

## Application Brief

## 如何减小功率电阻器用于牵引逆变器的直流链路放电



Khai Nguyen

## 引言

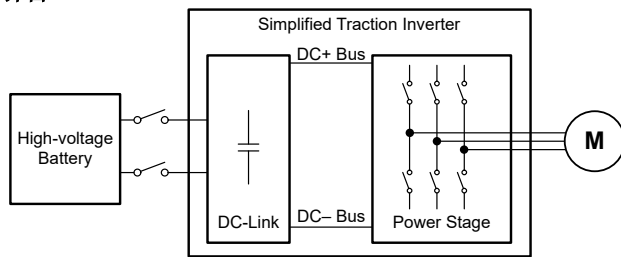


图 1. 牵引逆变器的简化框图

每个牵引逆变器中都有直流链路电容器，该电容器与高压电池和功率级并联（请参阅图 1）。直流链路电容器具有多种功能，例如帮助使电压纹波变得平滑、滤除不必要的谐波和降低噪声。

为了确保运行安全，直流链路电容器必须在两种不同的工作场景下进行放电：一是在正常运行中，例如车辆熄火后；二是在紧急情况下，例如车辆碰撞后或维护期间出现危险故障时。该放电过程旨在保护乘客或维护人员，尽可能地降低因接触带电部件或潜在火灾危险而造成人身伤害的风险。根据制造商的安全评估，该应用通常被评为 ASIL-B 级别。

本应用简报重点介绍了紧急操作，并在后续内容中描述了相关规范。在标称电池电压为  $800V_{DC}$  的情况下，该电路属于电压等级 B，即在  $60V < V_{DC} \leq 1500V$  范围。根据 ISO 6469 第 4 部分的规定，从车辆发生碰撞后停止的那一刻起，在最坏情况下，总线电压必须在 5 秒内达到并保持在  $60V_{DC}$  以下。

在使用系统当前的元件时，有多种方法可以进行主动放电。一些系统设计人员将功率级或电机绕组用作耗能元件，并由 MCU 控制以实现持续放电。然而，由于这些方法可能导致元件寿命提前退化以及对 MCU 的依赖，一些制造商的安全评估不允许使用此类方法。因此，通常会添加一个单独的电路来解决这些问题。

AFE539F1-Q1 是一款专为主动放电应用设计的模拟前端。该器件具有一个 10 位模数转换器 (ADC) 输入和一个 7 位脉宽调制 (PWM) 输出，并包含一个具有预编程恒定功率耗散控制的集成式状态机，能够充当电压至 PWM 转换器。因此，该器件无需 MCU 即可对直流链路电容器进行放电。与常用设计相比，采用 TI 的

AFE539F1-Q1 可降低总体 BOM 成本并减小功率电阻器的重量和尺寸（请参阅传统方法：强制放电）。

表 1 概述了典型规格，这些规格是本简报中的系统假设。这些规格可能会因牵引逆变器制造商的安全理念而有所不同。

表 1. 系统规格示例

参数	规格
电容器最大电压	$1000V_{DC}$
安全电压阈值	$60V_{DC}$
电容器容值	$1mF$
耗散时间	$< 5s$
BMS 断开连接	是

## 传统方法：强制放电

图 2 显示了直流链路电容器放电电路的典型实现方案。当直流链路电容器与任何电源断开连接时，激活的电源开关会通过功率电阻器  $R_{load}$  耗散剩余电能。这种方法对低功耗应用而言简单而有效，因为在此类应用中，功率电阻器的成本对总体物料清单 (BOM) 影响不大。然而，对于涉及高电压和大功率耗散的应用，情况则并非如此。功率电阻器的成本占比高达 85%，从而成为 BOM 的重要组成部分。

