

Marshall Beck

## 摘要

电压更高的电池在汽车和电动自行车应用中越来越流行。扩展的  $V_{IN}$  范围使得设计人员能够更仔细地审查前置稳压器的线路电压调节。此外，前置稳压器可能需要支持空载和满载条件，因此负载调节也非常重要。本应用手册以 **LM5013-Q1** 为例，回顾了 48V 电池和电动自行车前置稳压器的线路电压和负载调节。

## 内容

1 引言.....	2
2 COT 概述.....	2
3 线路调节.....	3
4 负载调节.....	4
5 48V <sub>IN</sub> 设计示例.....	5
6 总结.....	7
7 参考文献.....	7

## 插图清单

图 2-1. LM5013 功能方框图.....	2
图 2-2. 具有外部纹波注入的 LM5013 设计.....	3
图 3-1. 峰值斜坡幅度与 $V_{FB(AVG)}$ 间的关系.....	3
图 4-1. 轻负载、频率降低对 $V_{FB(AVG)}$ 的影响.....	4
图 4-2. 轻负载、频率降低对 $V_{OUT}$ 调节的影响.....	4
图 5-1. 48V 至 12V, LM5013-Q1 设计.....	5
图 5-2. 负载和线路调节.....	6
图 5-3. 线路瞬态 (48V 至 15V), 超出设计规格.....	6
图 5-4. 线路瞬态 (48V 至 15V), 由于斜坡注入不足, $V_{SW}$ 上双脉冲放大.....	7

## 表格清单

表 3-1. 测得的峰值斜坡幅度与 $V_{FB(AVG)}$ .....	4
---------------------------------------	---

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

降压稳压器中采用的常见控制拓扑是恒定导通时间 (COT)。这种控制拓扑已被应用于多种 48V 电池和电动自行车前置稳压器 (如 [LM5013-Q1](#))。本应用手册概述了如何使用 [LM5013-Q1](#) 针对宽  $V_{IN}$  范围的应用 (特别是 48V 电池和电动自行车应用) 优化线路电压和负载调节。

## 2 COT 概述

[图 2-1](#) 通过比较采样输出电压  $V_{FB}$  和基准电压  $V_{REF}$ ，使用其反馈比较器来伺服输出，从而产生稳定的输出电压。反馈比较器在跳闸后会发出导通时间脉冲。该周期在设定输出电压的编程开关频率下继续，由导通时间 ( $R_{RON}$ ) 和反馈 ( $R_{FBT}$ 、 $R_{FBB}$ ) 电阻决定。[方程式 1](#) 和 [方程式 2](#) 展示了必要的计算。

