

Application Note

TPS53689T/C9T 的启动行为分析：突波抑制与积分时间常数的关联



Mark Chen, Vasav Gautam, Ramakrishnan Venkatraman

摘要

在启动过程中，当恒定导通时间 (COT) 控制器工作时，其输出电压会出现短暂的振荡。在为现代处理器供电的多相稳压器 (VR) 系统中，此类电压波动可能导致下游器件过载、触发错误故障状态或影响系统稳定性。为了缓解这种现象，采用了突波抑制技术。本应用手册分析了电源管理 IC 中电压波动现象的根本原因，并介绍了 TPS53689T/C9T 多相控制器中实现的实用突波抑制技术。文中提供了测量结果，以验证这些技术在典型工作条件下的有效性。

内容

1 简介.....	2
2 多相 VR 系统中突波的定义.....	2
3 系统说明和观察到的错误.....	3
4 仿真分析和事件序列.....	5
5 欠压故障触发识别.....	6
6 测量验证.....	6
7 总结.....	7
8 参考资料.....	7
9 修订历史记录.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在高电流多相稳压器 (VR) 应用中，稳定且可预测的启动行为对于系统的可靠运行至关重要。现代数字控制器通常包含先进的启动功能（例如突波抑制），以减轻上电时的输出电压振铃现象。

在客户平台上对 TPS53689T 多相控制器进行系统评估时，发现启用突波抑制功能后出现了异常启动情况。具体而言，输出电压无法成功上升，且控制器报告了欠压 (UV) 故障。通过增加积分低时间常数，该问题得以解决。

本应用白皮书分析了这种行为的根本原因，并演示了如何通过控制环路参数调优（特别是 Final_INT_LOW_TC 设置）在保留突波抑制功能的同时提高启动鲁棒性。

2 多相 VR 系统中突波的定义

控制器监测软启动期间实际输出电压 (V_{OUT}) 与设定点 (VDAC) 之间的差值。如果差值超过预定义阈值 50mV，则所有 PWM 信号将进入三态，直至控制回路要求发出另一个 PWM 脉冲。TI 建议，仅当软启动期间存在高浪涌电流和较大的 V_{OUT} 突波时，才应启用突波抑制功能。

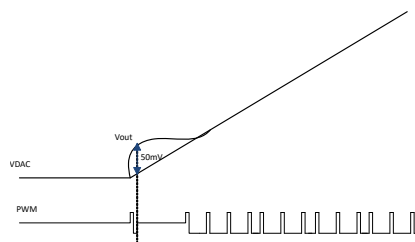


图 2-1. 启用突波抑制

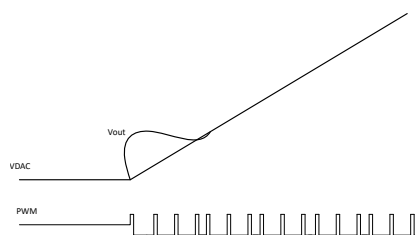


图 2-2. 禁用突波抑制

备注

输出电压波形仅为示意图，实际行为取决于环路补偿、min_ton 启动参数以及输出功率传输网络

3 系统说明和观察到的错误

在评估客户的电路板时，观察到异常启动行为。在启用突波抑制功能时，系统无法完成启动序列 (图 3-1)。相反，在禁用突波抑制功能时，系统能完成正常启动操作 (图 3-2)。在启动失败的情况下，控制器会记录 VOUT_UV 保护事件。

由于无法通过外部测量直接识别欠压 (UV) 触发的确切时序和条件，因此使用了仿真控制器来进一步调查该事件。通过监测仿真控制器的内部 VDAC 电压并通过 SMBus 警报报告其状态，成功确认了 UV 触发的发生。

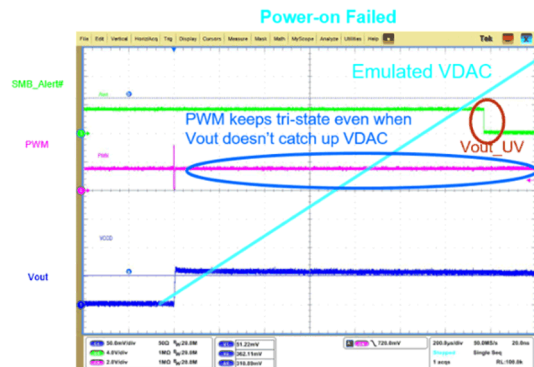


图 3-1. 启用突波抑制



图 3-2. 禁用突波抑制

如图 3-1 所示，当控制器停止 PWM 脉冲时，输出电压在前几个 PWM 脉冲后停止。由此产生了一个疑问：为什么控制器会停止生成 PWM 脉冲。在仿真中观察到，该问题与控制器积分器的饱和（高正值）有关。

