

## Application Note

## 使用 TPS23521 实现输出电压钳位以满足 NEBS 合规性



Ella Kim, Prayag Sahoo, Avishek Pal, Rakesh Panguloori

## 摘要

电信系统以 -48V 电压轨在恶劣的环境条件下运行。持续连接需求对这些系统提出了极具挑战性的要求，以免在 ATIS-0600315.2018 电信标准所定义的瞬态事件期间发生系统复位。特别是前端的热插拔保护电路需要可靠地处理瞬态事件。随着系统功率等级的提高，传统的热插拔电路变得复杂而庞大，因此会增加系统成本。本应用手册介绍一种采用业界先进特色负热插拔控制器 TPS23521 的输出电压钳位设计。

## 内容

1 引言.....	2
2 现有设计和挑战.....	3
3 负热插拔控制器 - TPS2352x.....	5
4 采用 TPS2352x 实现输出电压钳位.....	6
5 设计过程和实现.....	7
5.1 配置 TPS2352x 的电流限制切换阈值.....	7
5.2 反馈和控制环路响应.....	7
5.3 为反馈放大器供电.....	7
5.4 噪声抗扰度.....	8
6 测试结果.....	9
6.1 启动.....	9
6.2 NEBS 瞬态响应.....	9
7 总结.....	11
8 参考资料.....	11

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

网络设备的输入电源系统包含一个  $-48V$  的负直流总线系统，该系统用于在光照和潮湿等恶劣环境中提供保护，从而延长使用寿命。正常工作电压范围通常介于  $-38V$  和  $-58V$  之间，但在瞬态情况或系统故障期间，电压可能会超出正常工作范围。为了解决此问题，热插拔控制器通常具有过压和欠压保护功能，如果输入电源超出设定的范围，则会关闭热插拔单元，从而阻断通向下游电路的电源路径。远程无线电单元 (RRU) 的系统方框图如图 1-1 所示。

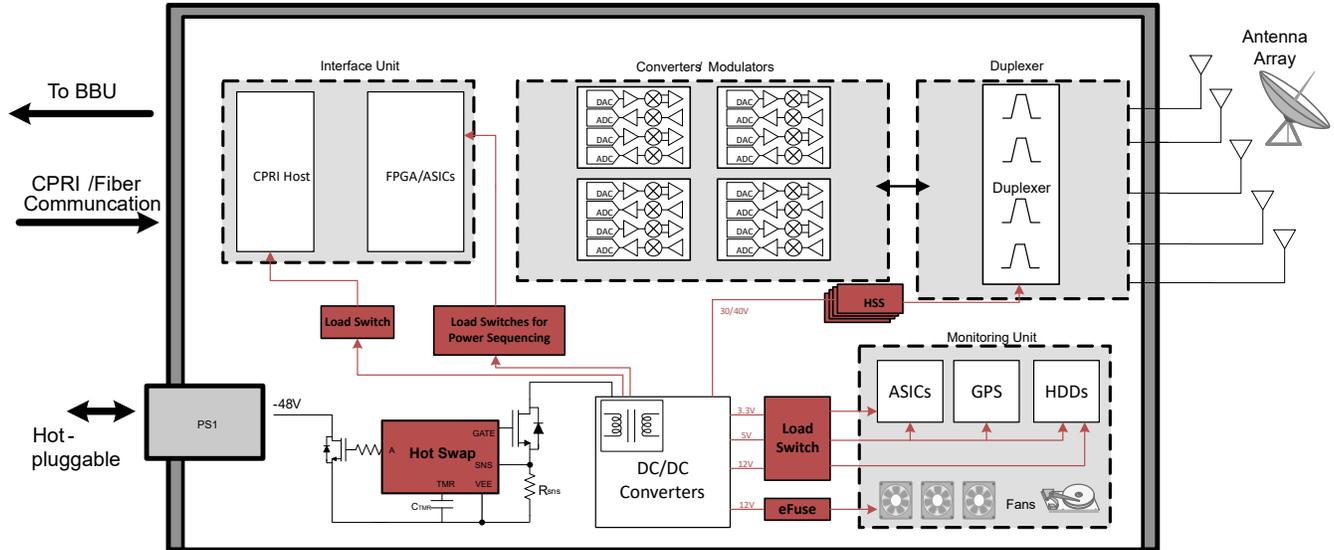


图 1-1. 远程无线电单元系统方框图

此外，输入电压范围因运营商的要求而异，特别是针对北美市场的产品，必须符合 NEBS (网络设备构建系统) 规范中的过压瞬态附加标准。过压标准表示超出输入电源设备正常工作范围的过度条件和噪声特性，其中最坏的情况是施加  $75V (+20\%/0\%)$  输入电压电平持续  $10ms (+20\%/0\%)$ ，如图 1-2 中的曲线所示。同时，还要求网络设备保持正常运行而不断电。如果热插拔保持在开启状态，则系统的高输入电压决定了图 1-1 下游直流/直流转换器的额定电压，这会增加系统成本。因此，建议限制输出过压，从而使用低压下游元件实现紧凑的成本优化型设计。

