

## Application Note

## 如何在 800V 电池应用中使用 650V GaN



Daniel Gao, Forest Fu, Gustavo Martinez

## 摘要

针对汽车类高压 (HV) 转低压 (LV) DC/DC 应用，引入了基于相移全桥 (PSFB) 的堆叠半桥 (SHB) 电路和新控制方法。新的拓扑支持在 800V 电池系统中使用高频性能 650V 额定开关。借助特殊的控制方案，SHB-PSFB 可以在分离输入电容器上实现电压平衡，并使串联堆叠中的开关实现 ZVS 或足够的 ZVS，以维持所需的效率。本应用手册讨论了详细的工作原理和实验结果。

## 内容

1 简介.....	2
2 初级侧的 SHB 拓扑.....	4
3 次级侧的 SHB 拓扑.....	13
4 测试结果.....	14
5 总结.....	17
6 参考资料.....	17
7 首字母缩写词.....	17

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在 EV 应用中，越来越多的汽车供应商使用 800V 电池。在高压电池侧，客户往往使用 1200V 功率开关，与 650V 功率开关相比，这种开关具有高成本、高  $R_{dson}$  和较差的高频性能。是否有办法在 800V 电池应用中使用 650V 开关？

三级 (TL) 拓扑是能够在 800V 电池系统中使用 650V 开关器件的候选方案之一。在 I 型 TL 拓扑中，如 图 1-1 和 图 1-2 所示。无论是非隔离式还是隔离式场景，主要器件均为四个串联的开关和两个钳位二极管。以隔离式 TL 为例，磁性元件的一个端子连接到四个开关的中间，另一个端子连接到两个串联输入电容器的中间。控制方案是在第一模式下，开关 Q1 和 Q2 导通，而开关 Q3 和 Q4 关断。在开关 Q1 和 Q2 关断后，下一个模式开关 Q3 和 Q4 导通。这两种模式会交替重复。

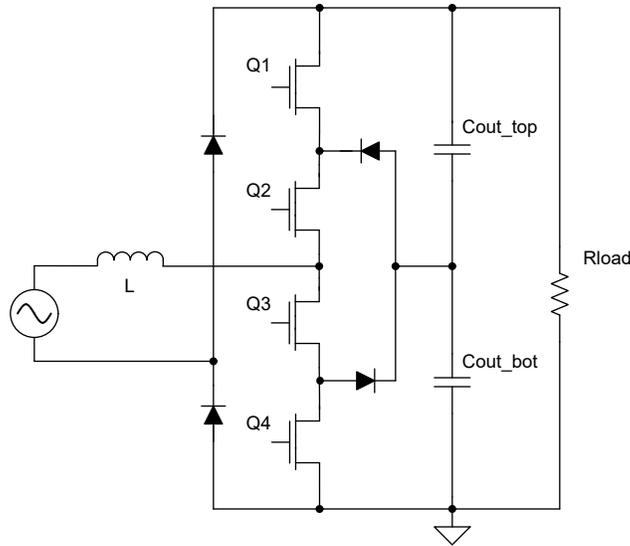


图 1-1. 非隔离式 TL 拓扑

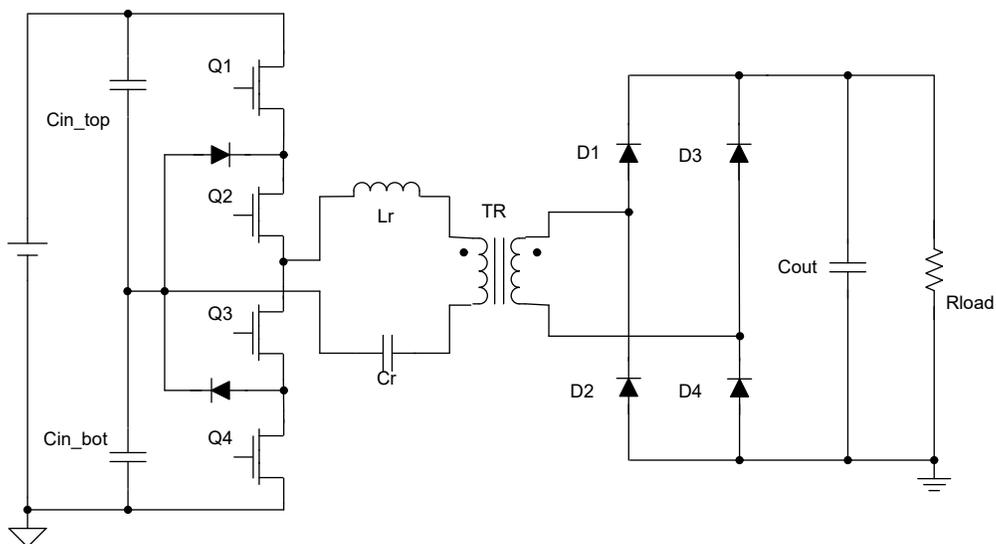


图 1-2. 隔离式 TL 拓扑

堆叠半桥 (SHB) 是另一种选择。如 [图 1-3](#) 所示，TL 和 SHB 之间存在许多差异。对于 SHB，主要元件是四个串联开关和一个高额定电压的 DC 阻断电容器。磁性元件的一个端子连接到上部两个开关的中间。另一个端子连接到下部两个开关的中间。控制方案也与 TL 拓扑的控制方案不同。

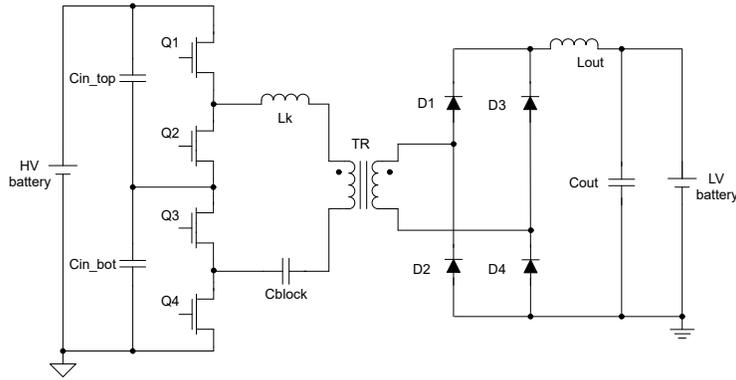


图 1-3. SHB 拓扑

在高压转低压直流/直流转换器 (DCDC) 和 OBC 应用中，与 TL 拓扑相比，SHB 没有钳位二极管，这会导致高功率密度。本主题专门介绍 SHB 拓扑。

## 2 初级侧的 SHB 拓扑

如 图 2-1 所示，在  $t_0$  到  $t_1$  级，当开关 Q2 和 Q3 关断时，开关 Q1 和 Q4 可以一起导通，电流如蓝色箭头所示。在  $t_3$  到  $t_4$  级，开关 Q2 和 Q3 可以在开关 Q1 和 Q4 关断后导通。绿色箭头表示电流。在  $t_1$  到  $t_2$  和  $t_3$  到  $t_4$  级，所有 MOSFET 都关断，电流为零。

使用上述控制方案时， $I_{mid}$  为零。这意味着顶部电容器和底部电容器可以同时充电和放电，两个输入电容器的中间电压是输入电压的一半。该控制方案专为硬开关半桥 (HSFB)、LLC 和单相移双有源电桥 (SPSDAB) 而设计，但不适用于相移半桥 (PSFB)。事实证明，相移控制要复杂得多。以下章节对此进行了更详细的说明。

