



Dorian Brillet de Cande, Giorgia Navarra, Nelson Espindola-Rojas

### 摘要

本应用手册说明了如何使用 2 端口分流测量法测量直流/直流转换器的配电网 (PDN) 阻抗，此方法适合在非常高的频率下测量低至毫欧姆的阻抗。使用大多数实验室里的常见仪器可以在很短的时间内重现此方法。

### 内容

1 引言.....	2
2 2 端口分流测量理论.....	2
3 系统设置和校准元件.....	3
4 TPS62A01 输出 PDN 的 2 端口分流测量.....	4
5 PDN 阻抗测量示例.....	5
6 总结.....	5
7 参考文献.....	6

### 插图清单

图 2-1. 2 端口分流电路配置.....	2
图 2-2. 2 端口分流电路配置.....	2
图 3-1. 带有 T 形连接器 (左) 和校准元件 (右) 的系统设置.....	3
图 3-2. 使用简单 SMA 连接器的高频探头技术.....	4
图 4-1. TPS62A01 输出 PDN 的 2 端口分流测量.....	4
图 5-1. 连接到电阻负载的 TPS62A01 的输出阻抗测量.....	5

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

特别是对于直流/直流转换器，由于严格的负载瞬态要求，满足低 PDN 阻抗对于减少电压变化非常重要。在理想的 PDN 设计中，直流/直流转换器能够为负载提供稳定的电压并将其保持在小的裕度内。在设计 PDN 时，重要的是要验证直流/直流转换器的输出阻抗（或输入阻抗）是否满足其目标阻抗并实现毫欧范围内的低阻抗值。PDN 阻抗分析显示了构成电力网络的无源器件阻抗在频率上的叠加。

本应用报告介绍了一种用于评估直流/直流转换器 PDN 的测量方法，即 2 端口分流测量。这种方法允许 PDN 设计人员测量低至毫欧的阻抗，同时支持在非常高的频率下进行测量。

## 2 2 端口分流测量理论

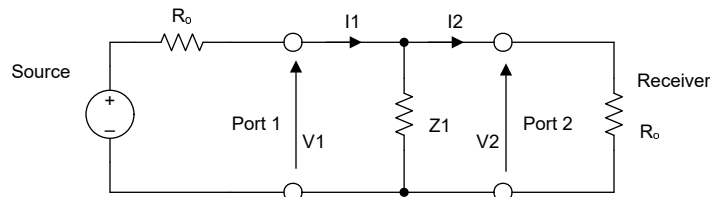


图 2-1. 2 端口分流电路配置

图 2-1 显示了 2 端口分流电路配置，用以测量  $Z_1$  阻抗。首先，计算 S 参数  $S_{21}$  以推导  $Z_1$  阻抗值。按照定义， $S_{21}$  为：

$$S_{21} = \frac{V_2 + I_2 R_0}{V_1 + I_1 R_0} = \frac{2 Z_1}{2 Z_1 + R_0} \quad (1)$$

假设  $R_0 = 50 \Omega$  且  $S_{21} \ll 1$ （对于非常小的阻抗/电阻 -  $Z_1 \ll R_0$ ），所求的  $Z_1$  结果为：

$$Z_1 = \frac{25 S_{21}}{1 - S_{21}} \sim 25 S_{21} \quad (2)$$

需要注意的是， $S_{21}$  的测量受 VNA 性能的影响，例如动态范围、信噪比和有效位数。

由于 VNA 中的所有接地都指向同一点，因此会产生额外的共模电流并影响测量精度，从而导致测量误差。然后将半浮动差分放大器用作接地隔离器，以尽可能减小接地环路电流。

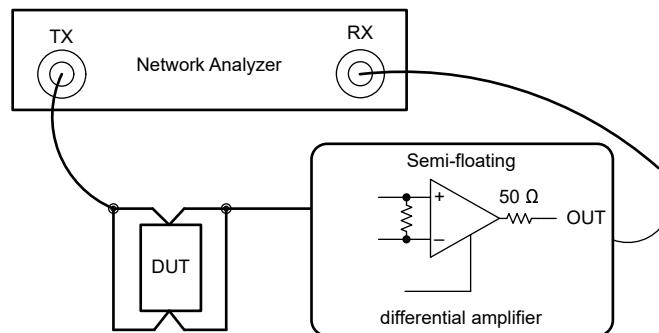


图 2-2. 2 端口分流电路配置

图 2-2 显示了 2 端口分流测量设置。2 端口分流测量使用矢量网络分析仪 (VNA) 来计算非常高频的阻抗，并使用半浮动差分放大器来测量低至  $1\text{m}\Omega$  的阻抗。选择具有较大共模电流电阻的半浮动差分放大器对于提高测量精度至关重要，尤其是在频率较低的情况下。

### 3 系统设置和校准元件

在执行测量之前，需要对 VNA 进行直通校准，以避免额外的串联电阻和阻抗失配。在高频下，通常会出现失配情况。使用 SMA 连接器有利于消除失配错误。SMA 连接器还提供尺寸小、重量轻和支持高频的连接器，最高可达 18GHz。