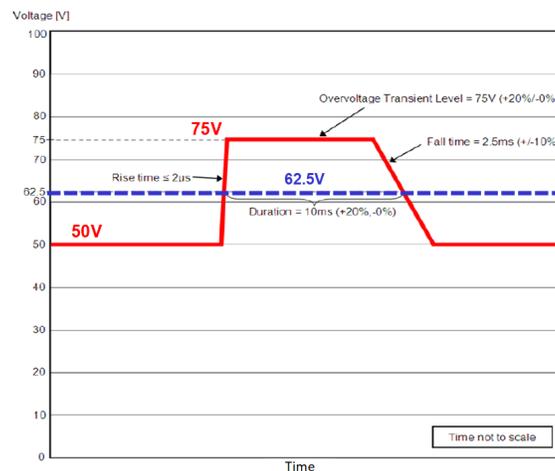


图 1-2. 符合 NEBS、ATIS-0600315.2018 标准的瞬态输入电压曲线

## 2 现有设计和挑战

远程无线电单元 (RRU) 的典型设计要求如表 2-1 所示。图 2-1 中的传统热插拔设计可通过强大的保护方案满足此类要求：

- 浪涌电流管理
- 欠压和过压保护
- 反向电流阻断
- 反极性保护
- 线路瞬态期间快速恢复
- 过流和短路保护

然而，有一个来自电压瞬态事件的挑战，在此事件期间，输入电压上升至 75V (+20%/-0%) 并持续 10ms (+20%/-0%)，要求系统保持正常运行而不会因过压而受到任何损坏。

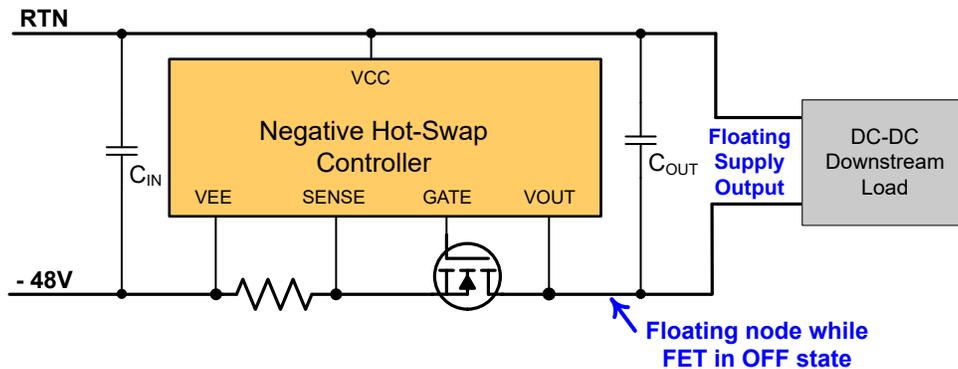


图 2-1. 传统负热插拔保护电路

表 2-1. 典型系统规格

设计参数	值
输入电压范围	-36V 至 -60V
标称电压	-50V
最大负载功率	700W
最大负载电流	700W / 36V = 20A
目标电流限制 ( 12 x 最大负载电流 )	24A
电压瞬态事件	75V 持续 10ms 过压，符合 NEBS/ATIS-0600315.218 要求
最大输出电压	62.5V ± 5%
要通过的 IEC61000-4-5 等级认证	±2kV 线路间电压，2Ω 串联阻抗
MOSFET R <sub>θJA</sub> ( 取决于布局 )	20°C/W
最高环境温度	85°C

现有的热插拔设计在输入侧使用过压保护 (OVP) 功能。图 2-2 展示了在输入侧使用 OVP 功能的现有热插拔设计中发生过压事件时的概念波形。一旦电压上升到超过 62.5V±5%，电压将关断热插拔 FET Q1，且保持电容器 (C<sub>OUT</sub>) 会为负载持续供电 10ms。对于 700W 负载，需要使用 4.7mF 的大型保持电容器来防止下游系统发生欠压锁定 (UVLO)，计算公式如方程式 1 所示。此外，热插拔 FET Q1 可以在过压事件恢复期间承受巨大的功率应力。输入节点和输出节点之间的巨大电压差会导致高浪涌电流达到电流限值。由于这些限制，传统的热插拔设计对于大功率电信系统来说并不可行，特别是对于通常需要大于 500W 的远程无线电单元 (RRU) 和有源天线系统 (AAS) 来说。

$$C_{out} > \frac{2 \times P_{load} \times T_{hold}}{v_{nom}^2 - v_{min}^2} = \frac{2 \times (700W) \times (10ms)}{(65V)^2 - (36V)^2} \approx 4.7 \text{ mF} \quad (1)$$