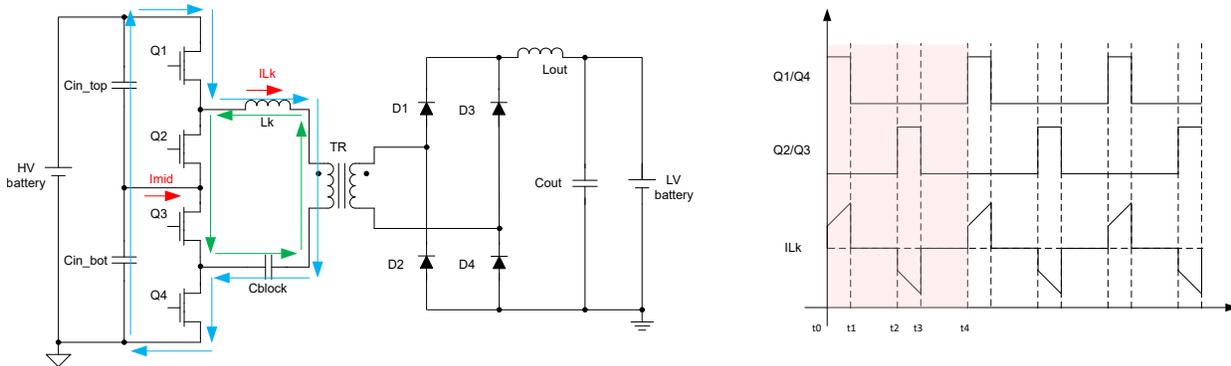


图 2-1. SHB 拓扑和控制方案

图 2-2 显示了 HSFB SHB 控制的 Simplis 仿真结果。 $V_{mid}$  是输入串联电容器的中间电压， $I_{mid}$  是进出中点的电流。 $I_{mid}$  在整个时间段内保持为零，因此这里不存在中电压平衡问题 (MVBI)。确保阻断电容器上的 DC 偏置电压为输入电压的一半。

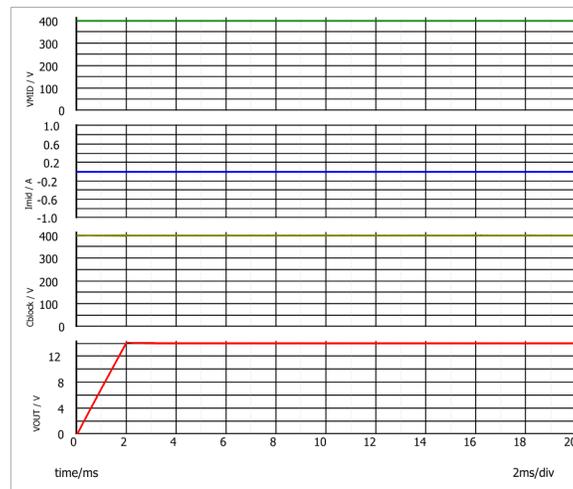


图 2-2. HSFB SHB 控制的仿真结果

如 图 2-3 所示，使用原始 PSFB 控制方案时，两个串联输入电容器的中间电压可能不平衡，这意味着每个输入电容器的电压不是  $V_{in}/2$ 。主要原因是初级侧的循环电流，它会导致其中一个电容器持续放电，而另一个电容器则处于平衡状态。

这里，上部两个开关的电压应力取决于上部电容器。下部两个开关的电压应力取决于下部电容器。

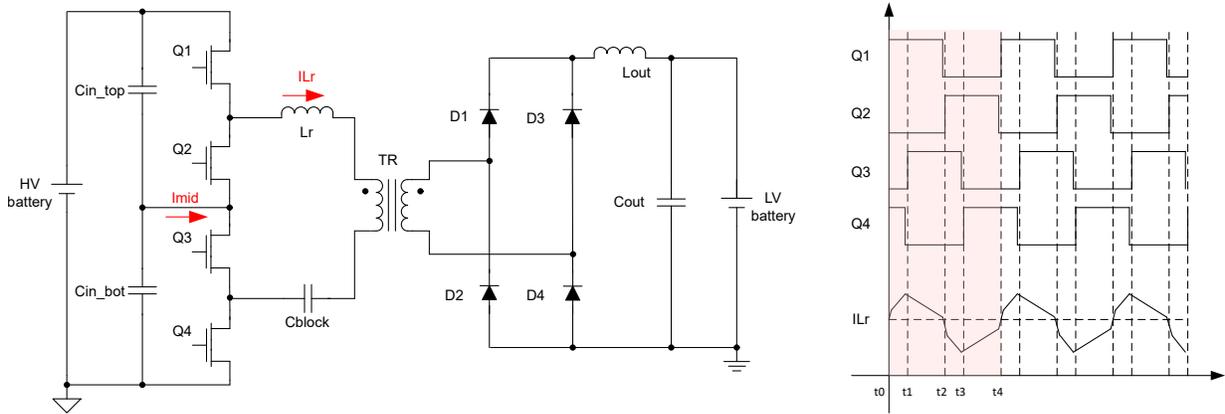


图 2-3. 具有原始控制的 PSFB SHB 控制

根据图 2-4 中显示的仿真结果，在稳态下， $V_{mid}$  最终可以达到一个稳定的值。稳定值取决于负载。负载越重， $C_{in\_top}$  和  $C_{in\_bot}$  的电压振动就越大。在 OCP 或短路等特定瞬态条件下，中间电压可能会变得非常大（或非常小），从而导致开关故障。这就是为什么用户必须注意 MVBI。

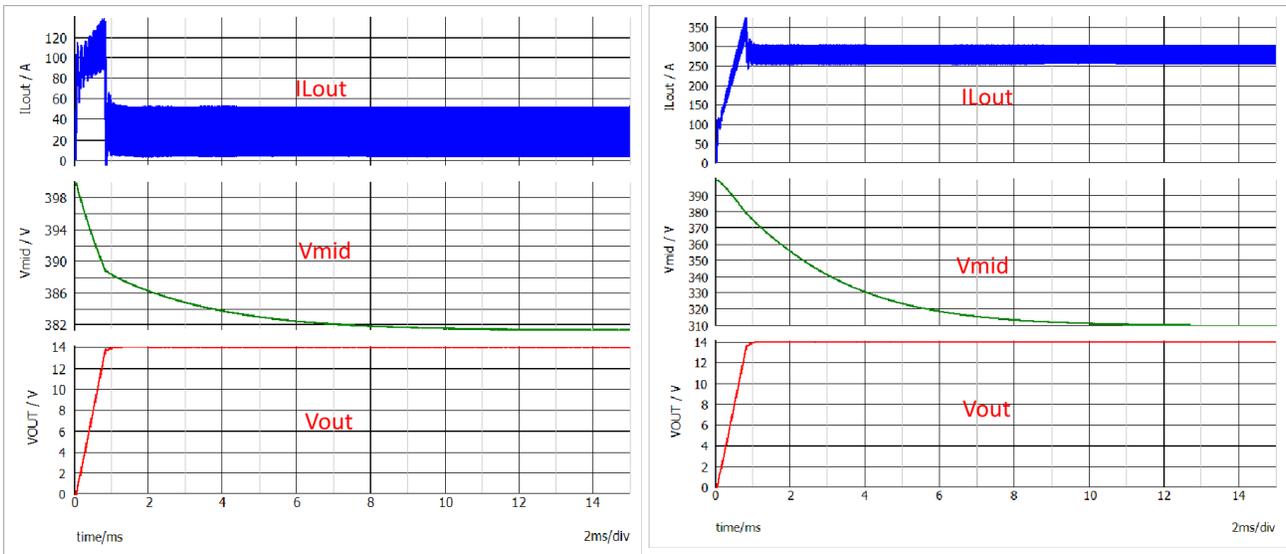


图 2-4. 采用原始控制的 PSFB SHB 的仿真结果

图 2-5 和图 2-9 显示了中电压平衡问题的根本原因。

在  $T_0$  到  $T_1$  级， $Q_1$  和  $Q_4$  导通， $Q_2$  和  $Q_3$  关断，电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出  $I_{mid}$ 。 $C_{in\_top}$  和  $C_{in\_bot}$  正在放电。

