

Technical Article

在高开关频率下为整流器设计有源钳位电路



Daniel Gao

简介

在车辆电气系统中，高压到低压的 DC/DC 转换器是一种可逆的电子器件，它可以将车辆高压电池（如 400V 或 800V）输出的直流电转换为较低的直流电压（12V）。这类转换器可以是单向或双向的。常见功率级别为 1kW 到 3kW，系统转换器高压侧（初级侧）通常需要使用额定电压为 650V 到 1200V 的元件，12V 电源网（次级侧）至少需要 60V。

为实现更高的功率密度和更紧凑的动力总成系统，功率元件的开关频率被提升至数百千赫兹，从而有助于减小磁性元件的体积。高压转低压 DC/DC 转换器的小型化暴露出许多在较低开关频率下不太突出的设计问题，例如电磁兼容性 (EMC)、热耗散，以及金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的有源钳位设计。在本期电源设计小贴士中，我将讨论在高开关频率下同步整流 MOSFET 的钳位电路设计。

传统有源钳位

图 1 所示的相移全桥 (PSFB) 是一种在高压转低压 DC/DC 应用中非常常见的拓扑结构，它可以在开关管上实现软开关，从而提高转换器效率。但同步整流器上仍会出现高电压应力，因为其寄生电容会与变压器漏感发生谐振。整流器的电压应力可能高达公式 1 的值：

$$V_{ds_max} = 2V_{IN}x(N_s/N_p) \quad (1)$$

其中 N_p 和 N_s 分别表示变压器的初级绕组和次级绕组。

考虑到高压转低压 DC/DC 转换器的功率等级以及电阻-电容-二极管缓冲电路 [1] 所带来的功率损耗，设计人员通常会为同步整流 MOSFET 使用有源钳位电路。图 1 展示了典型的钳位电路设计。

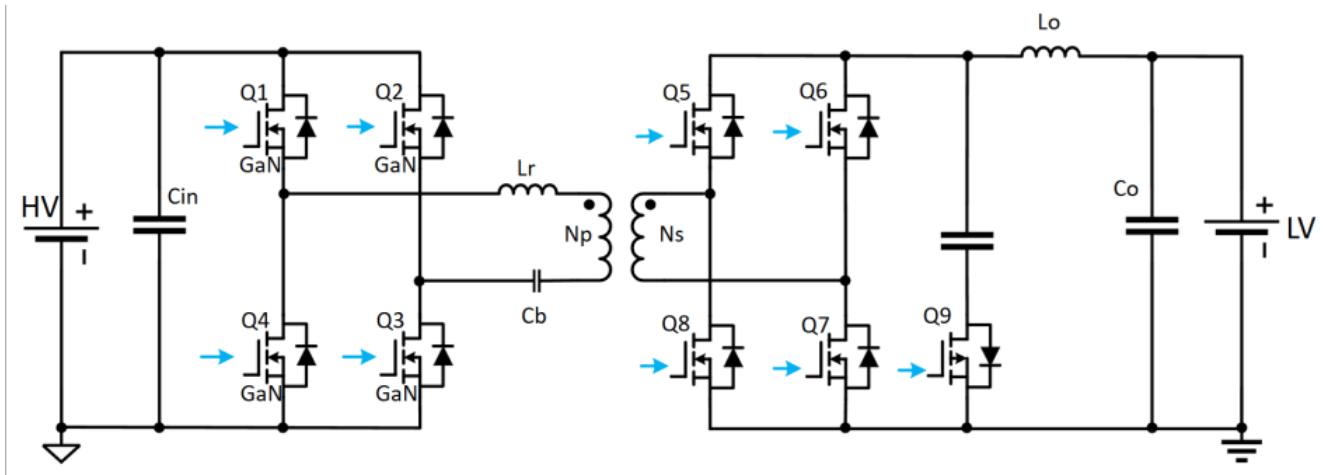


图 1. 适用于 PSFB 同步整流器 MOSFET 的传统有源钳位电路。来源：德州仪器 (TI)