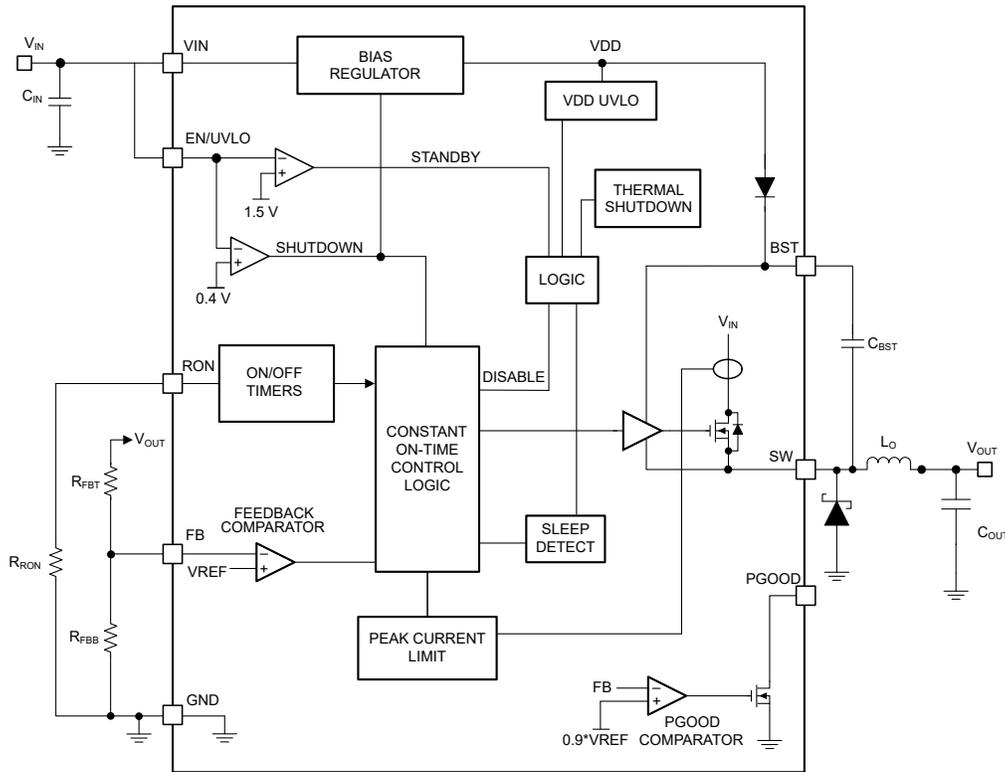


图 2-1. LM5013 功能方框图

$$R_{RON}(k\Omega) = \frac{V_{OUT}(V) \times 2500}{F_{SW}(kHz)} \quad (1)$$

$$R_{FBB} = \frac{V_{REF}}{V_{OUT} - V_{REF}} \times R_{FBT} \quad (2)$$

连接到 FB 节点的反馈比较器端子必须具有足够的纹波，以便在导通期间，FB 节点的充电电压可以足够高于基准电压 ( $V_{REF}$ )。此结果是通过示例纹波注入电路 [图 2-2](#) 实现的。

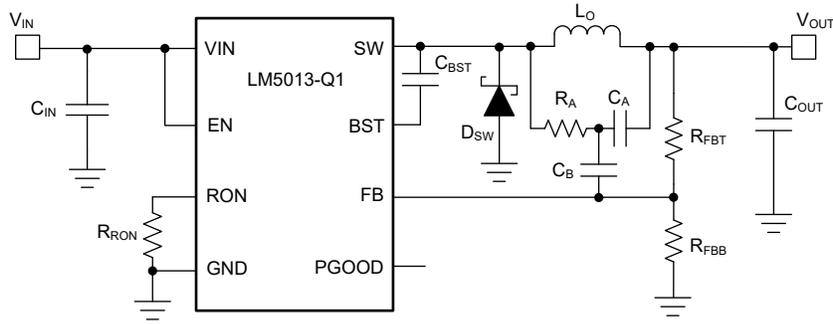


图 2-2. 具有外部纹波注入的 LM5013 设计

积分器 ( $R_A$ 、 $C_A$ ) 会生成与电感器电流同相的电压斜坡, 并与  $C_B$  交流耦合。根据方程式 3、方程式 4 和方程式 5, 将足够的斜坡幅度应用到反馈节点, 可实现稳定性并优化瞬态性能。请注意, 对于 LM5013, 建议针对器件的给定迟滞和裕度使用 12mV 的最小斜坡幅度, 从而降低对噪声的敏感性。请参阅 [LM5013-Q1 具有超低 IQ 的汽车类 100V 输入、3.5A 非同步降压直流/直流转换器](#) 数据表, 了解建议值和术语的进一步阐述。有关此设计的其他理论, 请参阅 [COT 3 类纹波电路的稳定性分析和设计](#) 应用手册。

$$C_A \geq \frac{10}{f_{SW} \times (R_{FBT} \parallel R_{FBB})} \quad (3)$$

$$V_{RAMP} = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \times t_{ON}}{R_A C_A} \quad (4)$$

$$C_B \geq \frac{t_{TR}}{3 \times R_{FBT}} \quad (5)$$

### 3 线路调节

注入的斜坡波形导致平均反馈电压超过基准电压, 因此需对输出电压进行编程。此外, 波形的峰值 (方程式 4) 与输入电压成正比, 导致随着  $V_{IN}$  的变化而进一步变化。此变化通过反馈分压器增大, 从而导致输出电压与设定点不同。图 3-1 和表 3-1 从概念性的定量维度, 展示了更高的峰值斜坡幅度如何导致平均反馈电压 ( $V_{FB(AVG)}$ ) 增加。