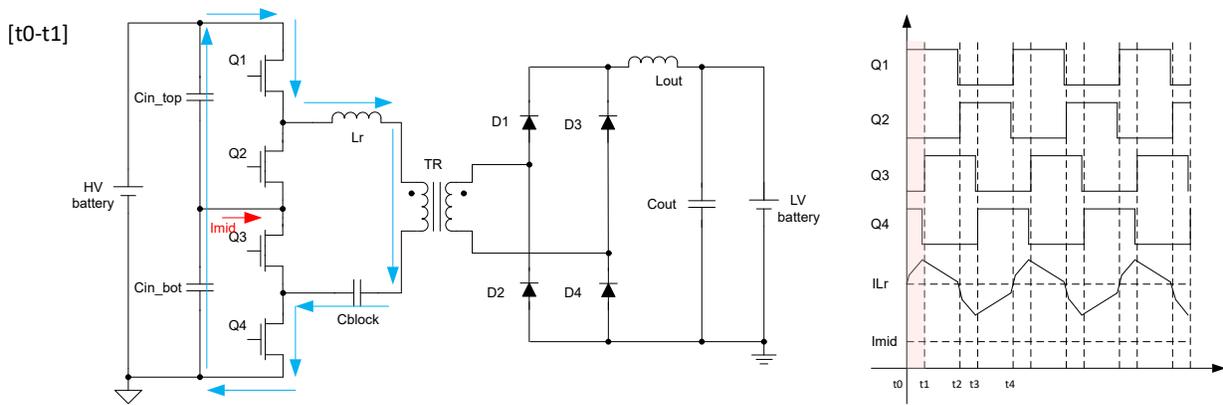


图 2-5. 具有原始控制的 PSFB SHB 的级 ( T0、T1 )

在 T1 到 T2 级，Q1 和 Q2 导通，Q3 和 Q4 关断，电流路径如蓝色箭头所示。出现负 I<sub>mid</sub>。Cin<sub>top</sub> 仍在放电。

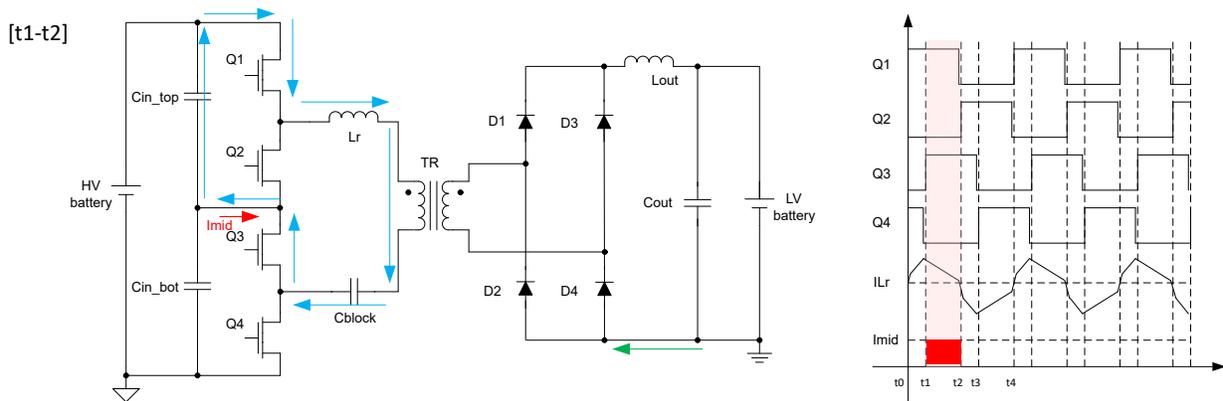


图 2-6. 具有原始控制的 PSFB SHB 的级 ( T1、T2 )

在 T2 到 T3 级，Q2 和 Q3 导通，Q1 和 Q4 关断时，电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出 I<sub>mid</sub>。

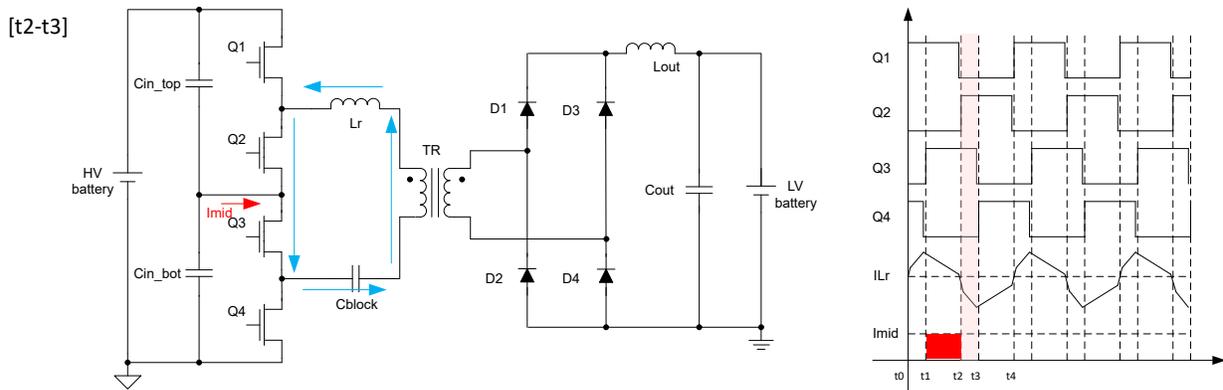


图 2-7. 具有原始控制的 PSFB SHB 的级 ( T2、T3 )

在 T3 到 T4 级，Q2 和 Q4 导通，Q1 和 Q3 关断，电流路径如蓝色箭头所示。再次出现负  $I_{mid}$ 。Cin\_bot 正在充电。

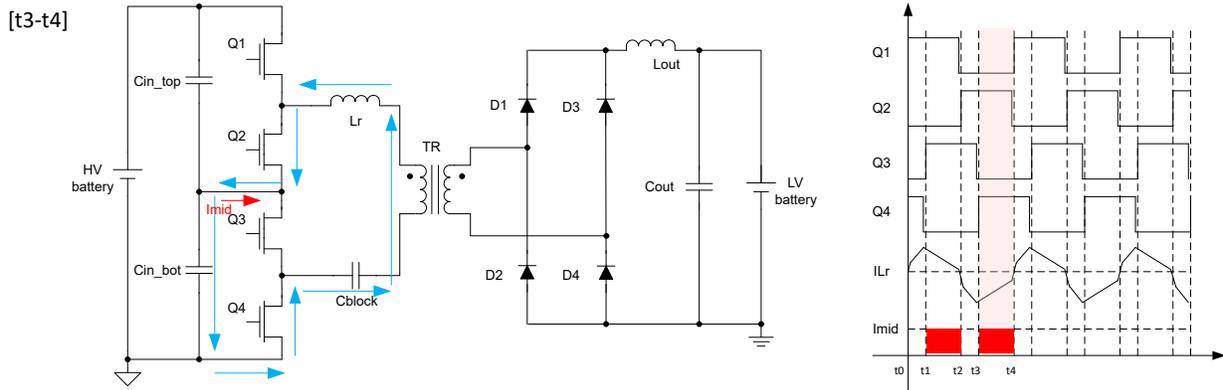


图 2-8. 具有原始控制的 PSFB SHB 的级 ( T3、 T4 )

$I_{mid}$  在四个级保持相同的方向，这导致 Cin\_top 始终放电，而 Cin\_bot 每周期充电和放电一次。因此，会发生中间电压平衡问题。可以使用 方程式 1 计算振动电压。这与  $I_{out}$  成正比。

$$V_{bri} = (2 \times L_r \times ((I_{out} + 0.5 \times \Delta I_L) / N_{ps})) / T_{off} \quad (1)$$

其中： $T_{off}$  是半个周期内的循环电流时间。

$N_{ps}$  为变压器的匝数比

$\Delta I_L$  是输出扼流圈的纹波电流

根本原因与循环电流有关。如何解决此问题？基本思路是能量流入或流出 Cin\_top 或 Cin\_bot 可以等效。这意味着我们需要在一个切换周期中和  $I_{mid}$ 。