图 3-1. 带有 T 形连接器 (左) 和校准元件 (右) 的系统设置

VNA 和半浮动放大器通过如图 3-1 所示的 SMA T 形连接器连接，第三个孔连接到校准元件。

如图 3-1 所示，校准元件非常便于安装典型的旁路电容器尺寸。中心引脚和 GND 引脚之间的距离必须与 DUT 具有相似的大小。在 PDN 评估的情况下，降压转换器输出电容器的焊盘。通常使用的校准元件是开路、短路和 50  $\Omega$  负载。可以使用其他基准元件 (如电容器、电感器或 1m $\Omega$  电阻器) 来验证 VNA 校准的质量。这些元件可以购买，也可以从母型 SMA 连接器开始手工制作 [6]。

为确保阻抗测量的可靠性和可重复性，验证 VNA 的测量参数非常重要。默认情况下，工作频率范围可能比整个频率范围窄，因此可以扩展，以评估更宽的频率范围。频率窗口也可以减小，以更大限度减少计算时间。为避免测量饱和，建议调整接收器通道的衰减电平。

施加的信号可以基于 DUT 进行调制。通常，较高的信号电平在测量值中提供较低的信噪比 (SNR)。但是，陶瓷电容器等无源器件的阻抗值往往会随测量信号电平而变化。然后，用户需要根据频率调整信号电平。

如果校准没有很好地执行，系统会受到更高的 SNR 和不准确度的影响。这将阻止在整个频率范围内测量非常低的阻抗。

直通校准后，DUT 即可连接到系统，以开始测量。

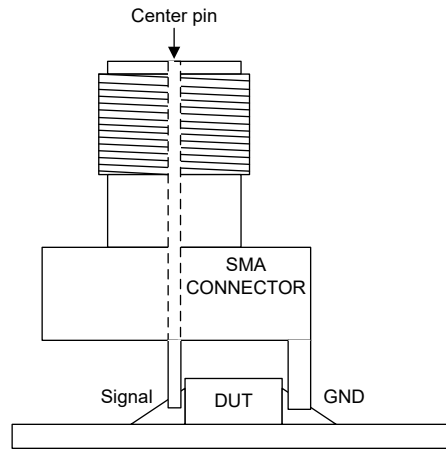


图 3-2. 使用简单 SMA 连接器的高频探头技术

通过切断一些 SMA 连接器的 GND 引脚，可以修改 SMA 连接器，如图 3-2 所示。另一种方法是使用 SMA 半刚性电缆并将其剪短，剥去中心导体并将短引脚焊接到外导体。