在此原理图中，您可以看到 P 沟道金属氧化物半导体 (PMOS) Q9 和缓冲电容器，它们是有源钳位电路的主要组成部分。缓冲器电容器的一端连接到输出扼流圈，PMOS 的源极连接到地。在 PSFB 的传统有源钳位电路中，同

步整流器 MOSFET Q5 和 Q7 的电路结构相同，Q6 和 Q8 也是一样。每次同步整流器 MOSFET 关断后，PMOS 会在适当的延迟时间后导通。

图 2 显示了 PSFB 与有源钳位的控制方案。您可以很容易地发现 PMOS 的开关频率是 f_{sw} 的两倍。

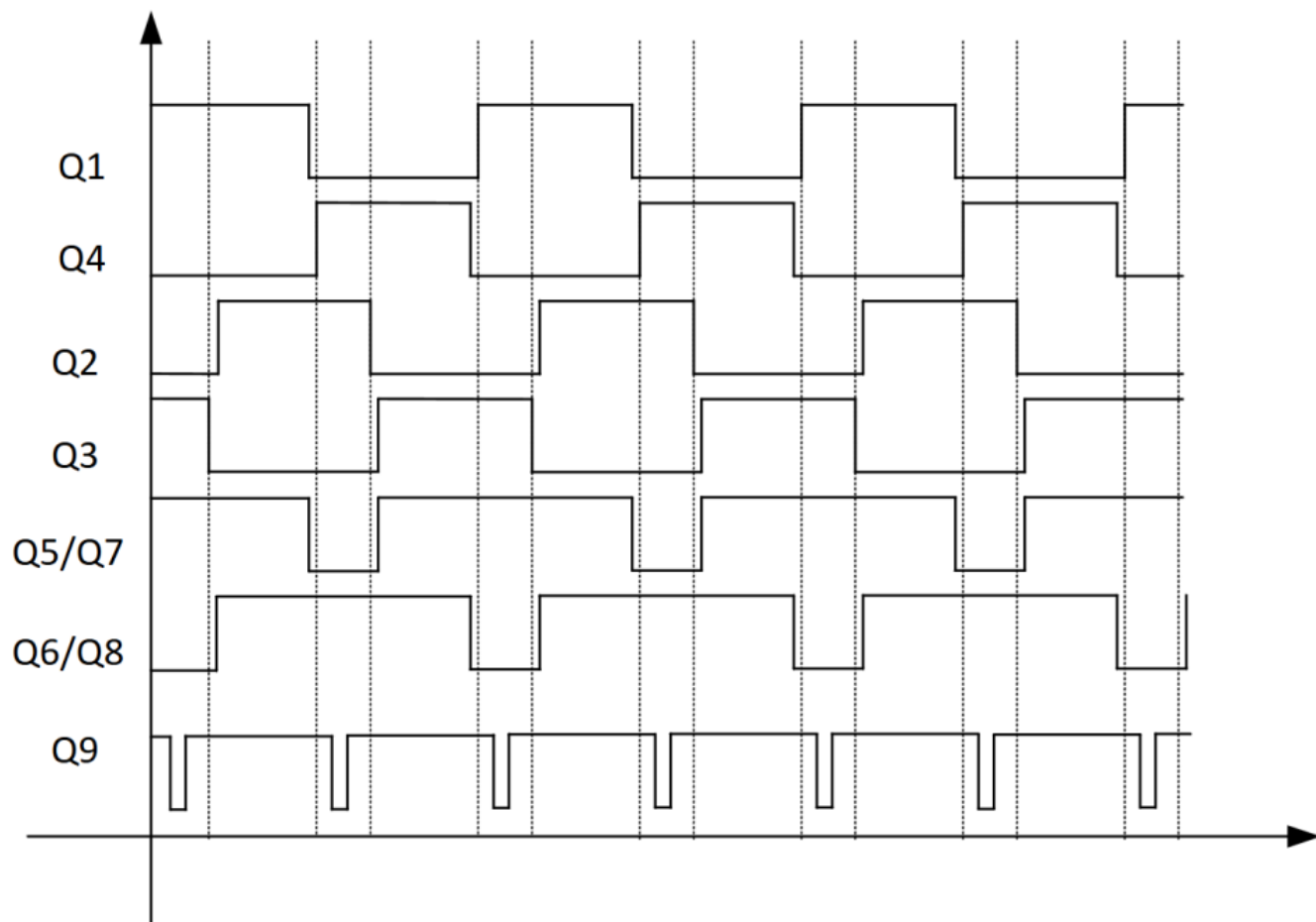


图 2. 有源钳位 PMOS Q9 的控制方案，其中 PMOS 的开关频率是 f_{sw} 的两倍。来源：德州仪器 (TI)

评估有源钳位的损耗

您可以使用公式 2、公式 3、公式 4、公式 5 和公式 6 来评估有源钳位 PMOS 的损耗。除了 P_{on_state} ，其它所有损耗都与 f_{sw} 成正比。当 PMOS 的开关频率加倍时，损耗也会加倍，因此就需要解决 PMOS 的散热问题。而当为了满足小型化的需求而进一步提高 f_{sw} 时，散热问题会变得更加严重。

$$P_{on_state} = I_{rms}^2 \times R_{dson} \quad (2)$$

$$P_{turn_on} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{on} \times t_{on} \times f_{sw} \quad (3)$$

$$P_{turn_off} = 0.5 \times V_{ds} \times I_{off} \times t_{off} \times f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{drive} = V_{drv} \times Q_g \times f_{sw} \quad (5)$$

$$P_{diode} = I_{snubber} \times V_{sd} \times t_d \times f_{sw} \quad (6)$$

建议的有源钳位

那么，要怎么解决呢？选择品质因数 (FOM) 更优的 PMOS，还是选择导热系数更高的导热硅脂？这两种办法都可行，但请记住，有源钳位产生的热量仍然集中在一个零件上，这使得问题难以解决。我们能否将这些热量分散到多个零件上？一种可行的方法是使用两个有源钳位电路，并将缓冲器电容器的端子连接到次级桥臂的开关节点，如图 3 所示。这样就可以在 Q5 和 Q7 关闭之后再导通 Q11，在 Q6 和 Q8 关闭之后再导通 Q10。图 4 显示了 PSFB 的控制方案和建议的有源钳位。

