

Elisabetta Mahmutovic, Stefan Schauer

### 摘要

在开关模式电源 (SMPS) 的定义中, 最典型的应用场景是在稳态下计算和定义工作参数和配置, 例如电感器、输出电容器、工作模式等。但是, 直流/直流转换器只有在上电后才能达到其第一个稳态工作点。如果不考虑某些因素, 对输出电容器充电的高浪涌电流通常会触发过流限制并迫使系统重新启动。在这种情况下, 如果输出电容器完全放电, 甚至可能导致系统不能启动, 直到启动下一个重启周期。

浪涌电流需要分为两路电流, 分别流向输入电容器和 SMPS 输出侧。然后, 输出侧再次分为两路电流, 一路电流为输出电容器充电, 另一路电流满足应用的需求。要特别注意的是, 由于通常需要相对较高的输出电容器, 因此在充电阶段会有大电流流入电容器, 直到电压达到所需的输出电压电平为止。

为了克服这个问题, 应该使用软启动电路。以下示例将使用 [LM5155](#), 这也适用于大多数 SMPS ( 开关模式电源 ) 器件。

本报告将从几个方面讨论如何定义软启动时间。

---

### 内容

1 概述.....	2
2 设计注意事项.....	3
3 软启动时间计算注意事项.....	4
4 不同拓扑中的软启动时间.....	5
5 修复软启动问题.....	7
6 总结.....	7
7 参考文献.....	7

### 插图清单

图 1-1. 软启动时序.....	2
图 4-1. 软启动引脚与 COMP 引脚之间的 PNP 双极晶体管.....	6
图 4-2. 反激式拓扑中的次级侧软启动.....	6

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 概述

SMPS 开启时，输入和输出电容器都需要充电。输入电容器直接由输入电源充电，而输出电容器则通过直流/直流转换器充电。输出端电容器充电所需的电流可能远高于最大负载电流，因此可能会触发过流保护，导致系统重启或关闭。

当最大允许电流流过功率级元件时，过流情况和随之而来的重启会给电路带来压力。此外，如果控制器在重启之前强制执行死区时间，则可能会导致输出电容器放电，进而导致无限的重启循环。