方程式 2 中定义了从 OVP 事件恢复期间 FET Q1 上的功率应力。

$$P_{FET}(W) = \frac{1}{2}(V_{final} - V_{initial})I_{LIMIT} = 0.5 \times (62.5 - 36) \times 24 = 350 \quad (2)$$

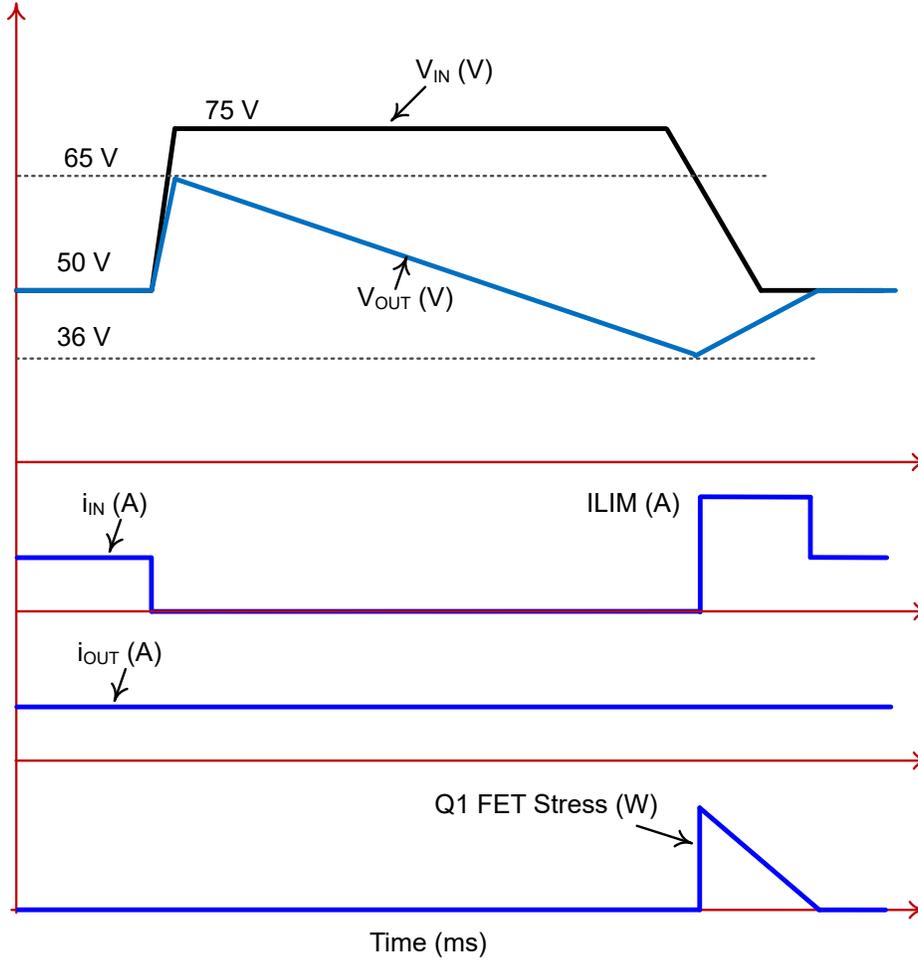


图 2-2. 75V/10ms 过压事件期间的概念波形

### 3 负热插拔控制器 - TPS2352x

TPS2352x 是一款先进的特色集成式热插拔和 OR-ing 控制器，用于处理具有严格瞬态要求的负输入电压系统。在带电背板中插拔系统期间，TPS2352x 可对电源连接进行智能控制。TPS2352x 提供浪涌电流控制以限制系统电压下降和瞬变，并支持可编程电流限制、输入插入和故障检测计时器以及输入过压/欠压锁定电平和迟滞。TPS2352x 系列还实现了以下所述的其他功能，旨在应对常见的热插拔设计挑战。

- **双电流限制：**

该器件有两个电流限制级别，具体取决于串联导通 FET 的漏源电压 (VDS)。电流限制级别可通过选择一个检测电阻器进行编程，而用于电流限制切换的 VDS 阈值也可由一个外部电阻器进行编程。

不可避免的是，热插拔设计在 FET 选择方面面临挑战，因为在高 VDS 条件下，导通 FET 在启动期间可能会超出安全工作区 (SOA) 范围。此设计所需的 FET 比正常运行条件下所需的 FET 更大。两个不同的电流限制级别可以通过在高 VDS 范围内利用导通 FET 的 SOA 区域来解决这一难题。在启动期间从引脚检测到高 VDS 的情况下，TPS2352x 会应用较低的电流限制级别，从而有效地限制导通 FET 上的功率。一旦输出电压电平稳定并且 VDS 变低，TPS2352x 便会设置较高的电流限制级别，从而在正常运行期间提供所需的功率，但仍然能在 SOA 区域内保护导通 FET。