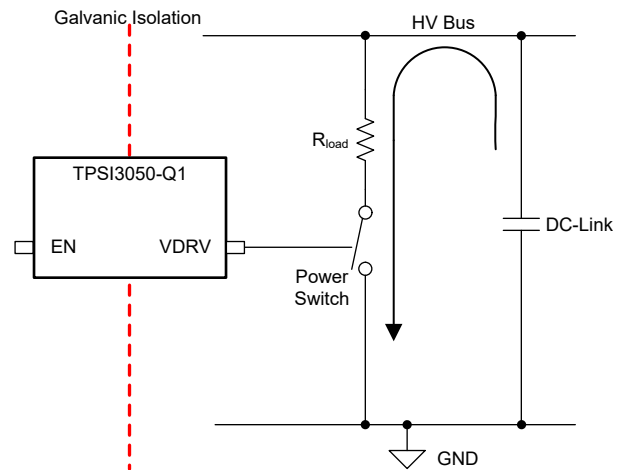


图 2. 采用 TPSI3050-Q1 的传统强制放电方法

图 2 所示为传统强制放电方法的简化框图。该设计采用 **TPSI3050-Q1** 作为栅极驱动器，并且通过 **EN** 引脚提供主电源。

电容器的放电呈负指数衰减，如方程式 1 所示：

$$U(t) = U_0 \times e^{-\frac{1}{RC}t} \quad (1)$$

其中

- $U_0$  = 初始电容器电压，单位为 V
- $C$  = 直流链路电容，单位为 F
- $R = R_{load}$  电阻，单位为  $\Omega$

在给定的系统假设下，电阻大小可以按照方程式 2 进行计算。

$$R = -\frac{t}{C \times \ln\left(\frac{U(t)}{U_0}\right)} = -\frac{5s}{1mF \times \ln\left(\frac{60V}{1000V}\right)} \approx 1,777.2\Omega \quad (2)$$

使用  $1600\Omega$  作为最接近的标准电阻值时，电路会在 4.5 秒内达到  $60V_{DC}$ 。根据欧姆定律，峰值电流为  $625mA$ 。因此，功率电阻器的额定功率必须为  $625W$ （参阅图 3， $t = 0$  秒时的功率）。这个计算考虑了放电电路的频繁使用，因此  $R_{load}$  不会损坏，周围的电路板区域也不会过热。如果该电路仅用作备用紧急放电，则电阻器在每次使用之间有足够的冷却时间。因此，可以考虑功率电阻器的过载情况。

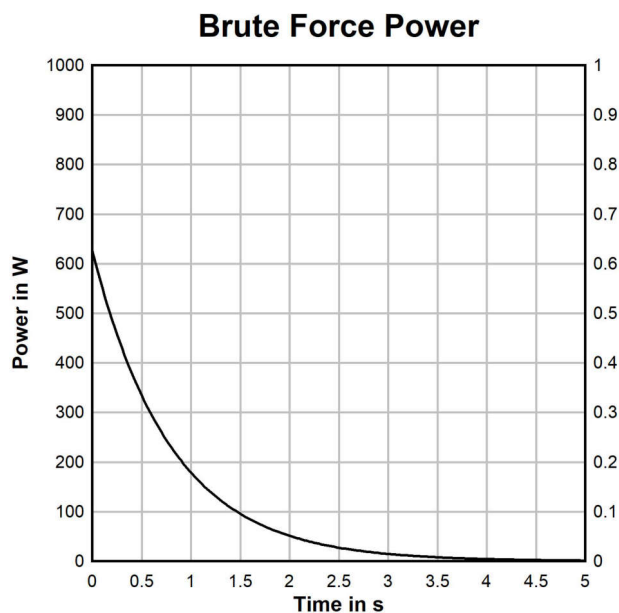


图 3. 使用强制放电方法时功率随时间的分布情况

## 使用 PWM 实现恒定功率耗散

使用电阻器作为热耗散元件时，额定功率是决定电阻器成本、重量和尺寸的主要因素。图 3 中的功率曲线表明，功率耗散会自然呈指数级下降。

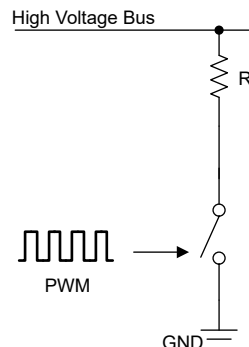


图 4. 改变有效电阻

为了更均匀地分配功率耗散，低侧开关通过向该电路施加不同的占空比来改变有效电阻  $R_{eff}$ 。（请参阅图 4 和方程式 3。）

$$P_{const} = \frac{V_{bus}}{R_{eff}} \quad (3)$$

$$R_{eff} = \frac{R_{load}}{D} \quad (4)$$

其中

- $D$  = 占空比且  $0 \leq D \leq 1$

**AFE539F1-Q1** 器件基本上充当电压至 PWM 转换器。这样可实现低占空比，因此在早期放电阶段具有更高的电阻。随着时间的推移，占空比逐渐增加，电阻也逐步降低到  $R_{load}$ 。该配置在非易失性存储器中单独编程，其中包含放电曲线。因此，激活后，此电路就可以在本地图运行，无需额外的 MCU。