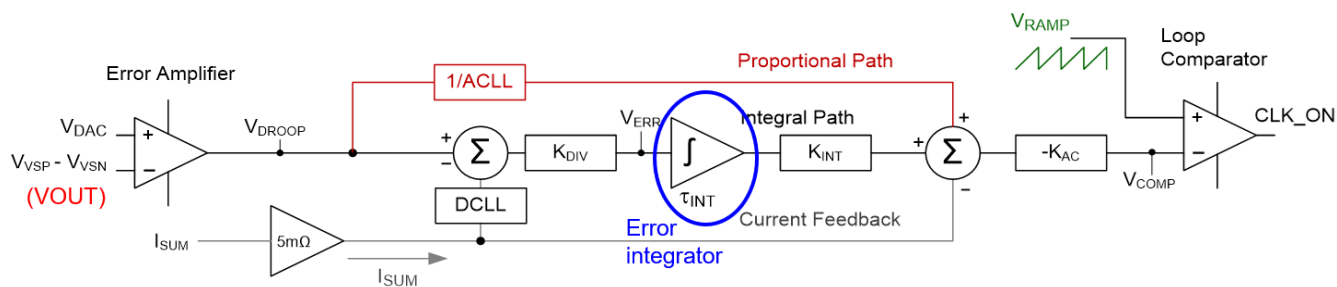


图 3-3. 环路补偿概念框图

积分器 (τ_{INT}) 在控制环路中的位置如图 3-3 所示。在 GUI 中，这表示为 Int 时间常数 (图 3-4)。但是，在突波抑制期间，会采用 τ_{INT} 不同值，且该类数值保存在寄存器位置中 0xCE<14:12> (不在 GUI 中)，具体表示为 Int_low_TC。时间常数的最终值为 $\tau_{INT} \times G_{INT}$ ，如表 3-1 所示。