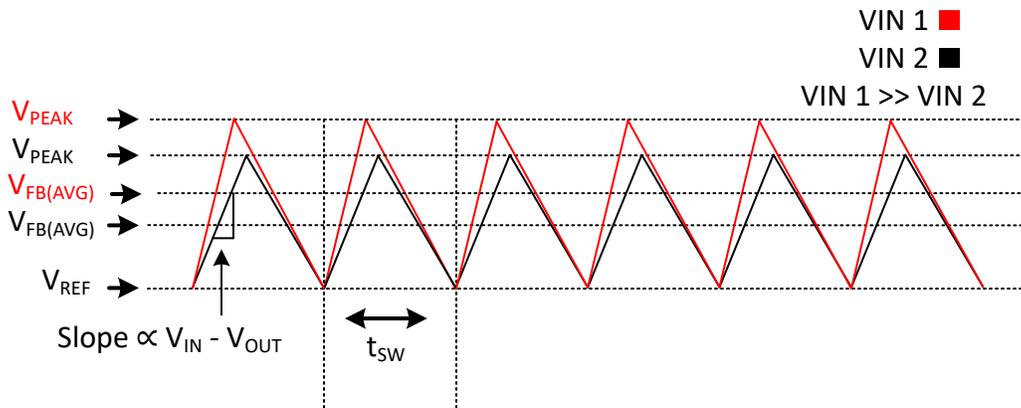


图 3-1. 峰值斜坡幅度与  $V_{FB(AVG)}$  间的关系

表 3-1. 测得的峰值斜坡幅度与  $V_{FB(AVG)}$

斜坡幅度, $V_{PEAK}$ (mV)	$V_{FB(AVG)}$ (V)
13.488	1.204
15.437	1.206
20.342	1.212
23.353	1.217
23.945	1.216

## 4 负载调节

在降压稳压器中，负载调节通常也是一个问题。通常，稳压器具有轻负载模式，以确保优化轻负载效率。不过，就 LM5013 来说，实现可能会有所不同，开关频率会随着负载的降低而降低。图 4-1 中说明了这一点。频率降低会导致平均反馈电压降低。与前面的讨论类似，这会导致输出差异。图 4-2 显示了 12V 输出如何随着开关频率的降低而降低。