如 图 2-9 所示，提出了一个可行的计划。在标有粉色的前半周期中， $I_{mid}$  可以流过 Cin\_top 两次，而在另半个标有蓝色的周期中， $I_{mid}$  也可以流过 Cin\_bot 两次。在每半个周期中， $I_{mid}$  的方向可以反转，Cin\_top 或 Cin\_bot 可以充电一次并放电一次。因此，输入电容器的中间电压是平衡的。

以下各显示了从 图 2-9 到 图 2-17 的每个步骤的详细信息。

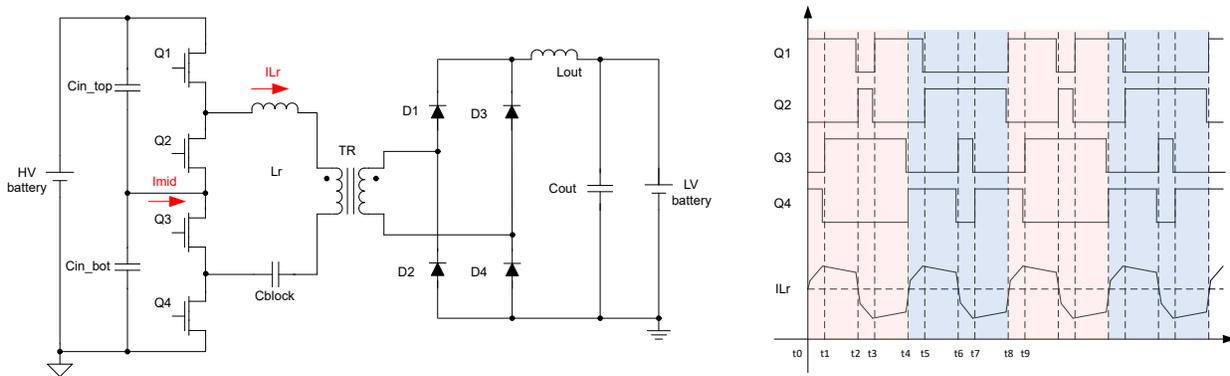


图 2-9. 具有建议控制的 PSFB SHB

在 T0 到 T1 级，Q1 和 Q4 导通，Q2 和 Q3 关断。电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出  $I_{mid}$ 。  
 $C_{in\_top}$  和  $C_{in\_bot}$  正在放电。

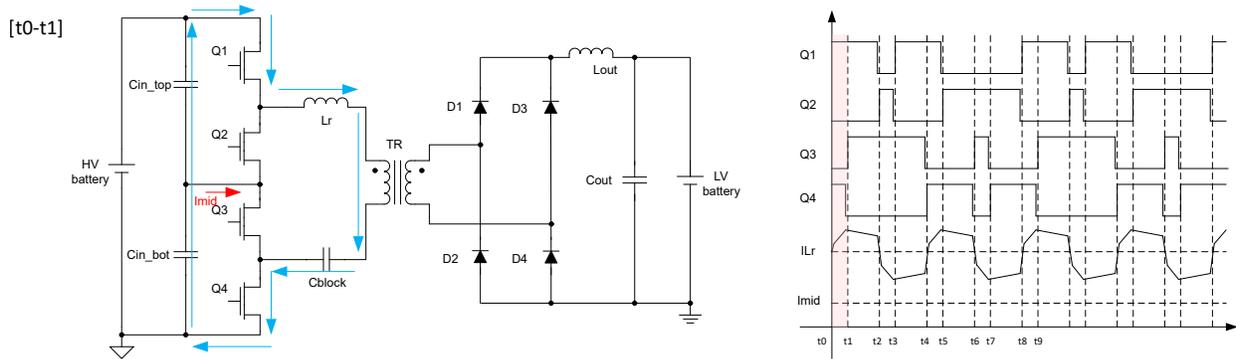


图 2-10. 具有建议控制的 PSFB 的级 ( T0、T1 )

在 T1 到 T2 级，Q1 和 Q2 导通，Q3 和 Q4 关断，电流路径如蓝色箭头所示。出现负  $I_{mid}$ 。 $C_{in\_top}$  仍在放电。

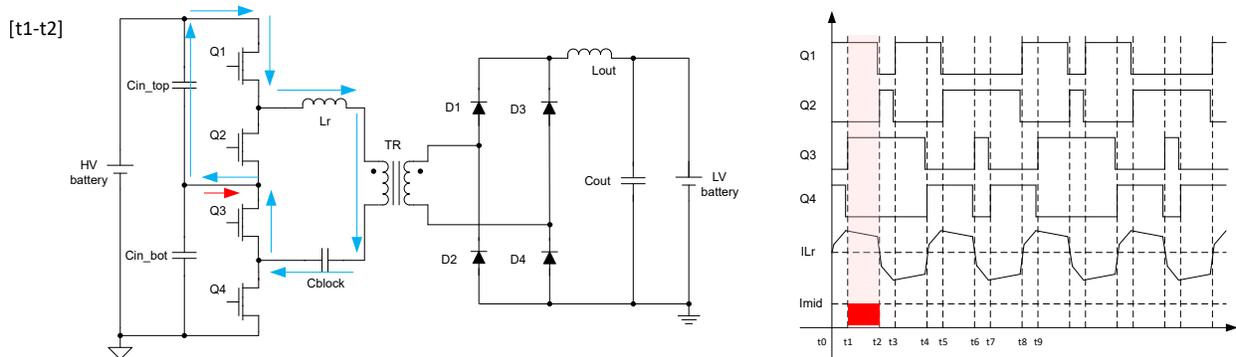


图 2-11. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T1、T2 )

在 T2 到 T3 级，Q2 和 Q3 导通，Q1 和 Q4 关断，电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出  $I_{mid}$ 。

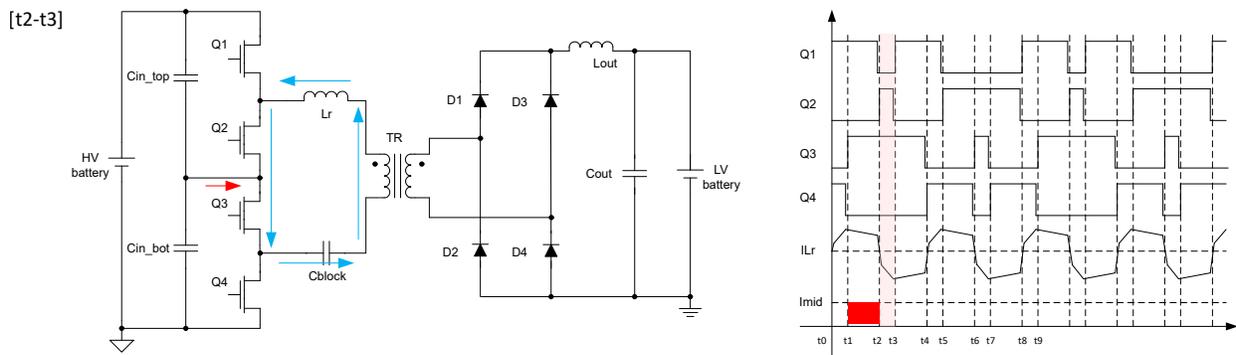


图 2-12. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T2、T3 )