#### 4 TPS62A01 输出 PDN 的 2 端口分流测量

图 4-1 显示了执行 2 端口分流测量的应用电路，评估了 TPS62A01 输出 PDN。

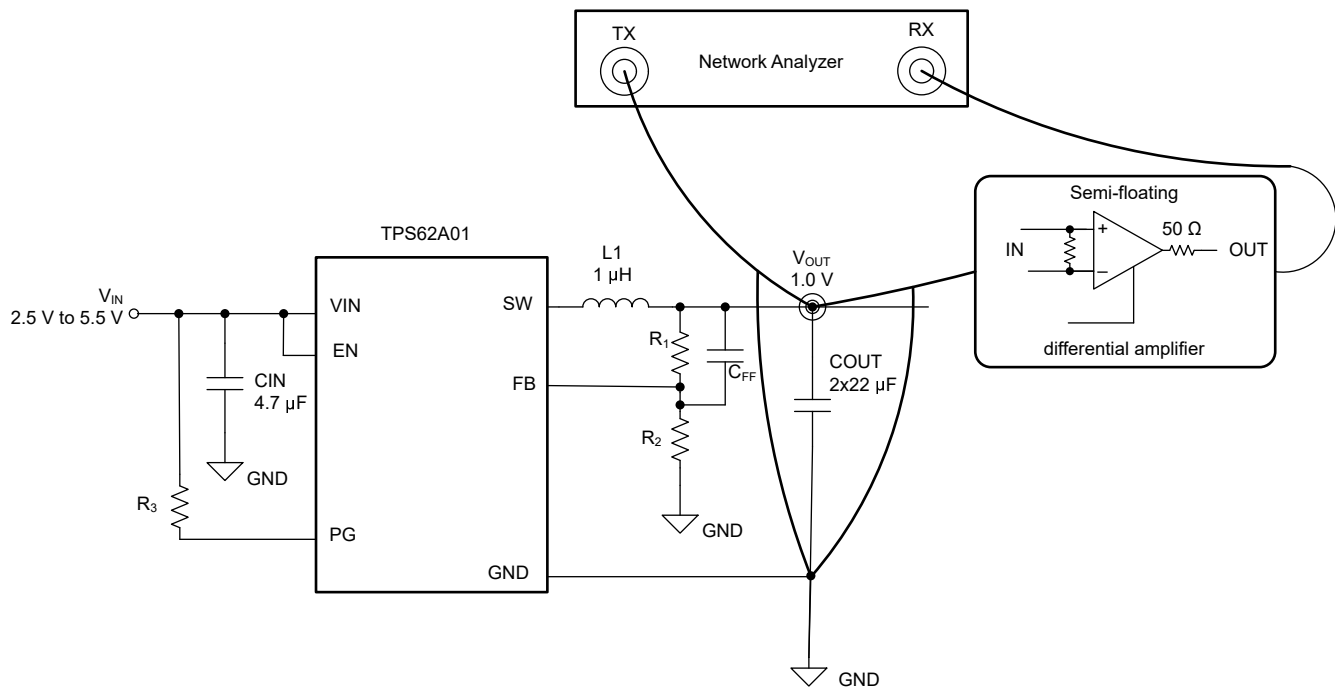


图 4-1. TPS62A01 输出 PDN 的 2 端口分流测量

VNA 输出 (TX) 通过直接连接来连接到输出 PDN。VNA 输入 (RX) 通过 VNA RX 侧的半浮动差分放大器连接到 PDN 的输出。

残余阻抗将直接影响非常低的阻抗测量。因此，确保连接长度尽可能短可保证更好地适应随频率变化的实际 PDN 行为。确保紧密连接还有助于减少寄生耦合效应并获得更准确的结果。

## 5 PDN 阻抗测量示例

无源器件有助于降低电源层和接地层之间特定频率下的阻抗。在 PDN 上使用不同无源器件的集合构建滤波器，以实现目标阻抗。通常，板载无源器件可将阻抗降低至数百 MHz。

但是，每个无源器件都有影响其阻抗行为的寄生元件。分析 PDN 阻抗有助于识别 PDN 随频率变化的临界点。例如，将其应用于噪声消除时，可以验证在给定频率下使用低阻抗电容器的效果。

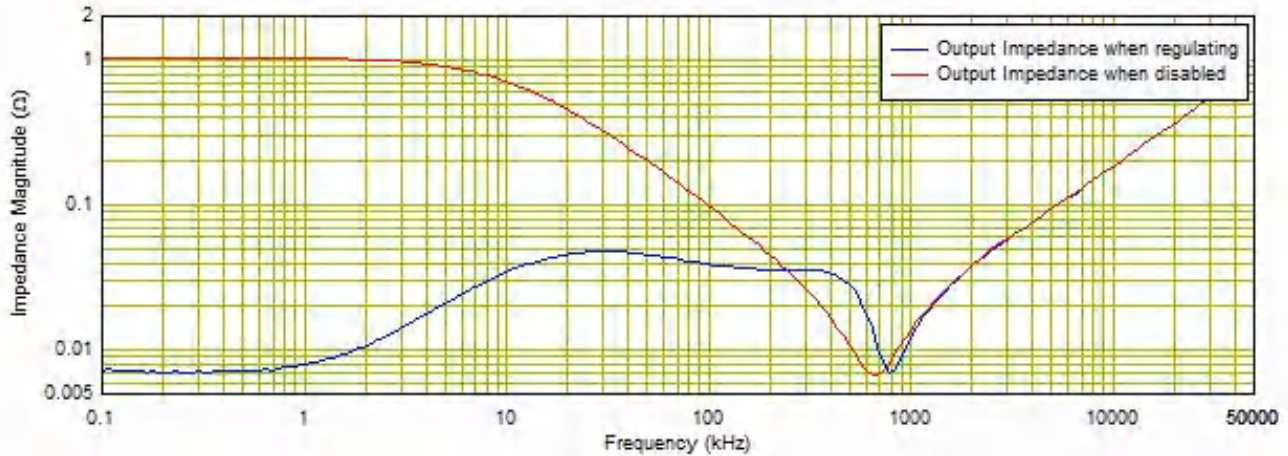


图 5-1. 连接到电阻负载的 TPS62A01 的输出阻抗测量

图 5-1 显示了 TPS62A01 在转换器调节（蓝色曲线）和转换器禁用（红色曲线）时的输出阻抗。在中间部分，测得的阻抗会跟踪输出电容器组的阻抗，随着其 ESR 值在 800kHz 处变平。在高频下，阻抗主要由电容的感应行为决定。

## 6 总结

使用 2 端口分流测量法，可以在非常高的频率下可靠地测量低至毫欧的阻抗。在大电流操作中，PDN 设计人员需要在频率范围内实现非常低的阻抗，以满足负载瞬态要求。因此，通过易于使用的设置在所有频率上测量非常低的阻抗是一个常见的难题。

使用 PDN 阻抗测量可供您进行进一步分析。获取的有用数据可供进行直流/直流转换器稳健性评估和稳定性检查。

## 7 参考文献

1. [The 2-Port Shunt-Through Measurement and the Inherent Ground Loop](#)
2. [Extending the Usable Range of the 2-Port Shunt Through Impedance Measurement](#)
3. [J2113A Semi-Floating Differential Amplifier - Ground Loop Breaker](#)
4. [3.5mm / SMA Vector Network Analyzer Components](#)
5. [Make Simple Fixtures from SMA Connectors](#)
6. [Homemade SMA Female Calibration Kit Measurements](#)
7. [Calibrating the E5071C Network Analyzers](#)
8. [2-Port Shunt-Through Impedance](#)

## 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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司