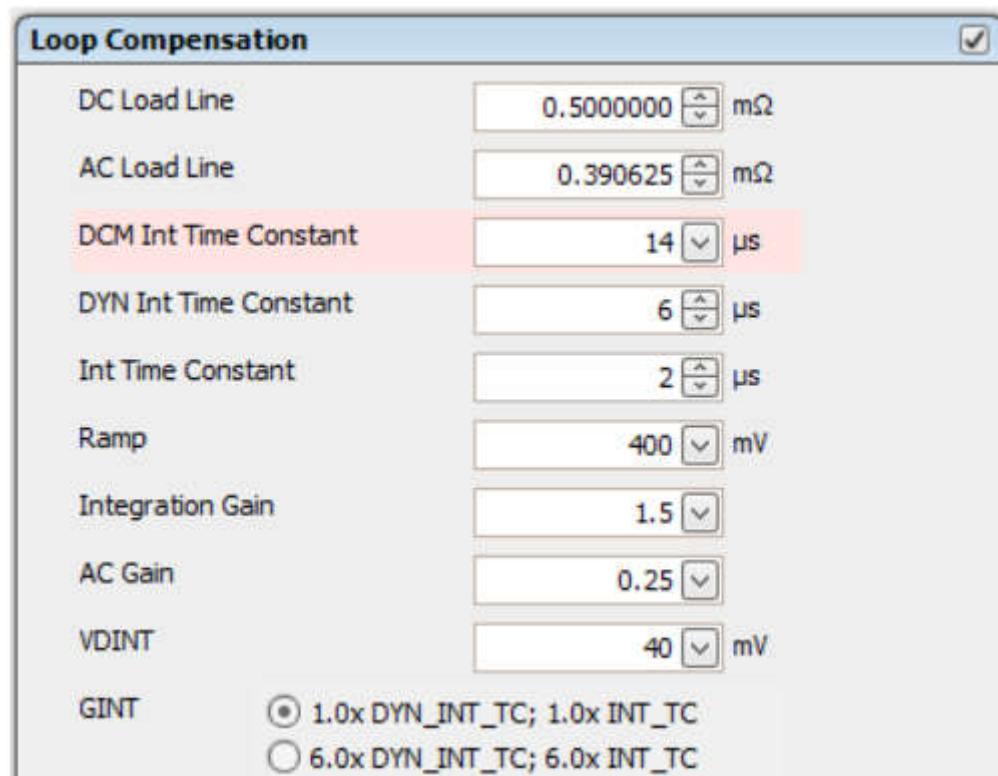


图 3-4. Fusion GUI 中的环路时序参数

表 3-1. 有效的积分时间常数

电路板	INT_TC GUI 值	INT_LOW_TC 寄存器名称	GINT	最终 INT_TC	最终 INT_LOW_TC	引导成功？
1U	2us	125ns	6	12us	750ns	是
2U	8us	125ns	1	8us	125ns	否
2U 实验	8us	1000ns	1	8us	1000ns	是

4 仿真分析和事件序列

不同运行模式的积分器电路如图 4-1 所示，其中最终积分时间常数为 $1/RC$ 。最初，积分器输出 V_I 为零。下面将结合模拟结果说明事件的顺序 (图 4-2)。

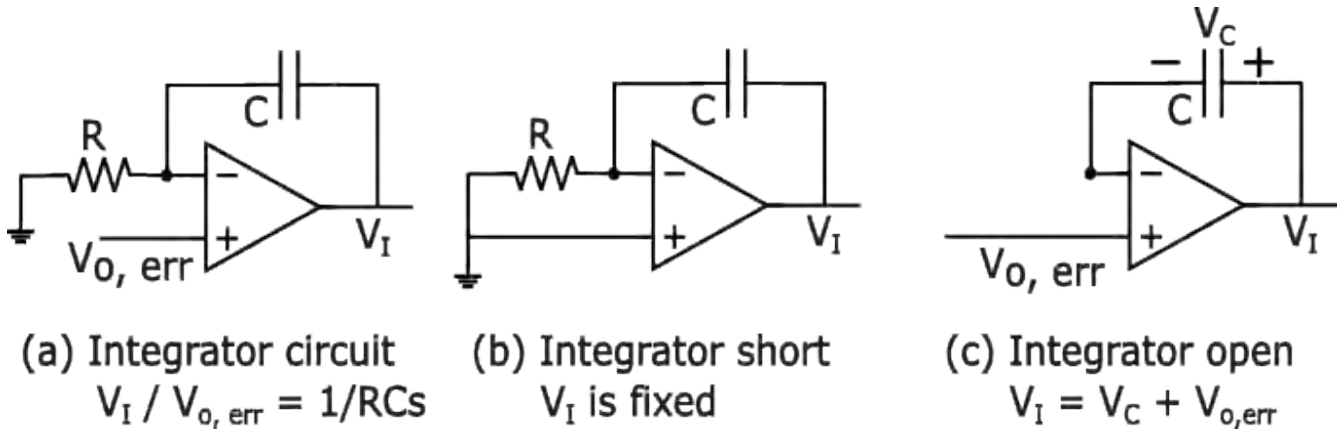
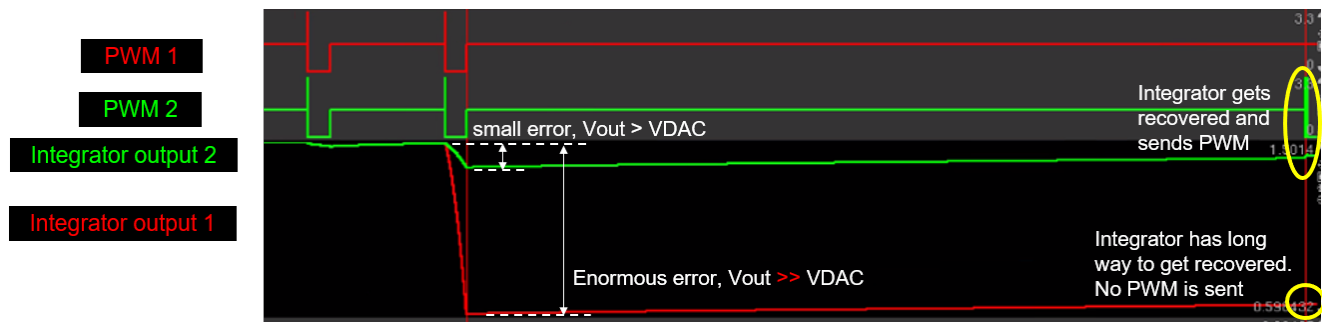


