

电源设计研讨会

移相全桥转换器基础知识

作者

Sheng-yang Yu、Ben Lough、Richard Yin 和
Qing Ye



议程

- 为何采用相移全桥 (PSFB)?
 - 电源发展趋势和对软开关转换器的需求
 - PSFB 目标应用
- PSFB 运行和设计注意事项
 - PSFB 如何工作及其如何实现软开关？
 - PSFB 输出整流器的类型
 - 输出整流器上的电压尖峰和钳位选项
 - 电压模式和峰值电流模式控制
 - 同步整流器 (SR) 运行模式
 - 轻负载管理
- PSFB 设计示例
- 概要

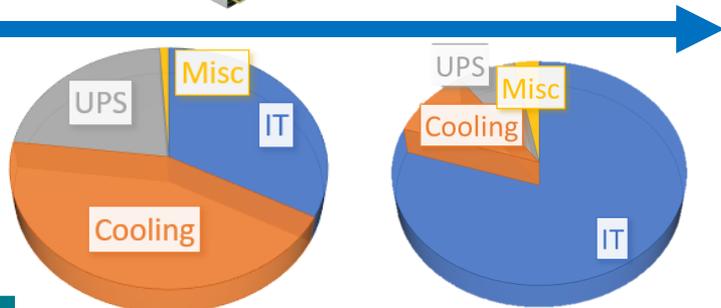
为何采用 **PSFB**?

电源发展趋势

- 对尺寸更小、更轻和更高效率系统的需求
- 80 Plus 认证和 Open Compute Project (OCP) 模块化硬件系统通用冗余电源 (M-CRPS) 规格推动高效率



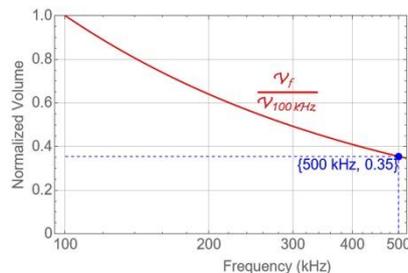
$$PUE = \frac{\text{Total Datacenter Power}}{\text{Actual IT Power}}$$



电源使用效率 (PUE): 3

PUE: 1.25

效率标准	10% 负载	20% 负载	50% 负载	100% 负载	注意
80 Plus Titanium	90%	94%	96%	91%	输入为 230V 交流
M-CRPS (<2,500W)	90%	94%	96%	92%	输入为 240V 交流
M-CRPS (≥2,500W)	90%	94%	96%	94%	输入为 240V 交流