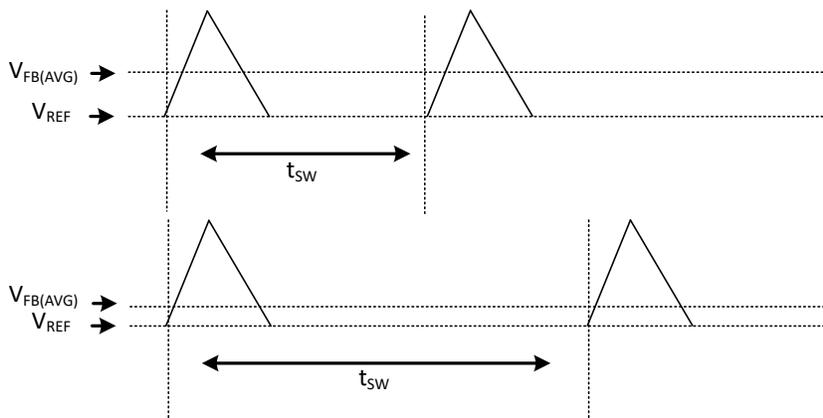


图 4-1. 轻负载、频率降低对  $V_{FB(AVG)}$  的影响

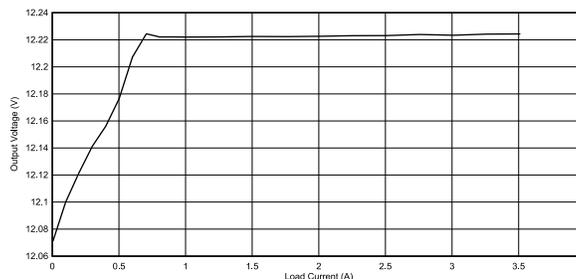


图 4-2. 轻负载、频率降低对  $V_{OUT}$  调节的影响

通过更改电感器，避免电感器电流变得不连续，可以避免这种行为。在 LM5013 中，电感器电流不连续的点通常是轻负载模式的入口点。或者，可以在输出端施加最小负载，以确保电感器电流不会变得不连续。方程式 6 展示了最小电感 ( $L_{OUT}$ )，以确保电感电流在应用的最小负载电流 ( $I_{OUT,min}$ ) 下不会出现不连续现象，(可能的)结果是效率降低。

$$L_{OUT} \geq \frac{V_{OUT}}{2 \times I_{OUT,min} \times F_{SW}} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \quad (6)$$

如果无法控制电感或应用的最小负载电流，则需要考虑采用 FPWM 的替代器件，例如 LMR38020-Q1 具有  $40\mu A$  IQ 的 4.2V 至 80V、2A 汽车类同步 SIMPLE SWITCHER® 电源转换器数据表。通过在 FPWM 模式下运行，器件的平均反馈电压不会受到负载的影响，大多数采用轻负载模式的器件的情况也是如此。

## 5 48V<sub>IN</sub> 设计示例

本应用手册最后介绍了 LM5013-Q1 的典型设计，一个 48V 至 12V 设计。LM5013-Q1 支持高达 3A 的负载电流。此设计通常需要输入能够承受 36V 至 60V 的 V<sub>IN</sub> 范围。斜坡注入电路的选择需要进行以下计算，以最大限度地减小 V<sub>OUT</sub> 变化。此外，还包括线路电压和负载调节数据、以及 V<sub>OUT</sub> 瞬态波形，以防 V<sub>IN</sub> 低于设计的最小 V<sub>IN</sub> 36V，从而导致注入纹波超出器件规格。

1. 频率选为 300kHz，并针对 12V 的输出电压计算 R<sub>RON</sub> 电阻
2. 针对 12V 输出电压和所选 R<sub>FBT</sub> = 453kΩ 计算相应的反馈电阻。
3. 可使用先前选择的元件计算斜坡电容 (C<sub>A</sub>)。
4. 斜坡电阻器 (R<sub>A</sub>) 是针对最小输入电压 (最大 t<sub>ON</sub>) 和 LM5013 建议的最小斜坡电压 12mV 计算得出的。
5. 斜坡耦合电容 (C<sub>B</sub>) 由随意选择的 50us 瞬态稳定时间决定。
6. 选择 44 μF 的输出电容以满足典型的负载瞬态要求，这通常会取代稳态/稳定性的电容要求。不一定遵循计算结果。
7. 根据 LM5013-Q1 具有超低 IQ 的汽车类 100V 输入、3.5A 非同步降压直流/直流转换器 数据表中的最小建议值选择了 C<sub>IN</sub> 和 C<sub>BST</sub>。选择 D<sub>SW</sub> 作为肖特基二极管，直流额定值为 100V，电流额定值为 3A

$$R_{RON}(k\Omega) = \frac{V_{OUT}(V) \times 2500}{F_{SW}(kHz)} = \frac{12 \times 2500}{300} = 100 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

$$R_{FBB} = \frac{V_{REF}}{V_{OUT} - V_{REF}} \times R_{FBT} = \frac{1.2}{12 - 1.2} \times 453 \text{ k}\Omega = 50.33 \text{ k}\Omega; R_{FBB} = 49.9 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