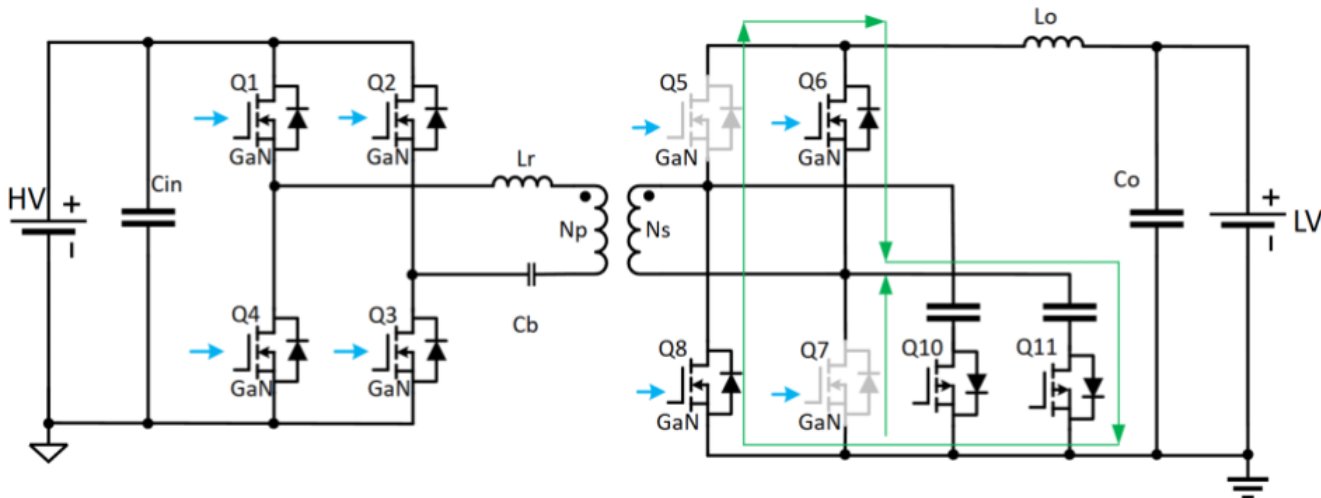


图 3. 适用于 PSFB 同步整流器 MOSFET 的建议有源钳位电路。来源：德州仪器 (TI)