图 4-1. 不同运行模式下的积分器电路

1. 在初始状态下，PWM 为三态，积分器短路如图 4-1b 所示。启动期间，前两个 PWM 的连接保持不变。
2. 当第一个 PWM 到来时，输出电压会突升。这是功率级电感器和电容器的配置所致。此外，Int 的低 TC 被激活。在三态模式结束后，该状态在前两个 PWM 中保持为激活。请注意，积分器此时仍处于短路状态。
3. 当 V_{OUT} (在 AVSP-AVSN 处) 跳升至突波抑制阈值以上时，PWM 进入三态，积分器断开 (图 4-1c)。因此，误差积分停止。但是，积分器输出以与 V_{OUT} 误差相同的速度变化 ($V_I = \text{常数} + V_{o, error}$)
4. 当 V_{OUT} 降至突波抑制阈值以下时，将发出另一个 PWM。这是第二个 PWM，正常误差积分启动。
5. 由于积分时间常数较低 (积分系数较高)，积分器输出在大约 200ns 内迅速达到饱和。
6. 此时，输出再次跳升以检测第二次突波抑制事件，该事件将 PWM 置于三态并断开积分器。
7. 由于积分器处于饱和状态 (或极负值)，且积分器已被断开，下一个导通脉冲将长时间不会出现，PWM 保持三态状态等待下一个导通脉冲。
8. 这会导致 UV 故障，因为 DAC 在没有 PWM 的情况下持续上升。

仿真结果还表明，当 Final INT_LOW_TC 设置为 1000 ns 时，启动阶段内部误差积分器的积分速率会减慢，从而在输出电压上升暂时受限时，积分器不易发生饱和。在这种情况下，控制器能够继续生成 PWM 脉冲，从而使输出电压平稳上升。积分器这一行为差异，清晰地解释了在两种电路板设计之间观察到的启动行为差异。

这些结果表明，当启用突波抑制功能时，最终 INT_LOW_TC 参数在决定启动稳定性方面起着关键作用。



波形 1 (红色) 启用了突波抑制，且 (Final INT_LOW_TC) = 125ns

波形 2 (绿色) 启用了突波抑制，且 (Final INT_LOW_TC) = 1000ns

图 4-2. 不同最终 INT_LOW_TC 下的仿真结果

5 欠压故障触发识别

在启动失败的情况下，控制器会记录 VOUT_UV 故障。然而，无法仅通过外部测量直接确定 UV 触发的确切时序。

为了解决这个问题，使用了仿真控制器来监测内部 VDAC 电压。故障状态通过 SMBus Alert# 报告，从而可以识别欠压事件的时序。在图 3-1 中，SMBUS_ALERT# 在 VDAC 时置为约 400mV。这比 VOUT (50mV) 高 350mV。

该方法证实 UV 故障是在输出电压失速后触发的，与防止进一步 PWM 活动的积分器饱和一致。

6 测量验证

通过基准测试进一步验证了分析和仿真结果。如图 6-1 所示，当最终的 INT_LOW_TC 设置为 125ns 时，输出电压无法正常启动。当最终的 INT_LOW_TC 增加到 1000ns 时，如图 6-2 所示，输出电压能够成功启动。尽管内部积分器在初始启动阶段需要校准期，但输出电压不会降至 UV 阈值以下，从而阻止触发欠压保护并允许输出电压正常上升。