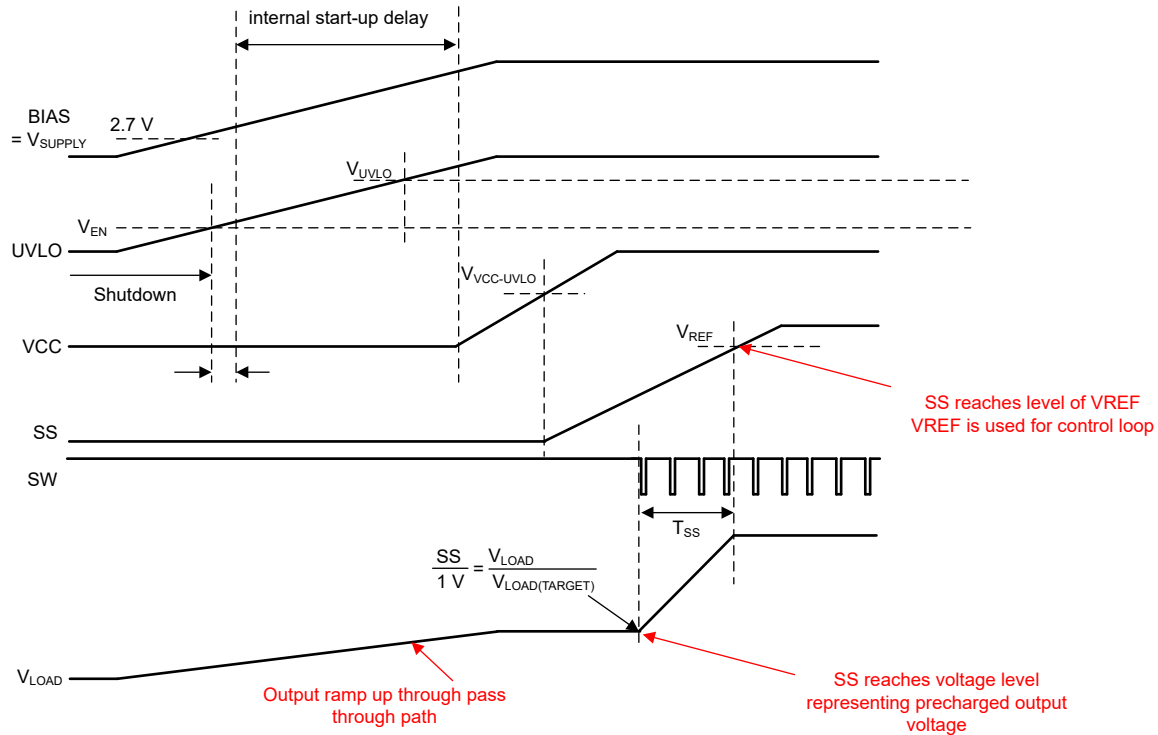


图 1-1. 软启动时序

通常，软启动机制允许缓慢斜升输出电压，直至达到调节目标。这样可以使输出电容器以定义的电流充电。如果是 **LM5155**，则基准信号由连接到器件软启动 (SS) 引脚的已充电电容器 (软启动电容器) 的电压电平进行修改。在启动阶段，该电容器由恒流源进行充电，只要该电压低于内部基准电压，SS 电容器上的电压就会用于调整输出电压。启动时间通过连接到 SS 引脚的电容器的值进行定义。

为了限制系统中的最大峰值电流，并避免大的浪涌电流和输出电压过冲，可采用的一种机制是限制 MOSFET 的占空比。由于采用了软启动，MOSFET 不会以可能的最大脉冲宽度启动。

## 2 设计注意事项

要定义将输出电压斜升至所需电平的相应软启动时间，需要考虑应用的某些方面：

- 最大输出电流
- 这是在不考虑电流限制或器件参数限制等任何限制的情况下，转换器可以提供的最大负载电流。绝不能超出器件参数限制，并且需要考虑明确的裕量。
- 输出电容和输出电容器的 **ESR**。由于电容决定了浪涌电流的值以及输出电压的目标值，因此电容发挥着重要作用。该电流基本上仅受电容器的 **ESR** 限制。（在大多数情况下，**ESR** 可以忽略不计，特别是对于陶瓷电容器，**ESR** 非常低。）
- 负载在启动阶段的行为
- 除了输出电容器的浪涌电流之外，**SMPS** 上的负载也会在启动阶段影响电流。这一点需要单独评估和考虑，例如，欧姆负载可能呈斜坡线性，而处理器或 **uController** 只能在特定的电压电平下启动，甚至是在电源稳定后启动，在这种情况下，可能不需要考虑软启动时间。

### 3 软启动时间计算注意事项

软启动斜坡时间可以用[方程式 1](#) 进行计算

$$C * U = I * t \quad (1)$$

重新排列为  $t_{SS}$  得到[方程式 2](#) :

其中 :

$$t_{SS} = \frac{C_{OUT} * U_{SS\_Step}}{I_{SS\_Ramp}} \quad (2)$$

$U_{SS\_step}$  : 软启动电压斜坡 = 软启动后的预期电压 - 预充电电压

软启动后的预期电压 : 通常为  $V_{OUT}$

预充电电压 : 适用于升压拓扑, 大多数其他拓扑的输入电压为 0V

$C_{out}$  : 总输出电容

$I_{ss\_ramp}$  : 软启动期间可用于为输出电容器充电的电流。如果在软启动时间期间存在目标负载的影响, 则需要首先将其减去。例如, 如果 **SMPS** 提供的电路仅在电源正常信号指明上电完成后才启用, 则负载电流可完全用于启动。如果是始终连接的欧姆负载, 则只能使用目标负载电流和最大负载电流之间的增量。但在这种情况下仍然可以使用一些裕量来避免系统触发过流

#### 3.1 LM5155x 的软启动电容器选择

**LM5155** 启动时, 内部  $10 \mu A$  软启动电流源 ( $I_{SS}$ ) 在  $V_{CC}$  电压超过  $2.85V_{CC}$  UV 阈值后  $50 \mu s$  导通, 或者在  $V_{CC}$  电压大于  $4.5V$  的情况下导通, 以首先满足的条件为准。软启动电流逐渐增加连接到 **SS** 引脚的外部软启动电容器上的电压。如果  $V_{CC}$  低于  $V_{CC}$  UVLO 阈值、UVLO 低于 UVLO 阈值、处于间断模式关断期间或处于热关断期间, 则 **SS** 引脚会下拉至接地, 并且 **SS** 引脚上的电容器由内部开关进行放电。

软启动电容器用于充分减小稳压器启动期间的负载电压过冲。[方程式 3](#) 用于计算建议的最小软启动电容值。

$$C_{SS} > \frac{10 \mu A \times V_{LOAD} \times C_{OUT}}{I_{LOAD}} \quad (3)$$

在次级侧隔离型反激式拓扑中, 当光耦合器尚未导通 (意味着  $V_{LOAD} < \text{大约 } 1.5V$ ) 时, 软启动机制会在启动时立即执行接管。