在 T3 到 T4 级，Q2 和 Q4 导通，Q1 和 Q3 关断，电流路径如蓝色箭头所示。正  $I_{mid}$ 。Cin\_top 正在充电。

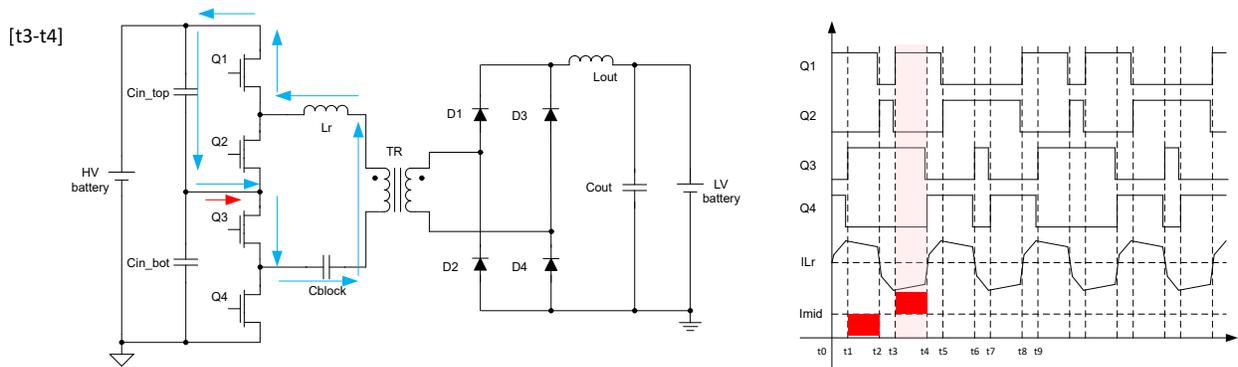


图 2-13. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T3 到 T4 )

在前半个周期中， $I_{mid}$  可以在反向方向上通过  $C_{in\_top}$  流动两次，因此  $C_{in\_top}$  的电压与原始值保持相似。

在 T4 到 T5 级，Q1 和 Q4 导通，Q2 和 Q3 关断，电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出  $I_{mid}$ 。 $C_{in\_top}$  和  $C_{in\_bot}$  正在放电。

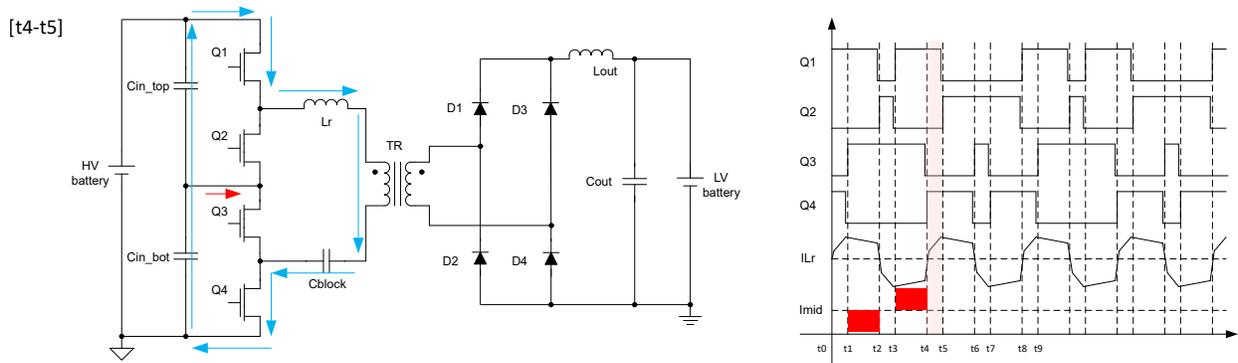


图 2-14. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T4、T5 )

在 T5 到 T6 级，Q2 和 Q4 导通，Q1 和 Q3 关断，电流路径如蓝色箭头所示。发生正  $I_{mid}$ 。 $C_{in\_bot}$  仍在放电。

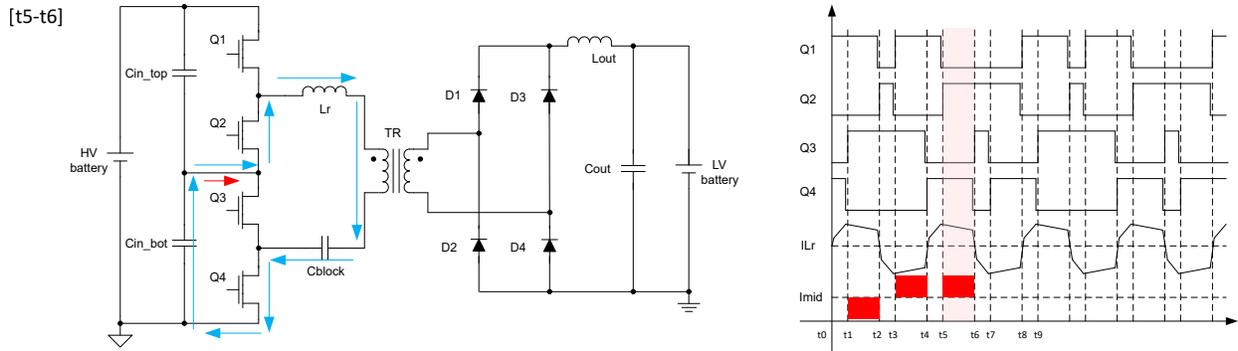


图 2-15. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T5、 T6 )

在 T6 到 T7 级，Q2 和 Q3 导通，Q1 和 Q4 关断，电流路径如蓝色箭头所示。电流不能流入或流出 Imid。

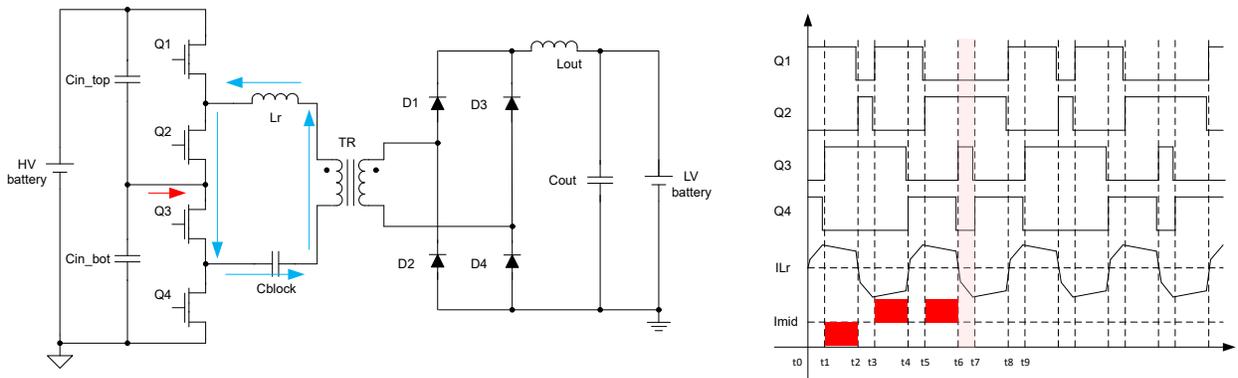


图 2-16. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T6、 T7 )

在 T7 到 T8 级，Q2 和 Q4 导通，Q1 和 Q3 关断，电流路径如蓝色箭头所示。负 Imid。Cin\_bot 正在充电。

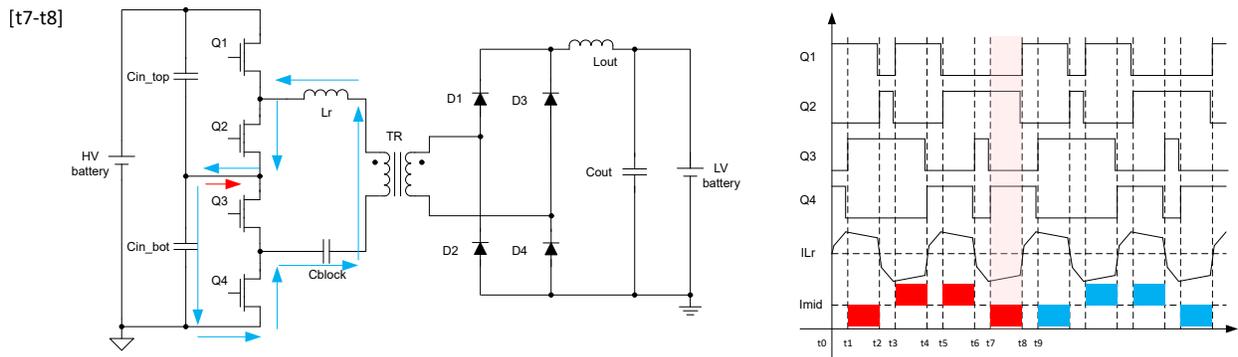


图 2-17. 具有建议控制的 PSFB SHB 的级 ( T7、 T8 )