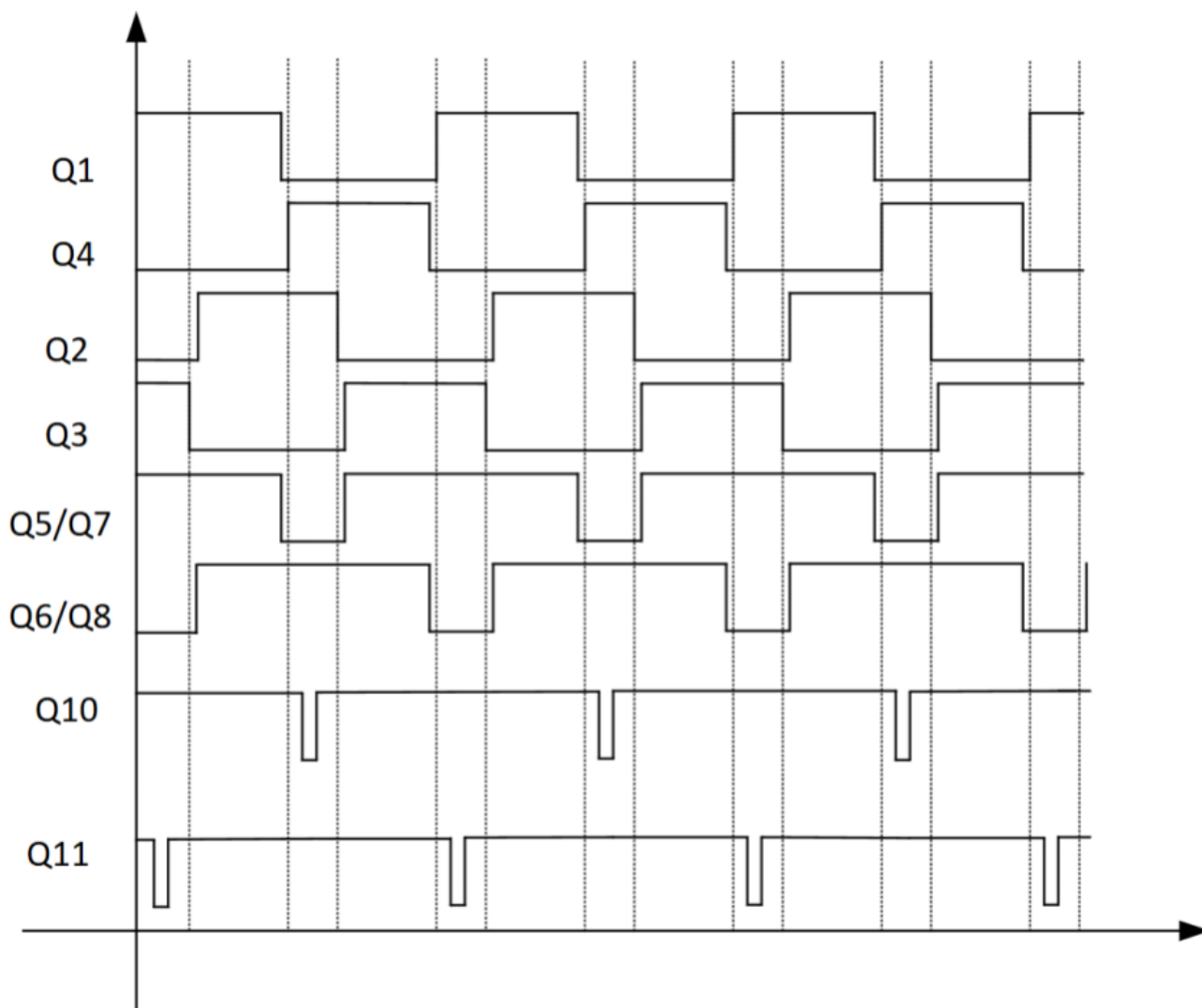


图 4. PSFB 的控制方案和建议的有源钳位。来源：德州仪器 (TI)

当 Q5 和 Q7 关闭时，Q6 和 Q8 仍然导通。因此，您可以找到 Q5 和 Q7 的钳位回路，如 图 3 中绿色箭头所示。Q10 和 Q11 的开关频率都是 f_{sw} ，而不是 f_{sw} 的两倍。

因此，根据公式 2、公式 3、公式 4、公式 5 和公式 6，每个 PMOS 的 P_{on_state} 将是原来的四分之一， P_{turn_on} 、 P_{turn_off} 、 P_{drive} 和 P_{diode} 将是原来的二分之一。显然，该方法将钳位电路的损耗分成了两部分甚至更少，使得解决散热问题更加容易。

让我们回到钳位回路上来。Q5 的环路比 Q7 更大；它与 Q6 和 Q8 类似。您需要注意同步整流器的布局，以便获得 Q5 和 Q6 的最小钳位环路。

建议的有源钳位性能

图 5 和 图 6 展示了来自德州仪器(TI) GaN HEMT 的高压转低压 DC/DC 转换器参考设计中的相关测试，该设计采用了建议在 200kHz 开关频率下工作的有源钳位电路。图 5 展示了整流器的电压应力。