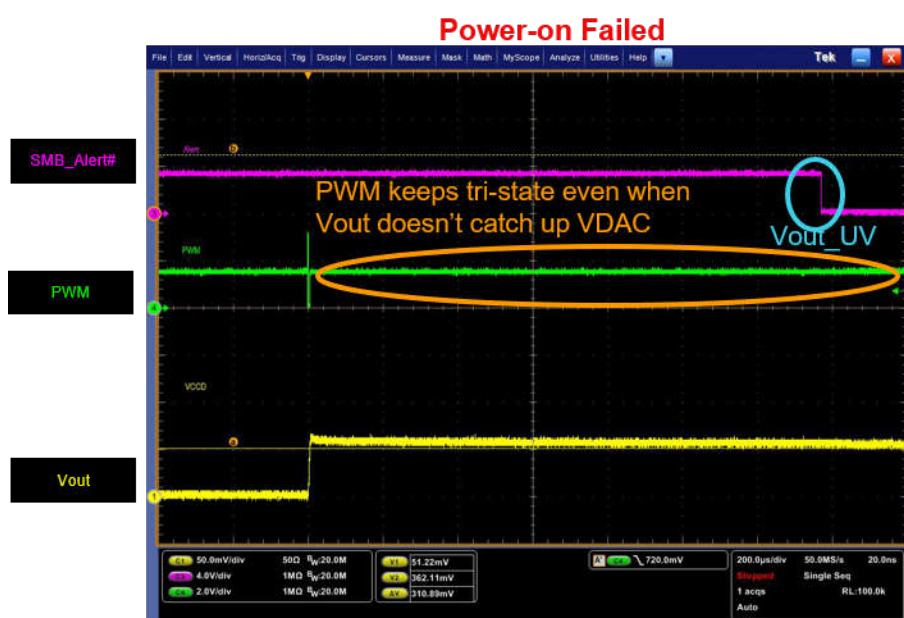


图 6-1. 启用突波抑制且最终 INT_LOW_TC = 125ns

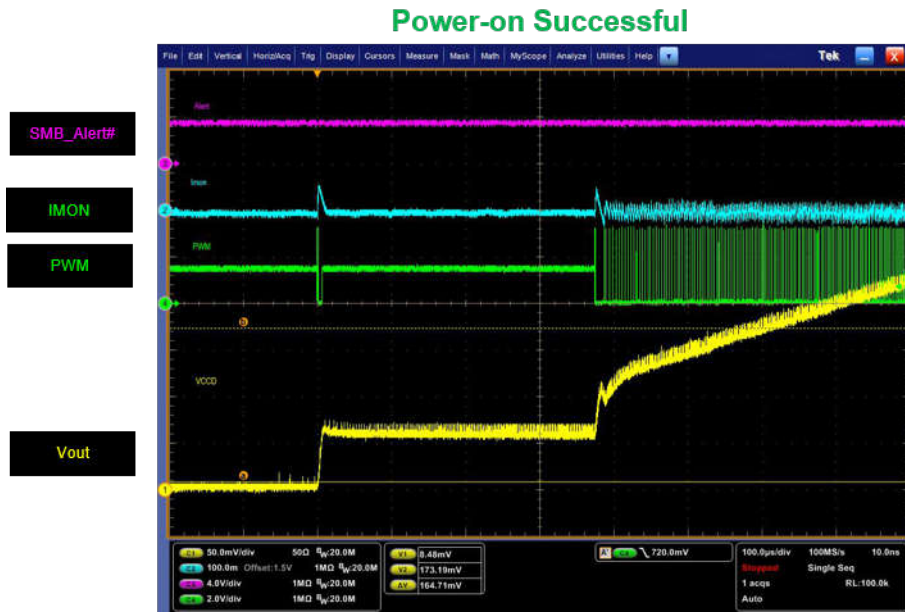


图 6-2. 启用突波抑制且最终 INT_LOW_TC = 1000ns

7 总结

本应用手册表明，在启用突波抑制时，在基于 TPS53689T 的设计中观察到的启动不稳定现象，可归因于过激的 Final_INT_LOW_TC 设置导致的内部误差积分器饱和。

通过控制环路分析、仿真和基准验证，证明增加 Final_INT_LOW_TC 值可有效防止积分器饱和，避免意外的欠压故障触发，并确保可靠的启动行为。

因此，在高电流多相 VR 应用中启用突波抑制功能时，正确调整控制环路参数至关重要。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI)，TPS53689T 双通道 ($N + M \leq 8$ 相) D-CAP+、降压多相控制器，支持 TLVR、PMBus 和 VR14 SVID 接口，数据手册。
- 德州仪器 (TI)，TPS536C9T 双通道 ($N + M \leq 12$ 相) D-CAP+、降压多相控制器，支持 TLVR、PMBus 和 VR14 SVID 接口，数据手册。

9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (May 2026) to Revision A (August 2026)	Page
• 通篇将英文 “startup” (启动) 的拼写更新为 “start-up” (启动)	0
• 更新了系统说明和观察到的错误 部分文本中的 τ_{INT} 格式.....	3
• 更新了仿真分析和事件序列 部分文本中的 $1/RC$ 格式.....	5

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月