在后半周期，Imid 还可以在反向方向上流经 Cin\_bot 两次，因此 Cin\_bot 的电压保持  $V_{in}/2$ 。

采用该设计时，可解决中间电压平衡问题。但 PWM 相当复杂，这在一个周期中需要两个脉冲。大多数 MCU 器件无法做到这一点。TI 的新一代 C2000 器件提出了 5 型 ePWM 特性，该特性具有八个扩展比较寄存器。不会在单个 PWM 周期内生成单个脉冲，而是可以在单个 PWM 周期内生成最多四个脉冲。

请注意，并非所有 C2000 器件都支持 5 型特性。5 型中只能使用向上计数模式。本应用手册使用 F28P65X 系列。

图 2-18 提供了在一个 PWM 周期内生成两个脉冲的示例。通过将 XCMP1-4 分配给 CMPA 并将 XCMP5-8 分配给 CMPB，用户可以在一个 PWM 周期内获得两个具有两个脉冲的独立 PWM。

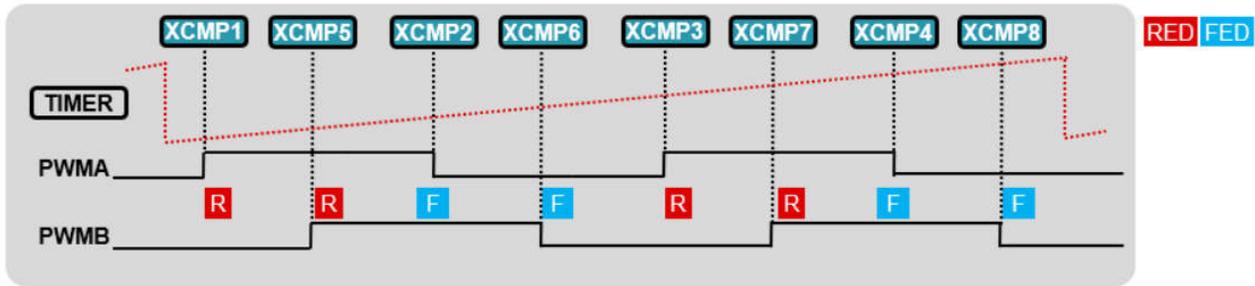


图 2-18. 使用 5 类在一个周期内生成两个脉冲

PMP41139 设计的开关频率为 200kHz，但时基时钟 (TBCLK) 可以设置为 100kHz，因为谐振回路中的电流可以循环两次。图 2-19 显示了建议的控制方案的 5 类 ePWM 配置。

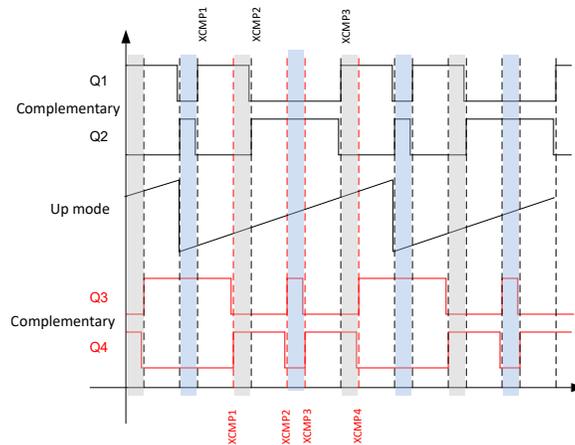


图 2-19. 具有建议控制的 PSFB SHB 的 5 类 EPWM 设置

Q1 和 Q2 是互补的；将 XCMP1-3 设置为 Q1。

Q3 和 Q4 是互补的；将 XCMP1-4 设置为 Q3。

使用 5 型时，必须更新 PWM 的几个 XCMP 值。是否有简单的方法可以实现相同的 PWM？是否可以使用 4 型？

答案是肯定的。粉色区域和蓝色区域具有轴对称性，如图 2-20 所示。在粉色区域，只需设置 CMPA 和 CMPB 即可获得 Q1，在蓝色区域，则需交换 CMPA 和 CMPB 值才能获得 Q1。

在 PMP41139 中，使用此方法输出所需的 PWM。

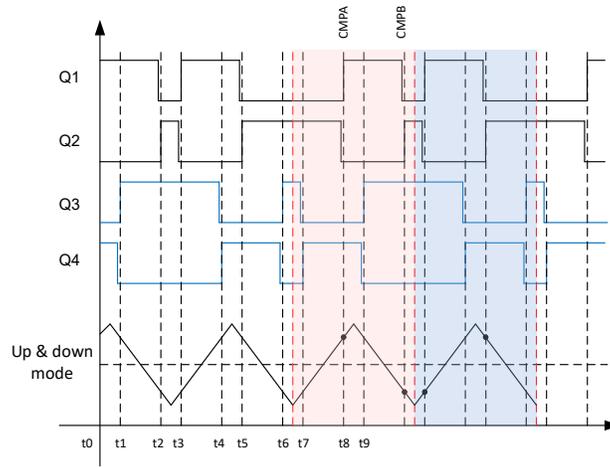


图 2-20. 具有建议控制的 PSFB SHB 的 4 类 EPWM 设置

### 3 次级侧的 SHB 拓扑

前面提到的 SHB 设计位于初级侧。这也可以移至次级侧。主要元件、连接和控制方案与初级侧相同，没有相移。

图 3-1 显示了在 CLLLC 拓扑中使用 SHB 作为同步整流器的示例。Q5 和 Q8 一起导通，Q6 和 Q7 一起导通。没有  $I_{mid}$  电流，也没有中电压平衡问题。