- **软启动断开：**

该器件在软启动电容器和 FET 栅极引脚之间实现了一个断开开关，旨在确保在遇到瞬态或短路时能够灵活运行。

在热插拔中使用软启动电容器是为了限制进入输出电容器的浪涌电流。电容器与导通 FET 的栅极相连以用于限制栅极电压的压摆率。不过，电容器可能会在瞬态期间干扰正常运行，从而破坏栅极电压的快速充电和放电。

- **辅助栅极驱动器：**

该器件具有第二个热插拔栅极驱动器，在设计多个导通 FET 时，可以节省物料清单 (BOM) 成本并减小尺寸。该器件仅在正常运行条件下驱动 FET，此时主 FET 得到增强，从而降低了辅助 FET 的 SOA 要求。

- **OR-ing：**

该器件采用集成式 OR-ing，以模拟理想二极管的方式控制外部 MOSFET。TPS2352x 通过控制 OR-ing FET 的栅源 (VGS) 电压将该 FET 上的正向压降调节至 25mV。该器件可以在发生系统混乱时阻断反向电流，并具有 BOM 成本和尺寸方面的优势，因为此设计可以节省外部 OR-ing 控制器件。

如需了解更多详细信息和具体设计示例，请参阅 [使用 TPS2352x 热插拔控制器保护无线电、基带和有源天线系统](#)。

## 4 采用 TPS2352x 实现输出电压钳位

传统的热插拔设计有一个局限性：当需要在过压条件下为输出供电时，热插拔 FET 会承受过大的 SOA 应力。

建议的设计使用 TPS2352x 解决了 SOA 问题。如图 4-1 所示，电压钳位设计在传统热插拔设计的基础上增加了一个采用运算放大器的反馈环路，并使用了过压锁定 (OVLO) 功能。OVLO 通常由输入电压节点设置，但在建议的设计中，OVLO 信号从悬空的电源输出节点进行反馈。OVLO 信号跳闸后，热插拔控制器可以立即将导通 FET 关断，并将目标输出电压限制为 62.5V。在悬空的电源输出为下游系统供电的情况下， $C_{OUT}$  会放电，OVLO 信号也会降至阈值以下，从而再次导通 FET。这一重复过程会钳制输出电压，如图 4-2 所示。与传统热插拔设计相比，这种设计可以将  $C_{OUT}$  降低 80% 并将 SOA 应力降低 55%，从而带来系统优势。