## 4 不同拓扑中的软启动时间

### 4.1 降压拓扑

([LM5155](#) 是升压控制器，但为了完整起见，此处也予以显示)

降压将从 0V 开始：

慢启动时间需要比输出 LC 滤波器的时间常数更长 ( 更慢 )。该时间约束可按照 [方程式 4](#) 所示进行表示

$$t_S \geq 2\pi\sqrt{L_{OUT} * C_{OUT}} \quad (4)$$

### 4.2 升压拓扑

此拓扑将以输出电压 = VIN 开始，因为这是通过电感器的通路。

SS 将充电，直到电压达到代表输出端已预充电的电压电平 (= 输入电压电平)，然后开始开关并通过软启动斜坡对输出端充电。

在升压拓扑中，软启动时间 ( $t_{SS}$ ) 随输入电源电压的变化而变化。升压拓扑中的软启动时间计算方式如 [方程式 5](#) 所示。

$$t_{SS} = \frac{C_{SS}}{I_{SS}} \times \left(1 - \frac{V_{SUPPLY}}{V_{LOAD}}\right) \quad (5)$$

### 4.3 Sepic 拓扑

SEPIC 转换器输出电压将从 0V 开始。因此，针对升压和 SEPIC 拓扑给出了不同的公式。

在 SEPIC 拓扑中，软启动时间 ( $t_{SS}$ ) 的计算方式为 [方程式 6](#)。

$$t_{SS} = \frac{C_{SS}}{I_{SS}} \quad (6)$$

### 4.4 反激式拓扑

本节将介绍不同的反激式拓扑及其软启动实现方式。IC 软启动引脚上的电容器始终是必需的，此外，根据选择的拓扑，可能还需要第二种机制。

#### 4.4.1 PSR 反激式拓扑：双极晶体管作为 COMP 引脚的下拉机制

在初级侧调节反激式 (PSR) 拓扑中，需要两种软启动机制：

- 软启动引脚上的电容器
- 软启动引脚和 COMP 引脚之间的 PNP 双极晶体管，如 [图 4-1](#) 所示

需要使用 PNP 双极晶体管来限制启动期间可提供的最大峰值电流，从而避免输出电压过冲。

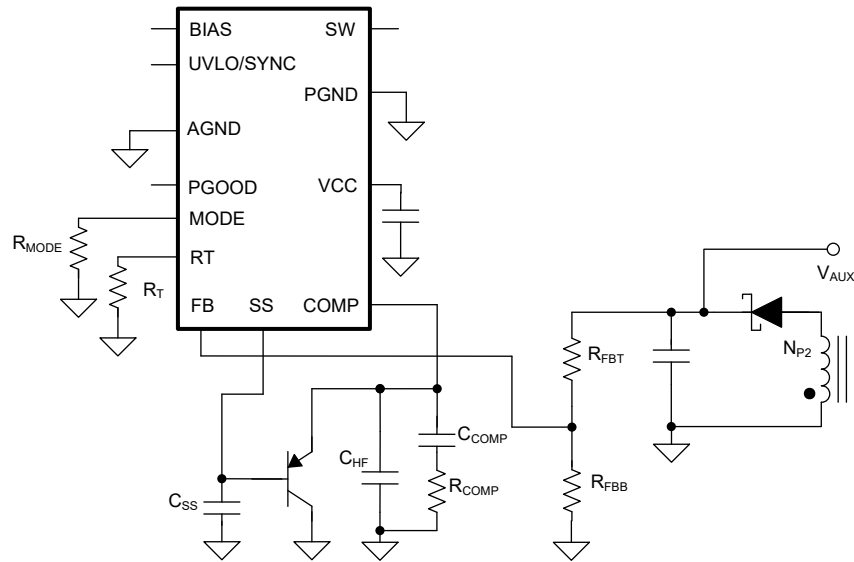


图 4-1. 软启动引脚与 COMP 引脚之间的 PNP 双极晶体管

#### 4.4.2 次级侧软启动元件

对于次级侧调节隔离型反激式拓扑，请参阅图 4-2，除了 SS 引脚上的电容外，次级侧还需要一种机制，包括：

- 一个电容器 ( $C_{SS,Sec}$ )
- 一个电阻器，用于在运行期间缓慢保持电容器充电 ( $R_{SS,Sec}$ )
- 两个二极管：一个用于为电容器充电，另一个用于让电容器放电 ( $D_{DIS}$ ，双封装)
- 一个电阻器，用于确定 RC 时间常数 ( $R_{OPTO,Diode}$ ，与光耦合器串联)