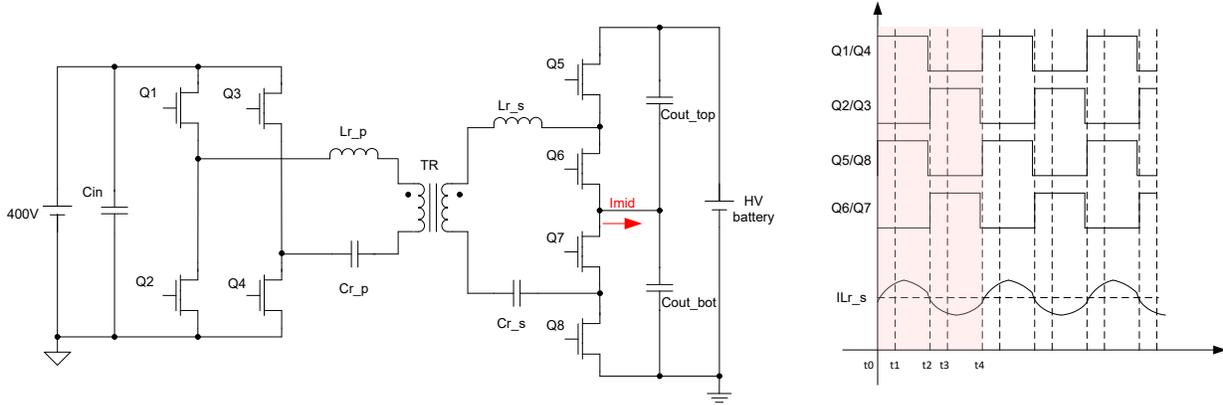


图 3-1. 次级侧和控制方案中的 SHB 拓扑

图 3-2 中的仿真结果证明了之前的观点。

- 红色：输出电压
- 绿色：中电压
- 蓝色：谐振电容器的电压

请注意，谐振电容器上存在  $\frac{1}{2} V_{out}$  DC 偏置电压。

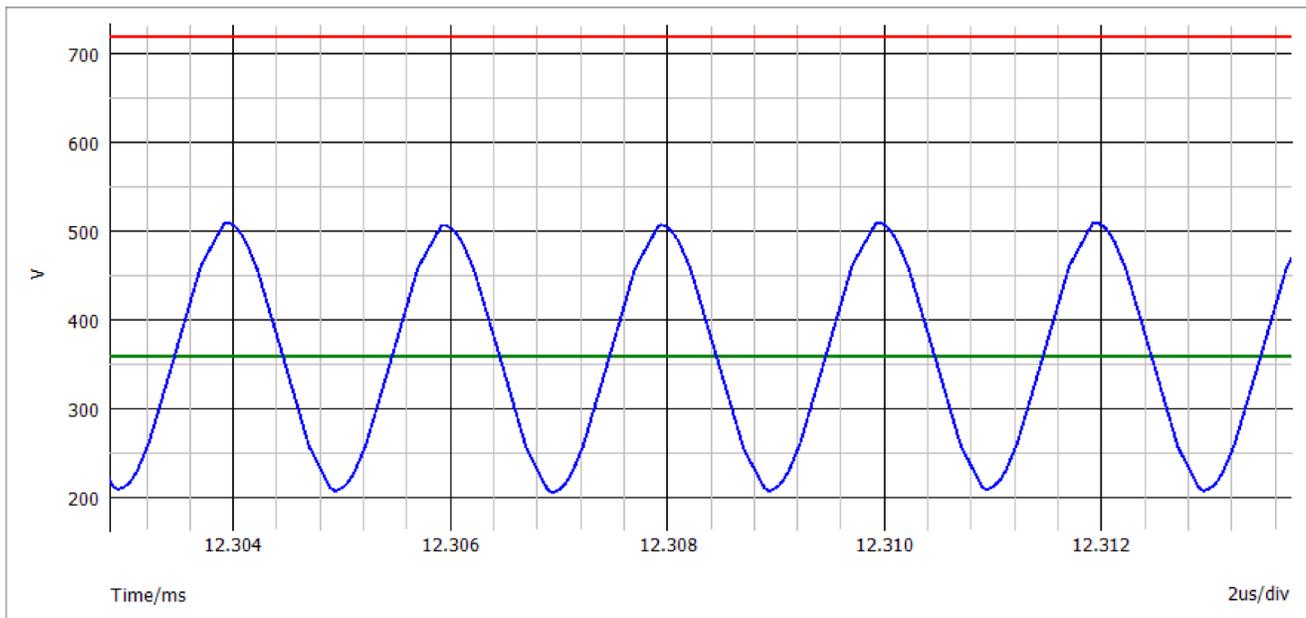


图 3-2. CLLLC SHB SR 控制的仿真结果

## 4 测试结果

PMP41139 是一种汽车级 3.5kW 800V 到 14V DC/DC 转换器参考设计，其中使用了额定电压为 650V 的 GaN 器件 LMG3522R030-Q1 作为初级开关 Q1 到 Q4，如 图 4-1 所示。输入电压范围为 400V 到 900V。表 4-1 显示具有或不具有建议控制的差分值。测试条件为 400V<sub>in</sub>、13.5V<sub>out</sub>、100A 负载。使用建议的控制，电压不平衡从 28V 降至 2V。中电压平衡问题的改进如 图 4-2 所示。

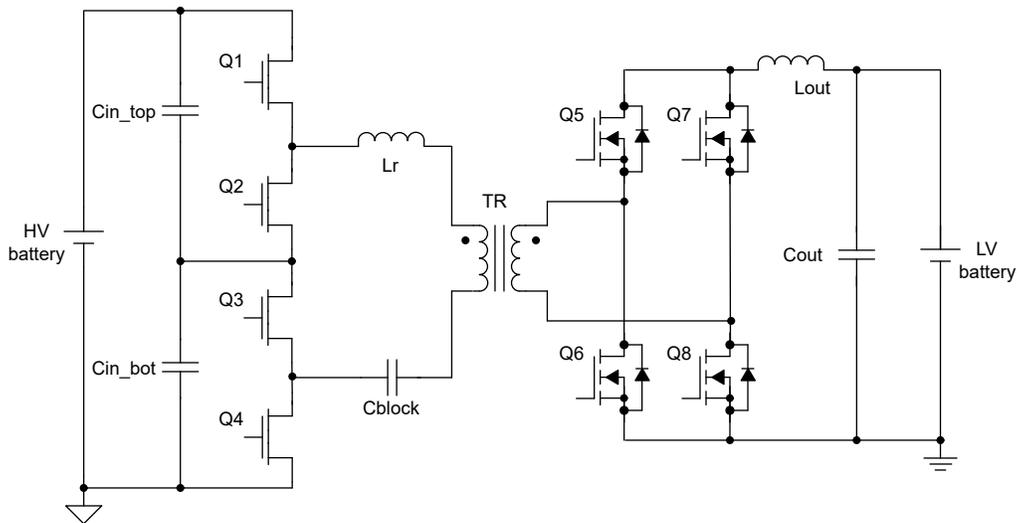


图 4-1. PMP41139 原理图

表 4-1. 具有或不具有建议的控制功能时，Cin\_top 和 Cin\_bot 之间的差分值

控制机制实现高效率	VCin_top	VCin_bot	VCap_diff
没有建议的控制	218V	190V	28V
使用建议的控制措施	204V	202V	2V