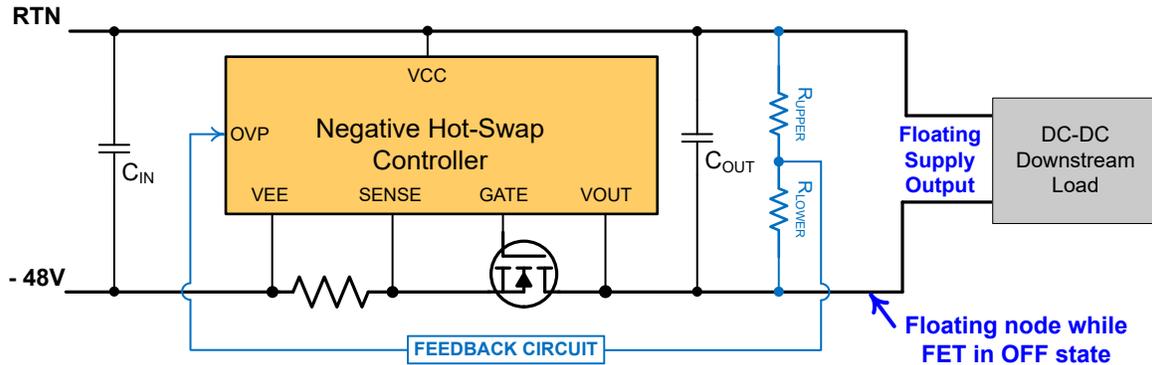


图 4-1. 在悬空电源输出端具有钳位方案的热插拔电路

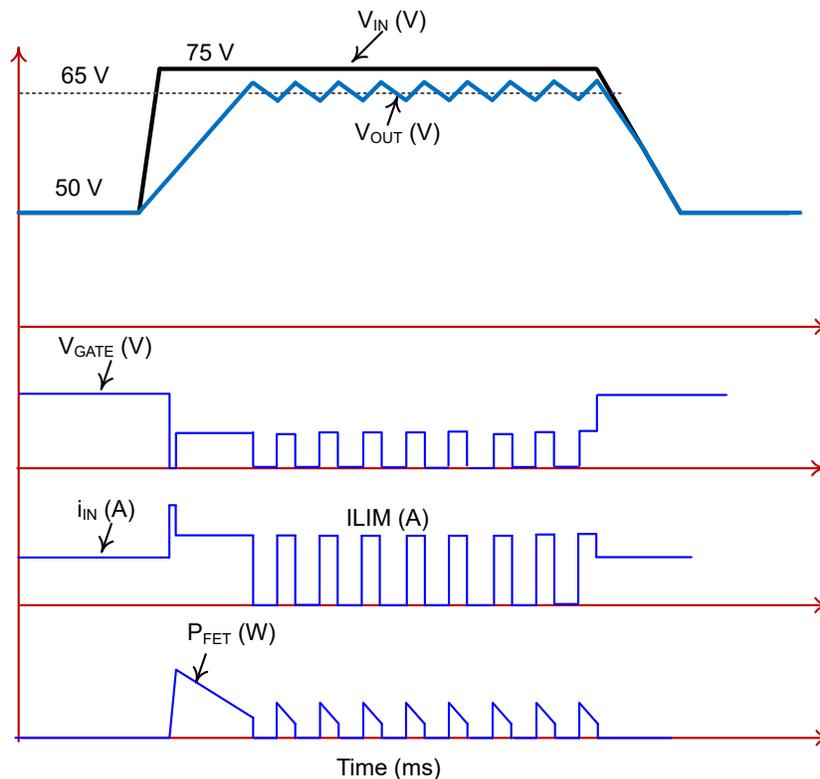


图 4-2. 建议设计中的 75V/10ms 过压事件期间的概念波形

## 5 设计过程和实现

建议的输出电压钳位技术使用负热插拔控制器 TPS2352x 和运算放大器进行输出电压反馈控制。正确选择 TPS2352x 配置和相关元件对于实现所需结果至关重要。

### 5.1 配置 TPS2352x 的电流限制切换阈值

TPS2352x 具有两个电流限制阈值，如图 5-1 所示。这种双级保护方案可确保器件在低 V<sub>DS</sub> 条件下具有较高的电流限值，因此更有可能安然度过电压阶跃和其他瞬态，同时在高 V<sub>DS</sub> 条件下设置较低的电流限制阈值，因此在发生短路和热短路事件期间为 MOSFET 提供保护。转换阈值由热插拔 FET 漏极与 TPS23521 D 引脚之间连接的电阻器 R<sub>D</sub> 进行编程。

TPS23521 的栅极拉电流能力因运行区域而异。例如，在高电流限制模式 (V<sub>DS</sub> < V<sub>DS,SW</sub>) 下，栅极拉电流为 400μA，而在高 V<sub>DS</sub> 区域为 20μA。这种高栅极电流有助于快速导通/关断外部 FET，从而在过压条件下以迟滞模式可靠地运行。考虑到 NEBS 标准 (图 1-2) 的 75V 输入瞬态峰值以及下游负载电压不超过 62.5V 的要求，我们已将 V<sub>DS,SW</sub> 设置为大于 12.5V (例如 75V - 62.5V)。因此，可根据方程式 3 选择电阻器 R<sub>D</sub>。

$$V_{DS,SW} = \frac{1.5V \times (30k\Omega + R_D)}{30k\Omega} \quad (3)$$

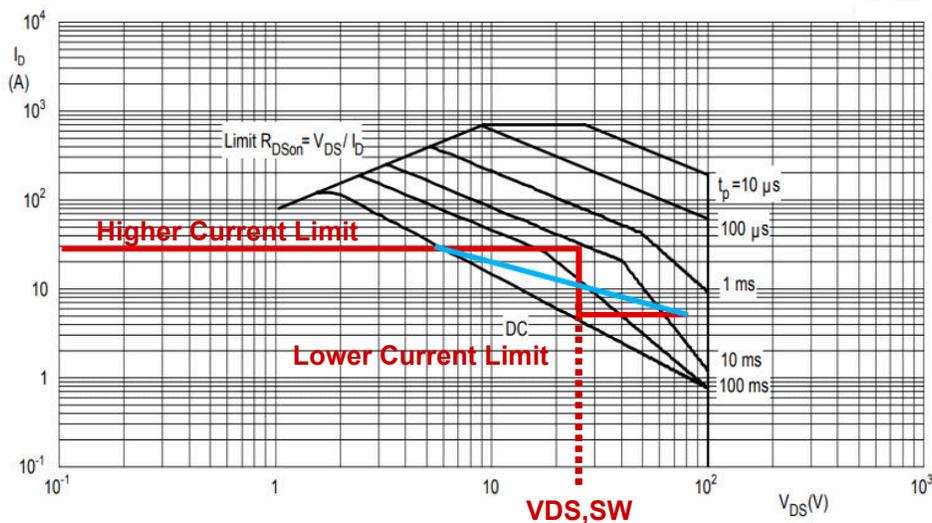


图 5-1. TPS2352x 中的双电流限制

### 5.2 反馈和控制环路响应

当瞬态事件发生时，系统的反馈环路会决定何时切断电路，而当瞬态事件过去后，又会决定何时开启系统。为了有效地执行此任务，反馈环路需要对瞬态事件做出快速响应。如果响应有延迟，系统可能会变得不稳定并导致输出电压关断。