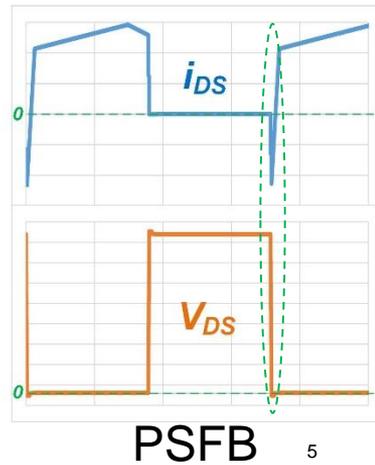
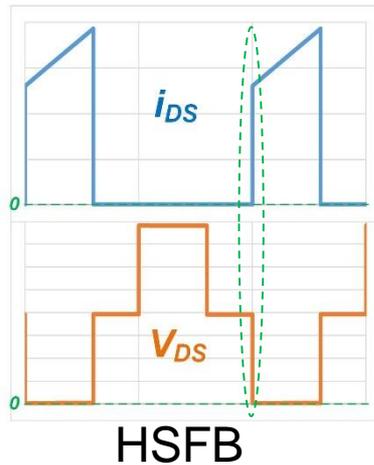
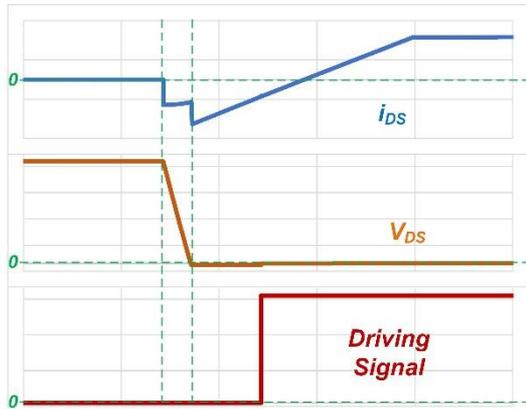
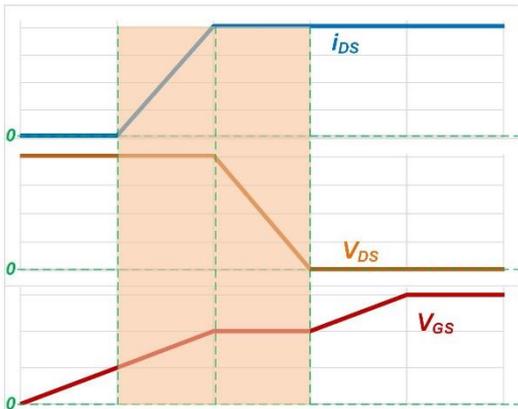
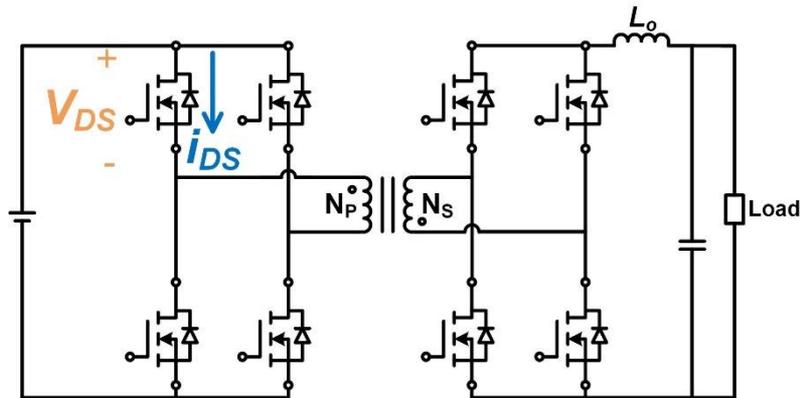
软开关的驱动因素

- 硬开关导通

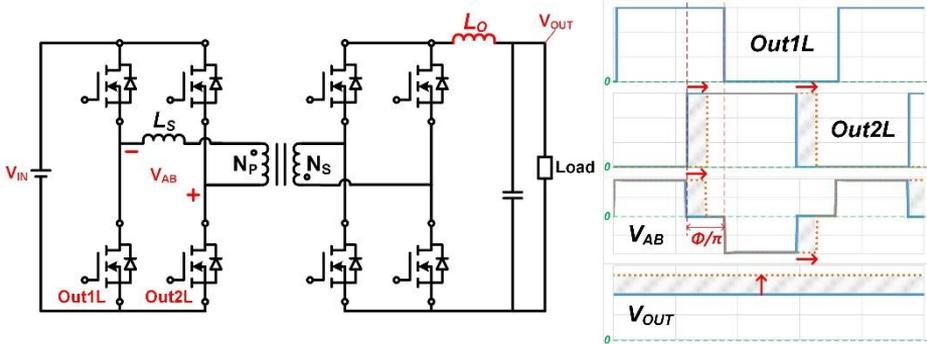
- 导通时 MOSFET 电流/电压重叠
- 导通速度 (t_{on} 损耗) 与开关节点瞬态电压 (dV/dt) (EMI 噪声) 之间的权衡
- 例如: 硬开关全桥转换器 (HSFB)