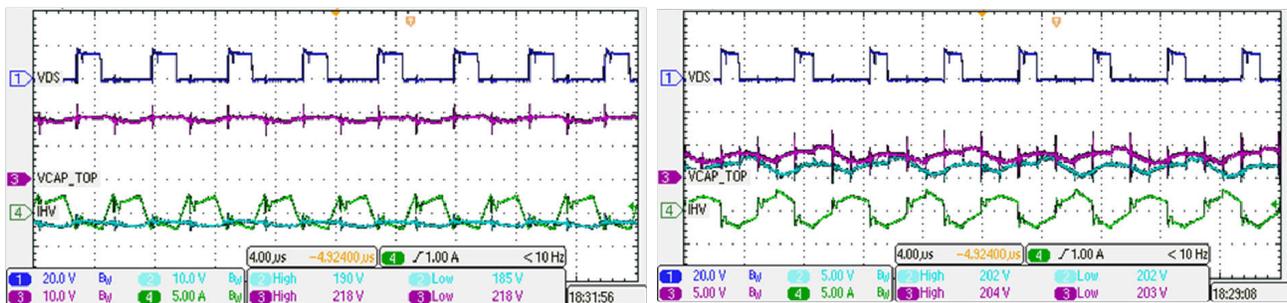


图 4-2. 具有或不具有建议控制的 PSFB SHB 的波形

- CH1 : Q5 的 Vgs
- CH2 : VCin\_bot
- CH3 : VCin\_top
- CH4 : PSFB 谐振回路的电流

Cin 在不同 Vin 和负载下的中间电压，如 图 4-3 所示。结果表明，中间电压接近输入电压的一半，最大偏差不超过 5V。

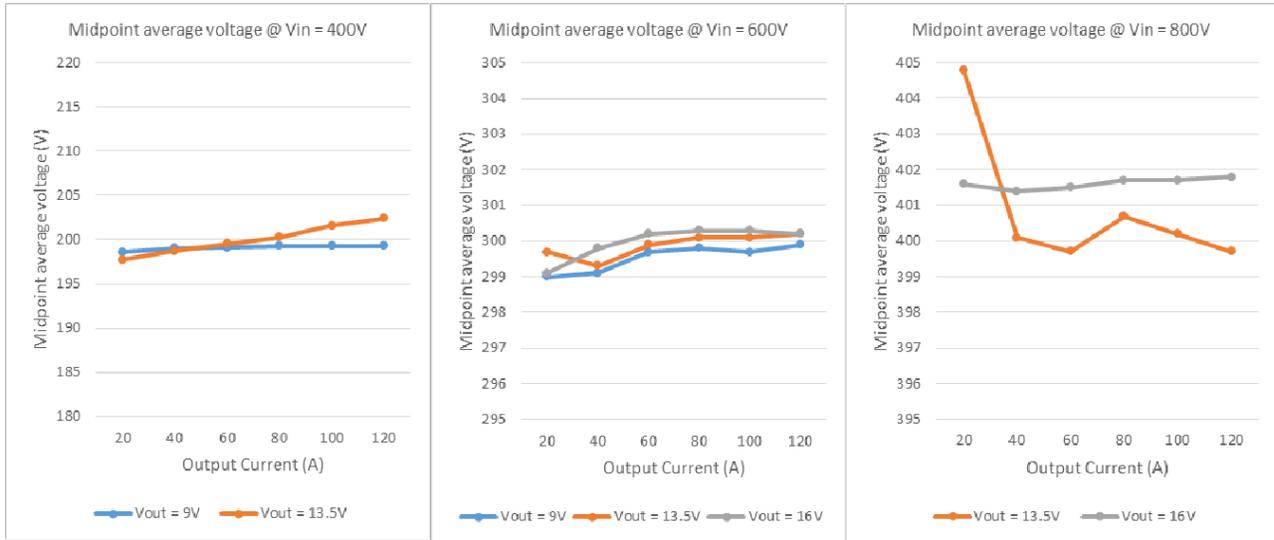


图 4-3. 不同 VIN 下中间电压与负载间的关系

PMP23461 是 400V 到 800V CLLLC 转换器参考设计，其中额定电压为 650V 的 GaN 器件 LMG3522R030-Q1 用作次级开关 Q5 到 Q8，如 图 4-1 所示。输出电压范围为 400V 到 900V。表 4-2 显示 Cout\_top 和 Cout\_bot 在不同 Vin 和负载下的电压。从理论上分析，CLLLC 拓扑没有中电压平衡问题。在低输出电压下测试的结果显示，即使没有平衡控制，中点电压偏差也是在 5V 下，如 图 4-5 和 表 4-2 所示。存在的偏差主要是由于 SHB 顶部两个开关和底部两个开关的布局不对称造成的。

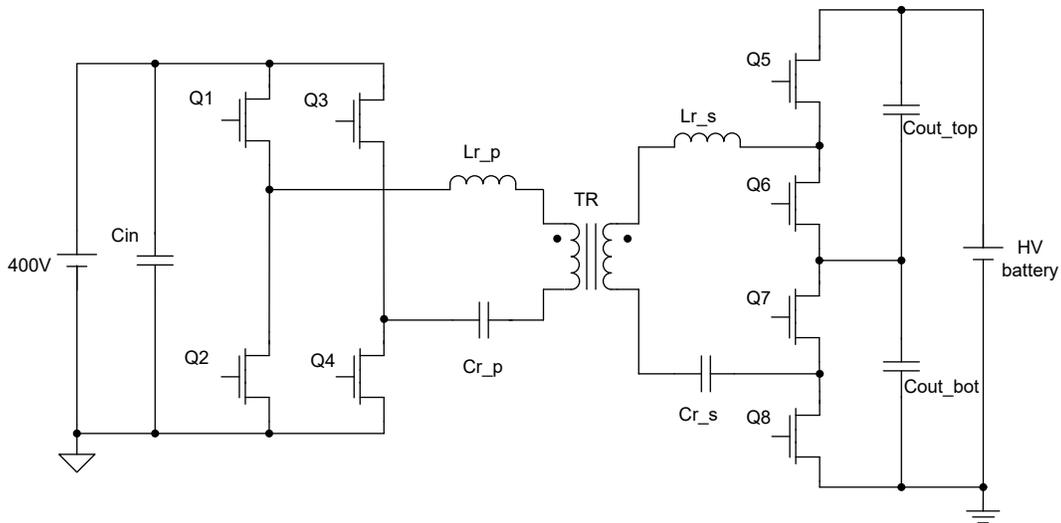


图 4-4. PMP23461 原理图

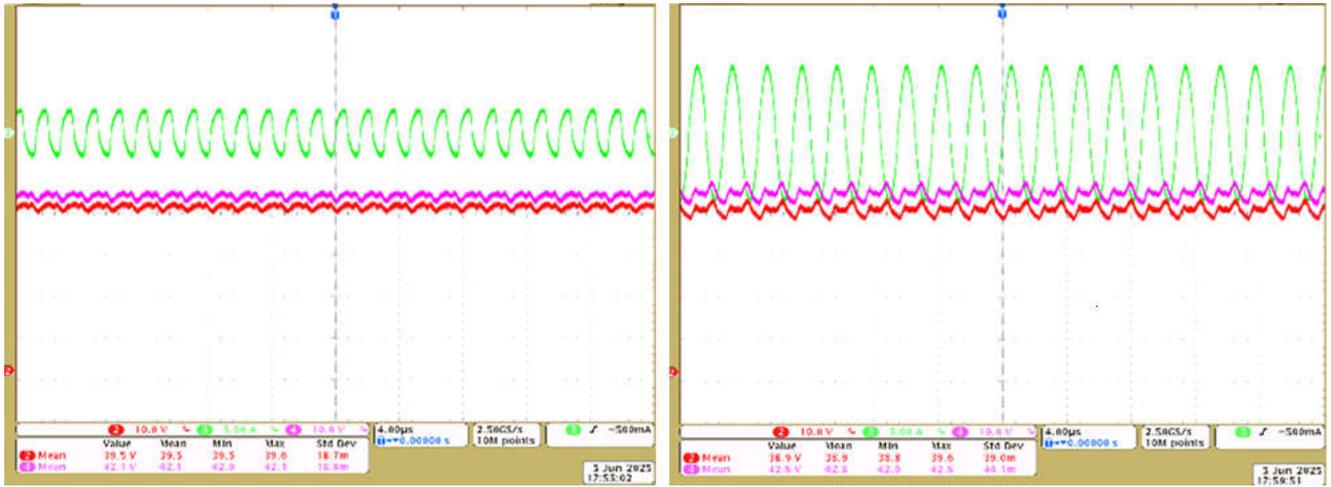


图 4-5. 不同负载条件下的 CLLC SHB SR 波形

表 4-2. 不同 Vin 和负载下的 Cout 电压

	Vin=50V Vout=80V/1A	Vin=50V Vout=80V/2A	Vin=50V Vout=80V/3A	Vin=100V Vout=170V/1A	Vin=100V Vout=170V/2A	Vin=100V Vout=170V/3A
VCout_top	39.5V	38.9V	38.9V	84.5V	85.8V	85V
VCout_bot	42V	42.8V	42.8V	89.6V	88.5V	89.4V

## 5 总结

如前几节所述，与 TL 拓扑相比，SHB 拓扑具有更高的功率密度。无论是在初级侧用作开关，还是在次级侧用作同步整流器，堆叠半桥拓扑均可充分弥补在 800V 电池应用中使用 650V GaN HEMT LMG3522R030-Q1 所需的间隙。C2000 器件的 5 型 ePWM 模块可满足 SHB 拓扑的特殊 PWM 要求。测试结果表明，在 800V 场景下，SHB 同样具备高效率与优异的负载瞬态性能，其表现与 PMP41078 中，原始拓扑在 400V 场景下的性能相当，这有助于推动该技术从隔离型应用拓展至非隔离型应用。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [PMP41139 3.5kW, 800V 至 14V DC/DC 转换器参考设计](#) 设计指南。
- 德州仪器 (TI), [PMP41078 采用 GaN HEMT 的高压转低压 DC-DC 转换器参考设计](#) 测试报告。
- 德州仪器 (TI), [PMP23461 测试报告](#) 测试报告。
- 德州仪器 (TI), [LM3522R030-Q1 具有集成驱动器、保护和温度报告功能的 650V 30mΩ GaN FET](#) 数据表。

## 7 首字母缩写词

TL	三电平
SHB	堆叠半桥
DC	直流
OBC	板载充电
HSHB	硬开关半桥
SPSDAB	单相移双有源电桥
MVBI	中间电压平衡问题
PWM	脉宽调制

## 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