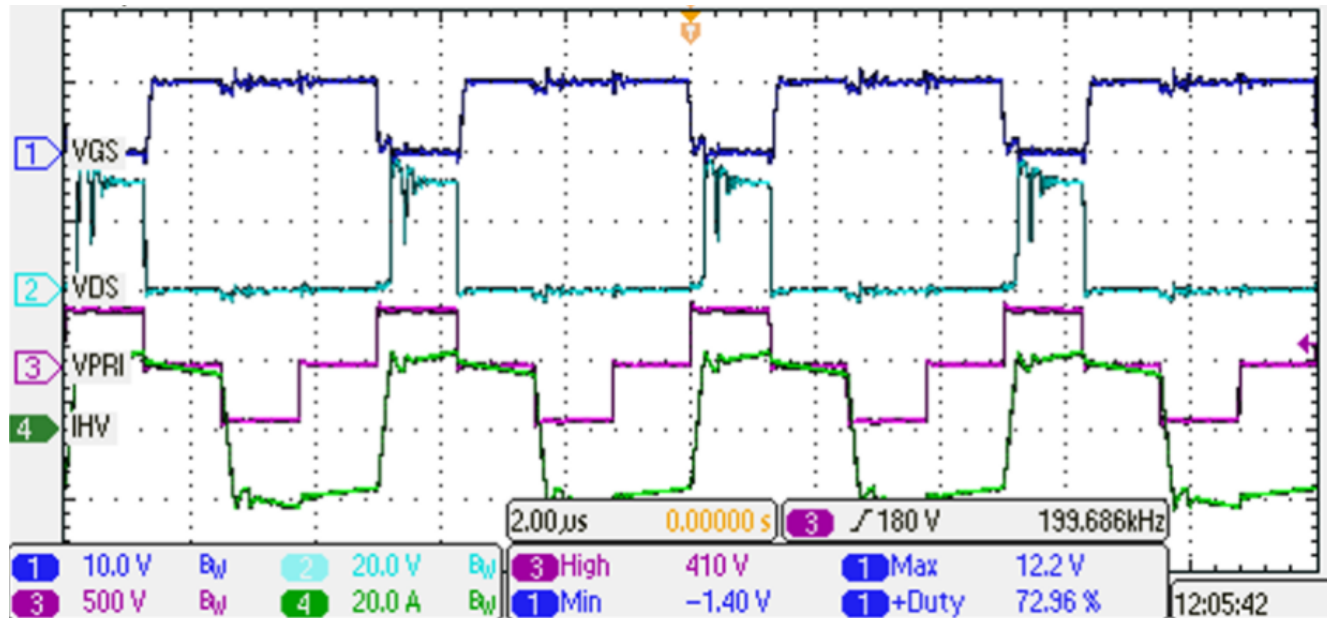


图 5. 整流器的电压应力，其中 CH1 是整流器的 V_{gs} ，CH2 是整流器的 V_{ds} ，CH3 是初级变压器绕组的电压，CH4 是初级变压器绕组的电流。来源：德州仪器 (TI)

CH1 是整流器的 V_{gs} ，CH2 是整流器的 V_{ds} ，CH3 是初级变压器绕组的电压，CH4 是初级变压器绕组的电流。当输入电压为 $400V_{IN}$ 、输出电压为 $13.5V_{OUT}$ 、输出电流为 $250A I_{OUT}$ 时，整流器的最大电压应力低于 $45V$ 。如图 6 中所示，在输入电压为 $400V_{IN}$ 、输出电压为 $13.5V_{OUT}$ 、输出电流为 $180A I_{OUT}$ [2] 时，有源钳位电路的最高温度为 $46.6^{\circ}C$ 。因此，建议的控制方案能为钳位用 MOSFET 提供非常良好的热性能。