- 软开关导通

- MOSFET V_{DS} 在施加 V_{GS} 之前放电
- 导通速度对于实现高效率并不重要
- 允许更高的 F_{sw}

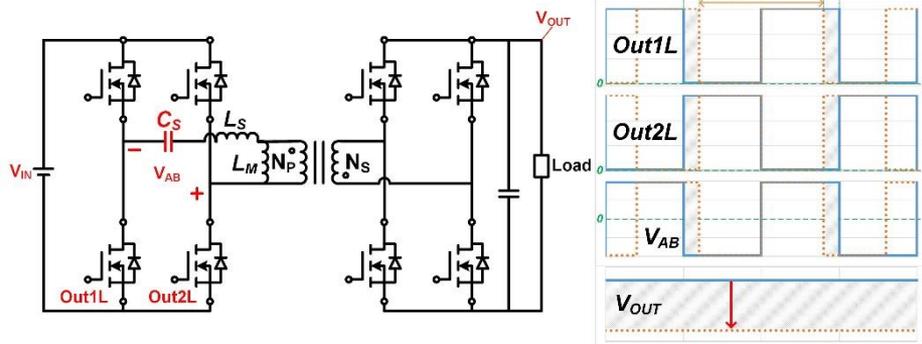


拓扑比较: PSFB 与 LLC



PSFB 转换器

- 使用 L_S 和 L_O 中存储的能量进行零电压开关 (ZVS)
- 针对不同的 V_{OUT}/V_{IN} 增益更改相位角
- 优势
 - 瞬态响应更快
 - 能够实现宽电压工作范围
 - 具有固定频率, 可轻松实现 SR 控制
- 劣势
 - 整流器反向恢复
 - 轻负载时初级桥臂缺失 ZVS
 - 整流电压应力更高

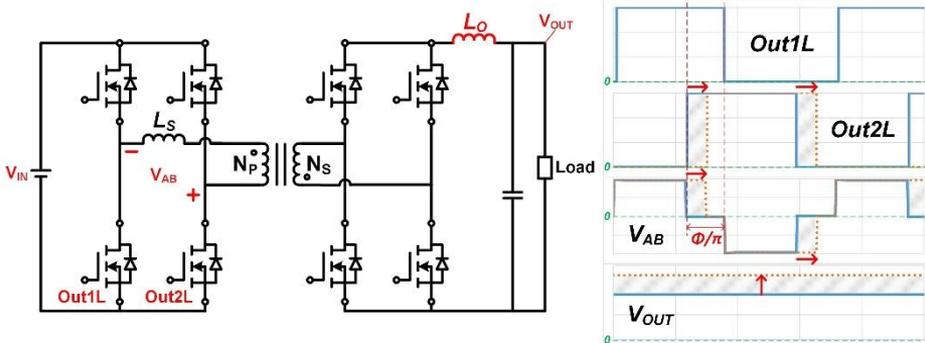


LLC 系列谐振转换器

- 使用 L_M 中存储的能量进行 ZVS
- 针对不同的 V_{OUT}/V_{IN} 增益更改 F_{sw}
- 优势
 - $F_{sw} \leq f_r$ 时在输出整流器上进行软开关
 - 当 $f_{sw} \approx f_r$ 时效率更高
- 劣势
 - 次级 RMS 电流更大
 - SR 控制更加棘手
 - 工作范围有限

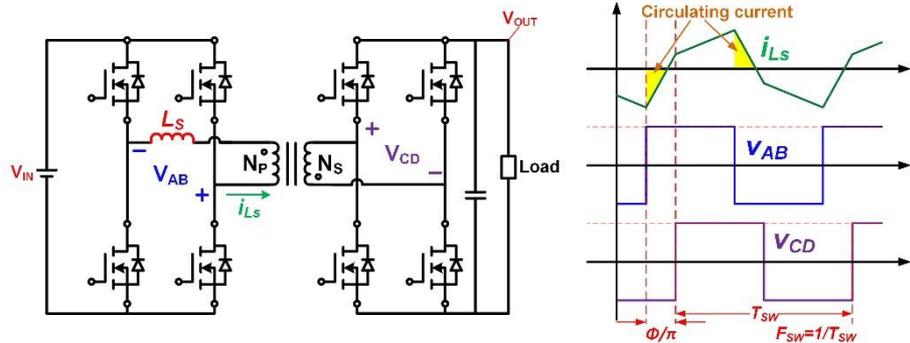
↑
串联谐振频率

拓扑比较: PSFB 与 DAB



PSFB 转换器

- 使用 L_S 和 L_O 中存储的能量进行 ZVS
- V_{OUT}/V_{IN} 增益: 由初级半桥之间的相位角决定
- 输出纹波电流比双有源电桥 (DAB) 更低
- 输出整流应力更高