在该系统中，环路响应取决于运算放大器响应时间、热插拔的 OVP 响应以及 FET 开/关响应时间。

FET 开/关响应时间取决于 TPS23521 的栅极驱动器，后者具有 400μA 的强大拉电流和 1A 的强大灌电流，从而可实现快速开/关响应。TPS23521 的 OV 响应时间为 4μs，也非常短。因此，运算放大器的响应非常关键。需要选择响应时间低于 1μs 的运算放大器。此应用中选择了 OPA863，其压摆率为 105V/μs。

### 5.3 为反馈放大器供电

当 MOSFET 关断时，运算放大器的负输入会悬空，这将导致运算放大器由于共模电压而饱和，如图 5-2 所示。TPS7A4001 等独立高压线性稳压器是在 12V 电压下为运算放大器供电的良好选择。

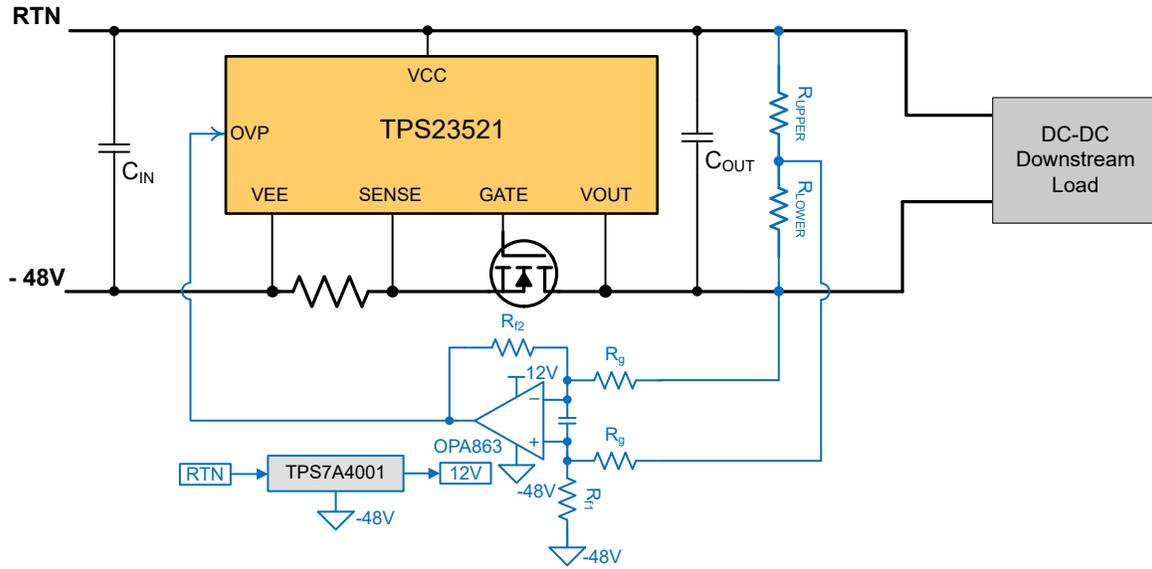


图 5-2. 使用 OPA863 运算放大器和 TPS7A4001 稳压器的实现方案

#### 5.4 噪声抗扰度

由于电信系统恶劣的工作条件和环境噪声，建议在运算放大器 OPA863 的输入引脚之间添加一个小型滤波电容器（约 1nF）。

## 6 测试结果

根据前面的设计指南，测试设置中采用了 TPS23521、OPA863 和 TPS7A4001 EVM，并使用以下元件值配置图 5-2 中的电路。

$R_1 = 54k\Omega$ 、 $R_2 = 2k\Omega$ 、 $R_f = 100k\Omega$ 、 $R_g = 237k\Omega$  且  $C_{OUT} = 500\mu F$ 。

### 6.1 启动

图 6-1 展示了空载条件下成功启动系统的情况。系统输入端施加 48V 电压。FET 栅极的电压在 32ms 的插入延迟后开始上升。所选 FET 的  $V_{GS-th}$  为 2.6V，之后我们可以看到  $V_{DS}$  开始下降， $V_{OUT}$  开始上升并跟随输入。