从系统角度来看，以恒定功率耗散方式对直流链路电容器进行放电有几个优势。首先，如前所述，这种方法有助于降低功率电阻器的额定功率要求。其次，这直接适用无论是单独购买还是集成的各个散热器。通过保持恒定的高温，可以在整个放电过程中充分利用散热器的完整热容量，而不需要针对早期放电阶段的最坏情况来确定散热器的大小。此外，均匀的电流和热耗散分布可以延长直接使用的器件（例如电源开关或分流器）或电路周围物理分布的器件的寿命。

电阻式主动放电电路在高压侧实现，也称为热侧或电源板。**AFE539F1-Q1** 通过检测总线电压来向栅极驱动器输出不同的 PWM 信号，然后由栅极驱动器负责操作电源开关。**UCC27531-Q1** 是一款简单且成本敏感的单通道栅极驱动器，可用于驱动 IGBT、Si-FET 或 SiC-FET。由于 **AFE539F1-Q1** 需要将测量的直流链路电压作为输入值，因此需要一个电阻分压器。为了在相当长

的电阻器链中节省空间并限制整个生命周期内的漂移，建议使用高精度 RES60A-Q1 分压器。该电路可通过使用栅极驱动器 UCC27531-Q1 的 EN 引脚来激活。数字隔离器器件 ISO6721-Q1 用于传输来自低压侧的使能信号，该信号可以由 MCU、监控器或任何失效防护逻辑触发。

通常，每次启动时都会测试直流链路电容器的放电情况，以确保其正常工作。为了避免过度使用电池连接继电器，可以使用分流器来检测电流。可以使用运算放大器 LM2904B-Q1 或仪表放大器。电流信号可以通过相同的双向数字隔离器 ISO6721-Q1 传输到低压侧。这种监控方式可以在系统中实现诊断功能。

