪器 (TI)，*自适应（动态）电压（频率）调节 - 动机和实施*，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，*基于底部检测纹波注入固定导通时间频域分析的 D-CAP2TM 频率响应模型*，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，*PS563252 和 TPS563257 降压转换器评估模块用户指南*

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

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出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