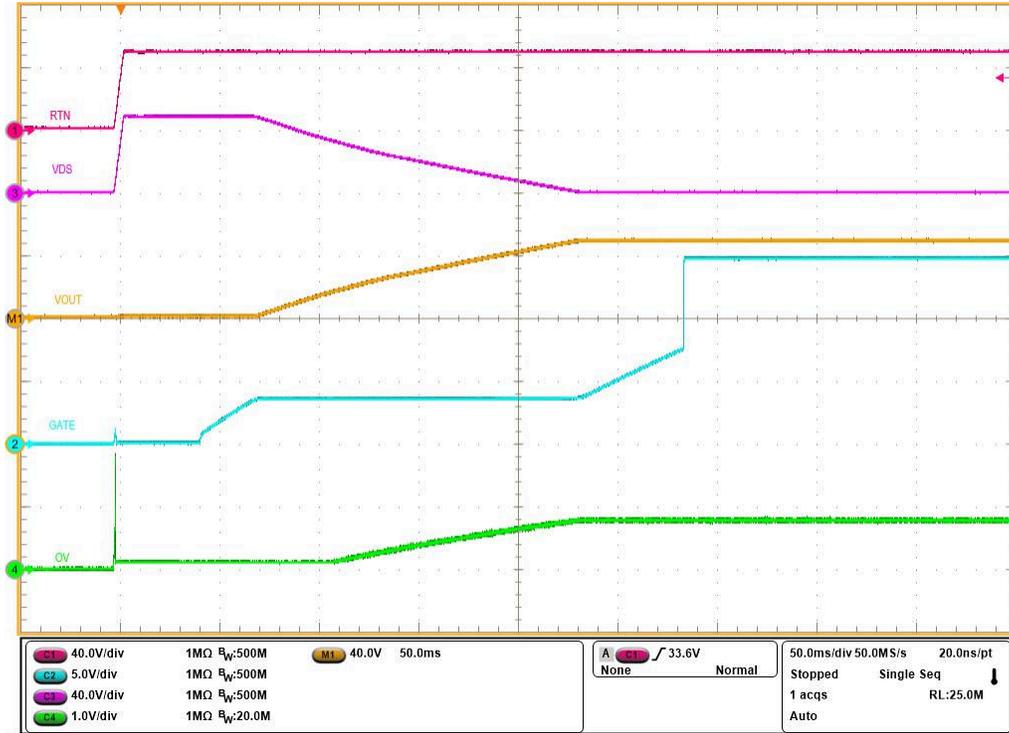


图 6-1. 建议设计中的启动波形

### 6.2 NEBS 瞬态响应

如图 1-2 所示，NEBS 标准要求向系统传递 75V 的瞬态电压且持续 10ms 时间，在此期间输出电压必须钳位在 62.5V。在图 6-2 中，RTN 电压为 48V，然后在 10A 负载条件下在输入端施加 75V 的瞬态电压并持续 10ms。

只要施加瞬态电压，该器件就会进入过流保护模式，关断 FET，然后立即以电流限制模式重新将其导通。在此期间，输出电压 ( $V_{OUT}$ ) 缓慢斜升至 RTN。一旦  $V_{OUT}$  达到 62.5V，运算放大器反馈电路的输出达到 1V 的过压保护阈值，TPS23521 将关断 FET。然后， $C_{OUT}$  放电，一旦  $V_{OUT}$  低于 62.5V，TPS23521 就会退出 OVP 模式并再次导通 FET。此循环会继续，以迟滞模式运行 FET，将输出电压钳位在 62.5V 左右。图 6-2 和图 6-3 所示为建议设计的过压响应。由于 TPS23521 器件和反馈电路具有快速响应能力，因此输出电压上的纹波低于 10%。