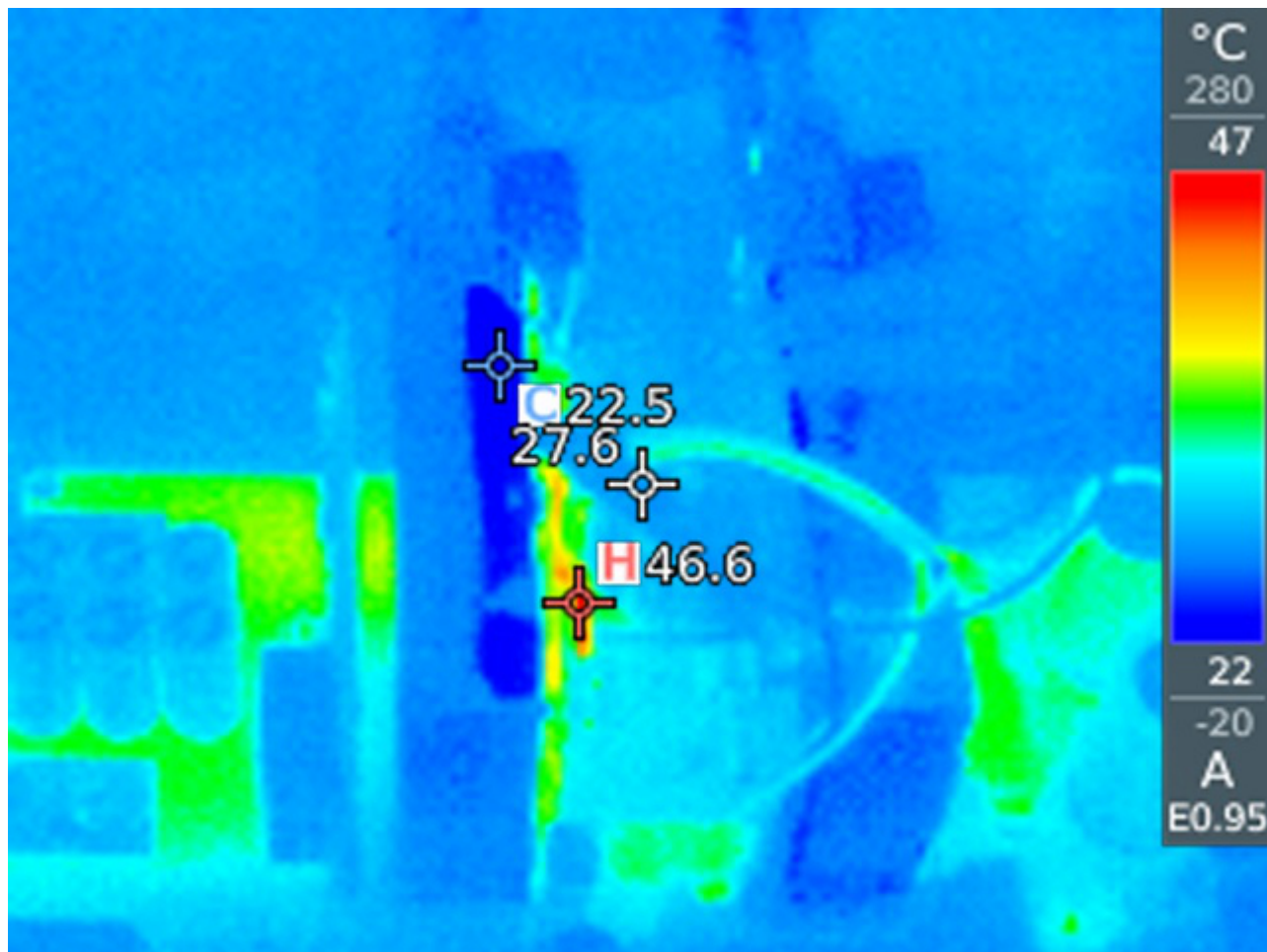


图 6. 有源钳位电路的热性能，其中在输入电压为 $400V_{IN}$ 、输出电压为 $13.5V_{OUT}$ 、输出电流为 $180A_{OUT}$ 时，有源钳位电路的最高温度为 $46.6^{\circ}C$ 。来源：德州仪器 (TI)

500kHz 有源钳位无热管理问题

当开关频率从 200kHz 提高到 500kHz 时，变压器体积将缩小约 45% [2]，这有助于提升高压转低压 DC/DC 转换器的功率密度。采用该建议方法后，BOM 成本会略有上升，但设计人员可以在 500kHz 的开关频率下运行有源钳位电路而不产生热问题，从而提升整体性能。鉴于 PMOS 的脉冲漏极电流远小于 NMOS，如有需要，设计人员也可以在有源钳位电路中使用带隔离驱动器和偏置电源的 NMOS。

相关内容

- 电源技巧 135：ESS 中的双向 CLLLC 谐振转换器的控制方案
- 电源技巧 134：别用复杂方式切换，可通过 PWM 全桥实现 ZVS
- 电源技巧 133：测量 TLVR 中的总漏电感，以优化性能
- 精密钳位可保护数据记录器
- 反向双极晶体管可兼作信号钳位器
- 高速钳位电路可用作脉冲成形电路

参考资料

1. John Betten. 2016. “电源设计小贴士：分七步计算 R-C 缓冲器。” TI E2E™ 设计支持论坛技术文章，发表于 2016 年 5 月。
2. “采用 GaN HEMT 的高压转低压 DC-DC 转换器参考设计。” 2024.德州仪器 (TI) 参考设计测试报告编号 PMP41078，文献编号 TIDT403A。访问日期：2024 年 12 月 16 日。

先前已发布于 EDN.com 上。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司