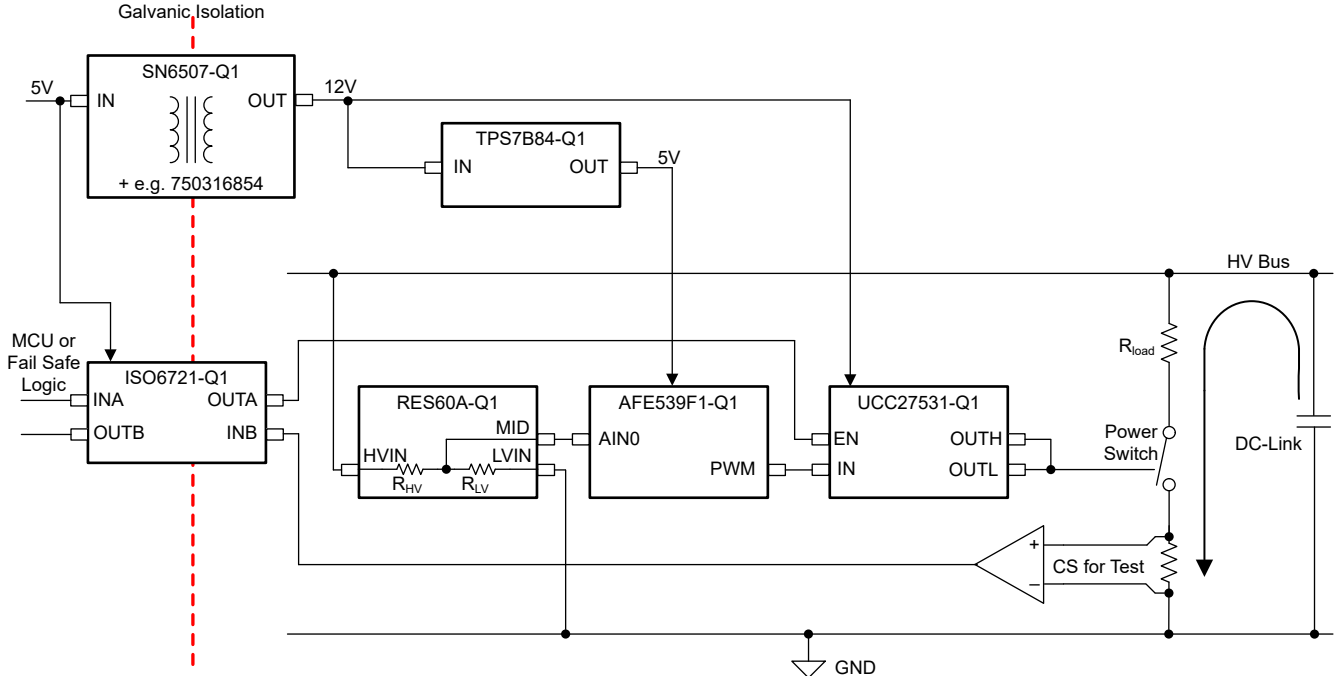


图 5. 使用 AFE539F1-Q1 通过 PWM 实现恒定功率耗散

### 计算与配置

本节介绍了如何对主动放电电路进行计算，以便根据不同的系统规格进行调整。

AFE539F1-Q1 具有可通过串行外设接口 (SPI) 或 I<sup>2</sup>C 配置的配置参数。借助相应的评估板，可通过用户界面 SMART-DAC-EVM-GUI 轻松更改这些值。

- PWM 频率 ( 1.017kHz 或 0x0B ) : 在较高频率下，寄生电感可能会引发问题
- 基准增益 ( 1 × , 使用 VDD 作为基准 ) : 高量程且易于实现
- 函数系数 ( K=0x186 ) : 达到 5 秒系统要求所需 ( 请参阅表 1 )
- 最小占空比 ( 0x00 ) 和最大占空比 ( 0x7F ) : 使用 0% 至 100% 的整个占空比范围

要计算 AFE539F1-Q1 的 ADC 输入，必须使用表 2 中的数据来定义满量程电压。设计目标是实现较大的满量程范围。当 V<sub>DD</sub> = 5V 时，满量程由 V<sub>FS</sub> = 5/3V 定义。当 V<sub>bus</sub> = 1000V 时，电阻分压器分压比大约为 599:1。RES60A-Q1 的标称电阻为 12.5MΩ，内置比率为 610:1。

表 2. 满量程 ADC 输入

基准输入	工作范围	增益	V <sub>FS</sub> ( 内部除以 3 )
电源	1.7V 至 5.5V	1 ×	0.567V 至 1.833V
外部	1.7V 至 5.5V	1 ×	0.567V 至 1.833V
内部	1.1979V 至 1.224V	1.5 ×	0.599V 至 0.612V
		2 ×	0.799V 至 0.816V

现在已设置满量程电压 V<sub>FS</sub>，ADC 输入在方程式 5 中被定义为整数。

$$ADC\_DATA = \frac{V_{IN}}{V_{FS}} \times 2^N \quad (5)$$

其中

- V<sub>IN</sub> = ADC 输入，其中 V<sub>IN</sub> = V<sub>BUS</sub> \* 电阻分压比
- V<sub>FS</sub> = 由 AFE539F1-Q1 配置定义的 ADC 满量程
- N = ADC 分辨率 = 8 位

方程式 6 显示了如何根据可配置的 K 值计算占空比。

$$\text{PWM Code} = \frac{2^7 \times K}{(\text{ADC\_DATA})^2} \quad (6)$$

其中

- PWM 代码 = 定义为 1 到 127 之间的整数
- K = 0 到 65535 之间的配置值

将方程式 5 和方程式 6 结合起来后得到最终的方程式 7。使用方程式 8 来计算实际占空比。

$$\text{PWM Code}(V_{\text{IN}}) = \frac{K \times (V_{\text{FS}})^2}{(V_{\text{IN}})^2 \times 2^9} \quad (7)$$

$$D = \frac{\text{PWM Code}}{128} \quad (8)$$

同样，将这些公式结合后，函数 D (V<sub>IN</sub>) 确定了占空比如何根据电压阈值发生变化。对于 PWM 代码 = 127，占空比被强制设为 100%。