$$C_A \geq \frac{10}{F_{SW} \times (R_{FBT} | R_{FBB})} = \frac{10}{300 \text{ kHz} \times (44.95 \text{ k}\Omega)} = 741 \text{ pF}; C_A = 3.3 \text{ nF} \quad (9)$$

$$R_A = \frac{(V_{IN, MIN} - V_{OUT}) \times t_{ON, MAX}}{V_{RAMP, MIN} \times C_A} = \frac{(36 - 12) \times \frac{100 \text{ k}\Omega}{36 \times 2.5} \times 10^{-6}}{12 \text{ mV} \times 3.3 \text{ nF}} = 673 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

$$C_B \geq \frac{t_{TR}}{3 \times R_{FBT}} = \frac{50 \text{ us}}{3 \times 453 \text{ k}\Omega} = 36 \text{ pF}; C_B = 56 \text{ pF} \quad (11)$$

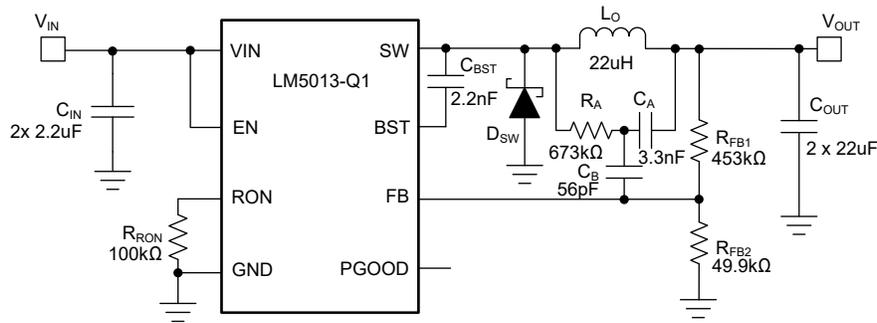


图 5-1. 48V 至 12V , LM5013-Q1 设计

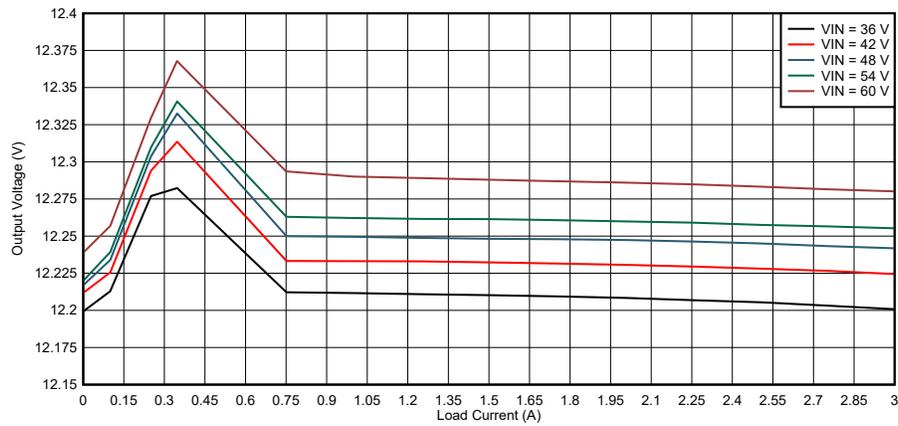


图 5-2. 负载和线路调节

上述负载和线路电压调节数据是在  $V_{IN} = 36V$ 、 $42V$ 、 $48V$ 、 $54V$  和  $60V$  时获得的。负载电流范围为  $0A$  至  $3A$ 。