在光耦合器导通 ( $V_{out}$  从 0V 升到 1.5V 左右) 之前，SS 引脚上的电容器会限制系统中的峰值电流。一旦光耦合器开始导通，次级侧的软启动就会执行接管。在这种情况下，次级侧的电容器通过底部二极管充电，并通过上部二极管放电，以便在需要时为连续的软启动事件做好准备。

RC 时间常数由次级侧本身的电容器 ( $C_{SS,Sec}$ ) 以及与光耦合器串联的电阻器 ( $R_{OPTO,Diode}$ ) 一起确定。

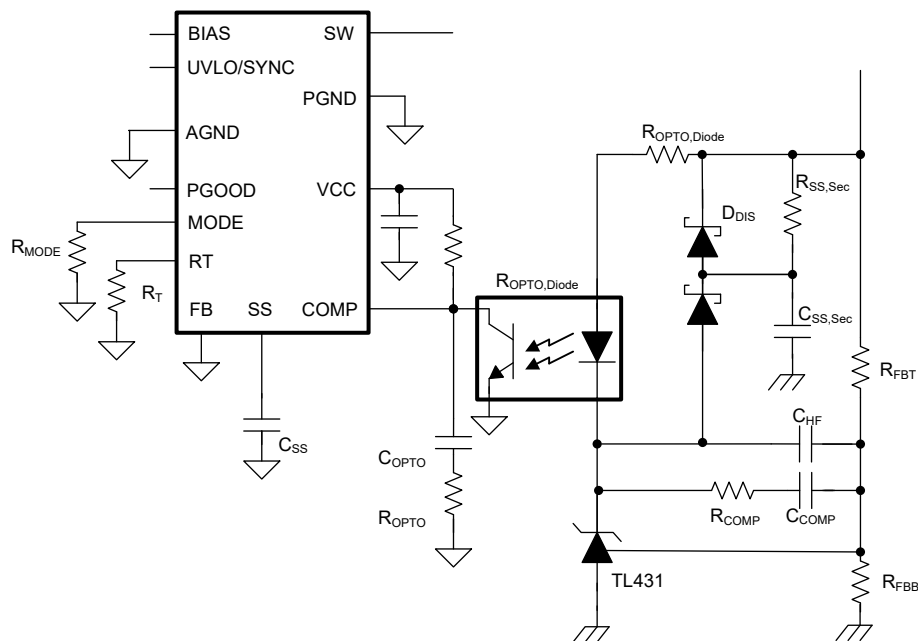


图 4-2. 反激式拓扑中的次级侧软启动

一旦电流开始流过光电器件，由次级 SS 电容器以及与光电器件串联的电阻确定的时间常数将控制剩余的启动时间。这是因为这两个元件随后将控制通过光电器件的反馈电流。一旦输出电压达到最终值，TL431 就会接管并控制通过光电器件的反馈电流。此时，从次级 SS 电容器连接到  $V_{OUT}$  的电阻器继续为次级 SS 电容器充电，使其不再干扰环路。该电阻通常很大，因此不会影响启动时间。

当不使用该电路时，例如在 PMP22151 中，初级 SS 电容器将完全控制启动时间。然而，这通常会导致启动期间输出电压过冲。（这便是使用次级 SS 电路的主要原因。）发生过冲是因为 TL431 放大器处于饱和状态，此时由初级 SS 控制环路。

## 5 修复软启动问题

当 SMPS 未按预期启动时，需要检查以下方面：

- 非常大的输出电容可能会导致转换器在启动期间达到过流限制；间断自动重启过程会无限期地持续下去
- 应更改检测电阻以允许更大的峰值电流（并使电路适应更大的电流：MOSFET、电感器和整流二极管）
- 减小输出电容（考虑更高的输出纹波）
- 增加软启动时间
- 一般来说，我们知道转换器达到过流保护的原因是 COMP 引脚或 CS 引脚达到过流阈值，而  $V_{OUT}$  低于调节点

## 6 总结

对于开关模式电源来说，配置正确的软启动时间至关重要。本报告讨论了软启动元件和电路的原理和选择，并介绍了可能的电路设计。

## 7 参考文献

1. 德州仪器 (TI)，[LM5177 80V 宽 VIN 双向 4 开关降压/升压控制器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[LM5177 降压/升压控制器评估模块](#)，用户指南。
3. 德州仪器 (TI)，[TL431 精密可编程基准](#)，数据表。
4. 德州仪器 (TI)，[电源设计小贴士：一种让隔离式转换器实现平滑软启动的简单电路](#)。
5. 德州仪器 (TI)，[LM5155EVM-BST](#)，用户指南。
6. 德州仪器 (TI)，[LM5155EVM-FLY](#)，用户指南。

## 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