表 3. K = 390、V<sub>bus</sub> = 1000V 且比率为 610:1 时的占空比

PWM 代码	占空比	从 V <sub>bus</sub>	至 V <sub>bus</sub>
1	0.78%	1000V	628.52V
2	1.56%	628.52V	512.98V
3	2.34%	512.98V	445.38V
4	3.13%	445.38V	397.66V
...	...	...	...
127	100%	79.53V	

利用这些阈值并结合方程式 1 中的负指数电容器放电，图 6 展示了直流链路电容器随时间的放电情况。在每个占空比阶跃中，有效电阻都会发生变化，从而形成不同的图形部分。

为了选择功率电阻和 K，同时仍满足系统要求，AFE539F1-Q1 随附了一个计算表。线绕电阻器往往具有较高的寄生电感，这可能导致压摆率增加。因此，建议选择厚膜电阻器并配合低开关频率使用。图 7 显示了均匀计算的功率耗散。

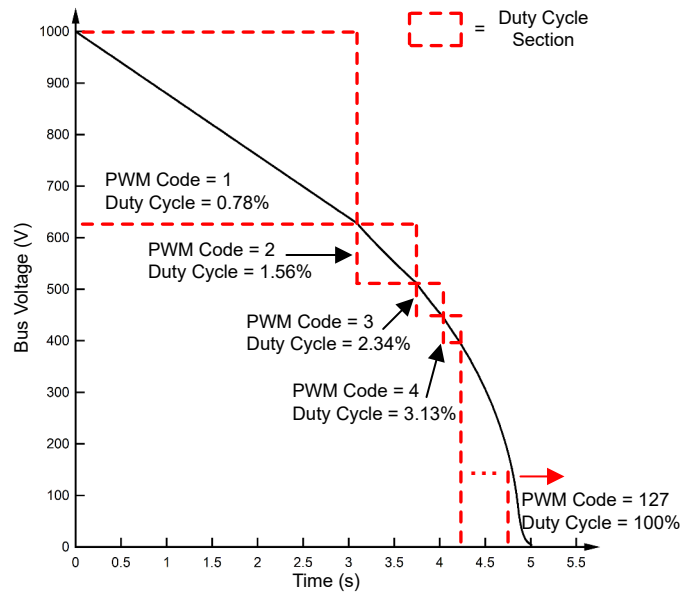


图 6. K = 390、V<sub>bus</sub> = 1000V、比率为 610:1 且 R<sub>load</sub> = 50Ω 时直流链路电压随时间的变化情况

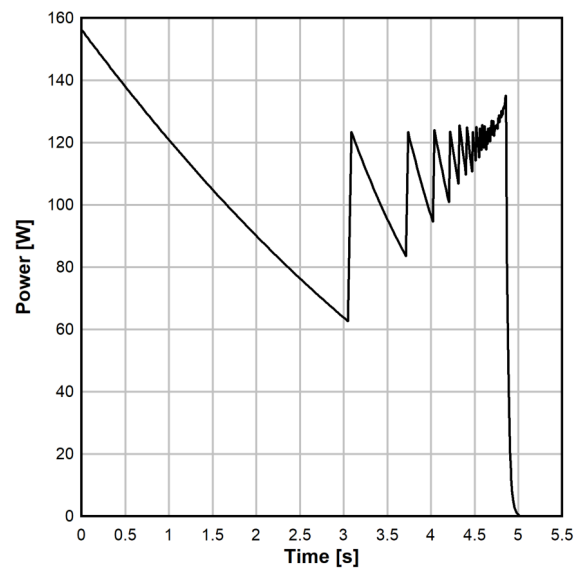


图 7. K = 390、V<sub>bus</sub> = 1000V、比率为 610:1 且 R<sub>load</sub> = 50Ω 时功率耗散随时间的变化情况

## 结语

当选择  $K = 390$ 、 $V_{\text{bus}} = 1000\text{V}$ 、电阻比为 610:1 且  $R_{\text{load}} = 50\Omega$  时，得到的功率耗散如图 7 所示。此设置可以在 4.9 秒内完成直流链路电容器放电，并且峰值功率约为 160W。每次占空比阶跃变化都会产生相应的尖峰，在电流中也是如此。在没有 PWM 的情况下，需要额定功率约为 625W 的功率电阻器，才能实现相同的快速均匀耗散。对于第二种电路，功率电阻器的 BOM 成本占比高达 85%。总的来说，将额定功率从 625W 降低到 160W 可以带来高达 50% 的成本节省。

## 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