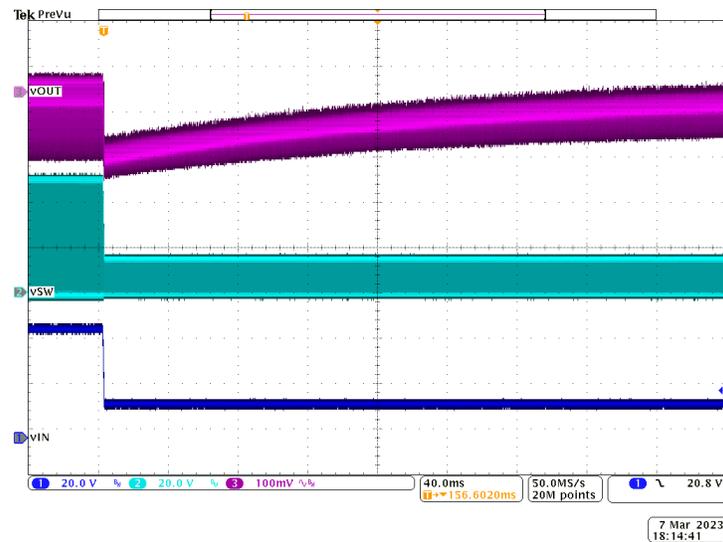


图 5-3. 线路瞬态 (48V 至 15V)，超出设计规格

施加了低于设计  $V_{IN}$  范围的线路瞬态并记录了  $V_{OUT}$  瞬态。转换器在瞬态之后调节，净效应降低，峰峰值纹波和直流输出电压下降。由于电感器电流纹波减小，平均反馈电压减小，纹波和直流输出电压相应地降低。

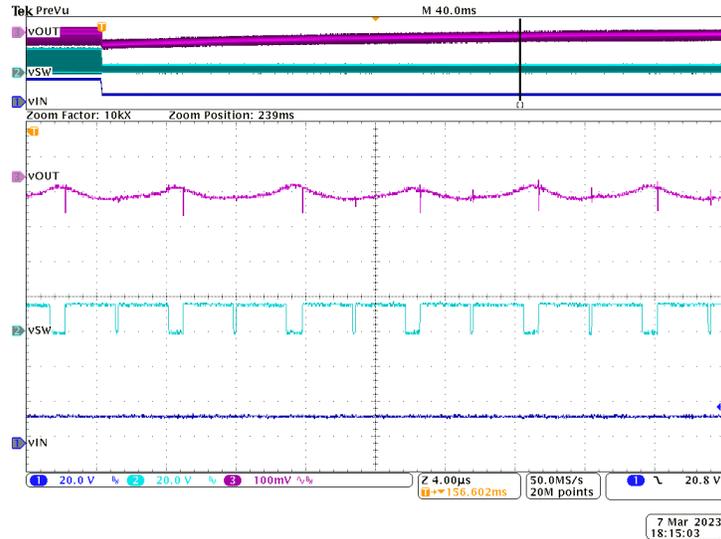


图 5-4. 线路瞬态 (48V 至 15V)，由于斜坡注入不足， $V_{SW}$  上双脉冲放大

放大  $V_{SW}$  和  $V_{OUT}$  以突出斜坡注入不足的影响。注入的斜坡电压降至 12mV 以下会导致 COT 架构中使用的 PWM 比较器发生误触发。可以看出，由于  $V_{SW}$  上的双脉冲（先小后大），开关行为变得不太呈周期性。

## 6 总结

48V<sub>IN</sub> 应用更大的  $V_{IN}$  和负载电流范围使上述设计更加注重前置稳压器的线路电压和负载调节。LM5013-Q1 是一款常用的 48V<sub>IN</sub> 前置稳压器，采用 COT 拓扑，本质上由反馈电压变化控制。通过执行本文中概述的步骤来最大限度地减小输出变化，增大线路电压和负载范围不会造成担忧。本文中介绍的概念需要在您的未来设计中，以确保遵循优秀实践并实现出色的性能。

## 7 参考文献

- 德州仪器 (TI)，[COT 3 类纹波电路的稳定性分析和设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[选择适用于 COT 降压转换器的理想纹波生成网络](#)，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