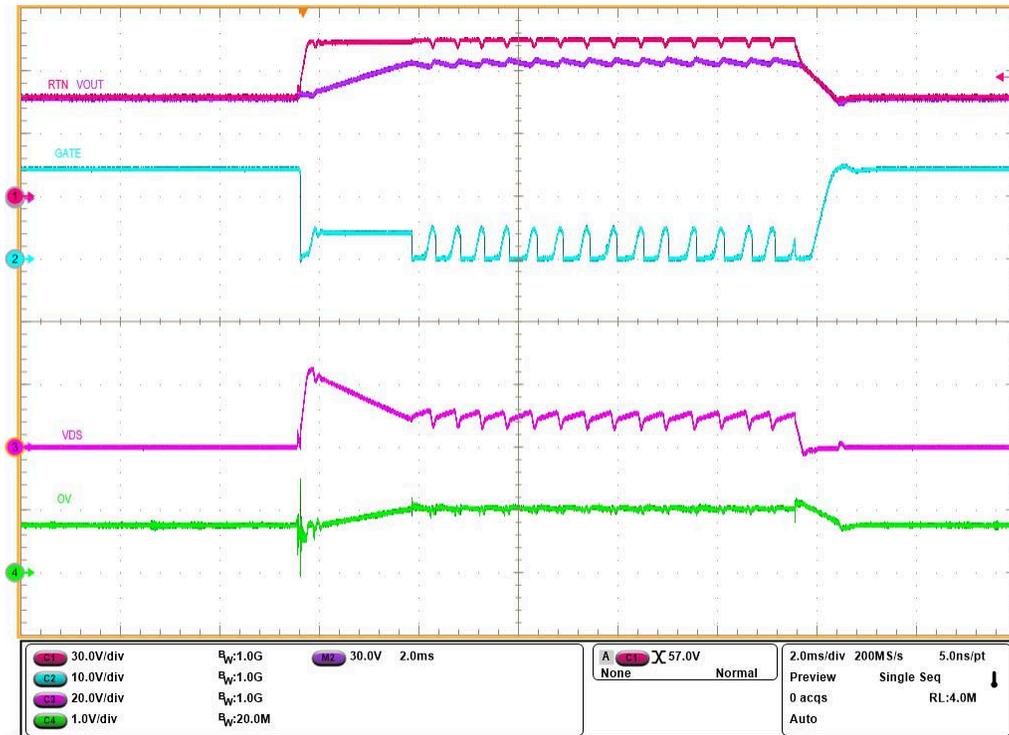


图 6-2. 75V/10ms 过压事件期间的测试波形

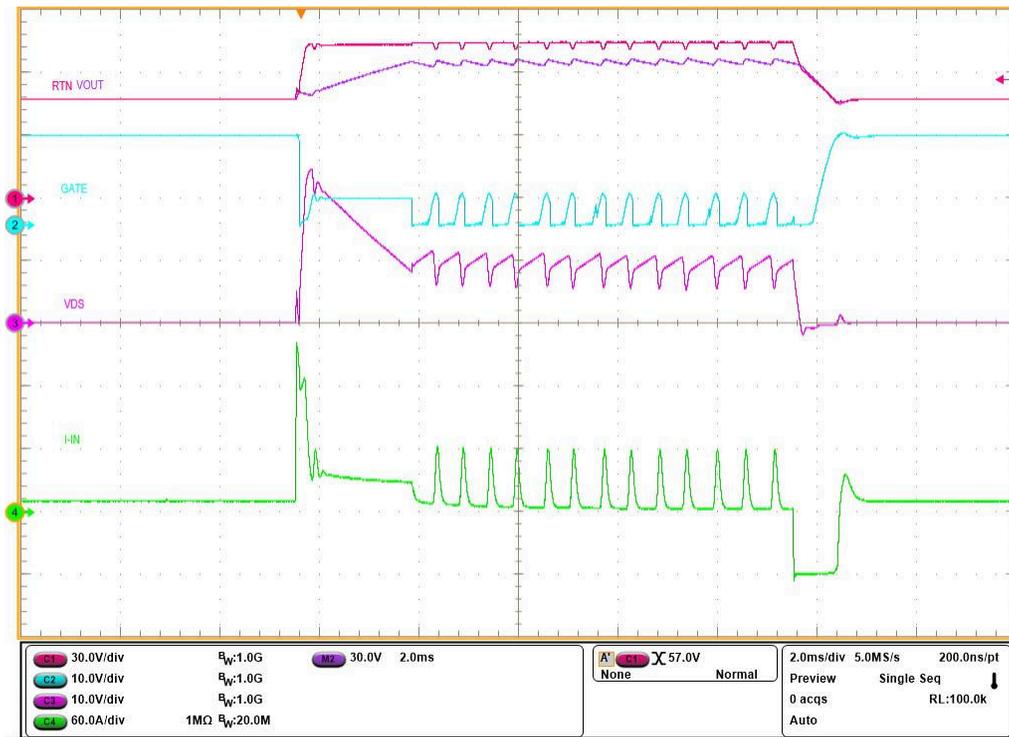


图 6-3. 75V/10ms 过压事件期间的输入电流测试波形

## 7 总结

建议的输出电压钳位方案有助于减少系统保持电容器和 FET SOA 应力，从而实现具有成本效益且尺寸更小的稳健设计。此设计具有高度可扩展性，能够可靠地应对高功率基带单元 (BBU) 和有源天线终端设备中的系统瞬变。

## 8 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TPS23521 : -48V 高性能热插拔控制器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [TPS7A4001 100V 输入电压、50mA 超高电压线性稳压器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [OPAx863A 105MHz 轨到轨输入/输出高精度放大器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [使用 TPS2352x 热插拔控制器保护无线电、基带和有源天线系统](#) 应用手册。
- 电信行业标准, [ATIS-0600315.2018](#)

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司