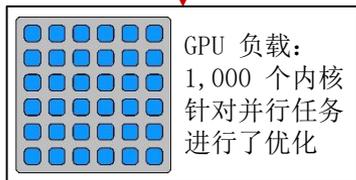
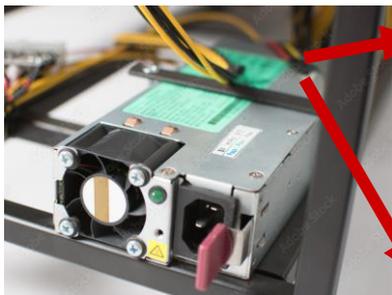


DAB 转换器

- 使用 L_S 中存储的能量进行 ZVS
- V_{OUT}/V_{IN} 增益: 由变压器绕组之间的相位角决定
- 具有单相移控制, 循环电流较大
- 应用多相移控制可降低循环电流
- 输出纹波电流比 PSFB 更高

PSFB 目标应用

- PSFB 非常适合以下类型的应用：
 - 具有快速瞬态要求
 - 在具有图形处理单元 (GPU) 负载的服务器电源单元 (PSU) 12V 总线中 $\geq 10A/\mu s$
 - 具有宽输入/输出范围
 - 高功率电池应用



电动汽车电池:
250V 至 450V



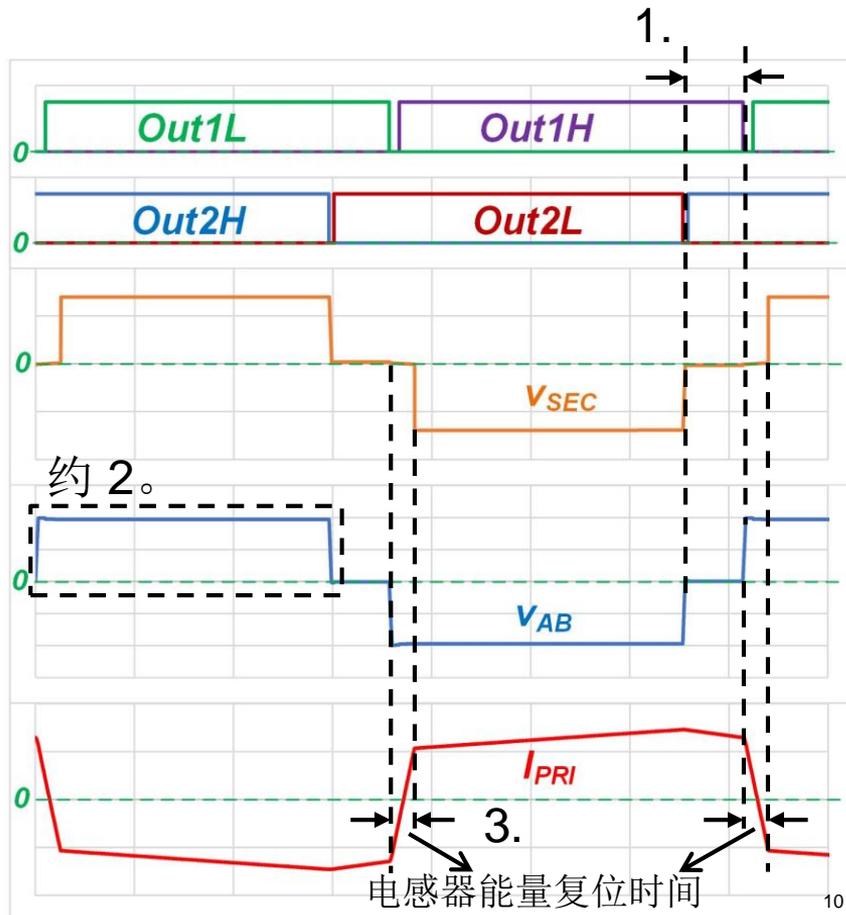
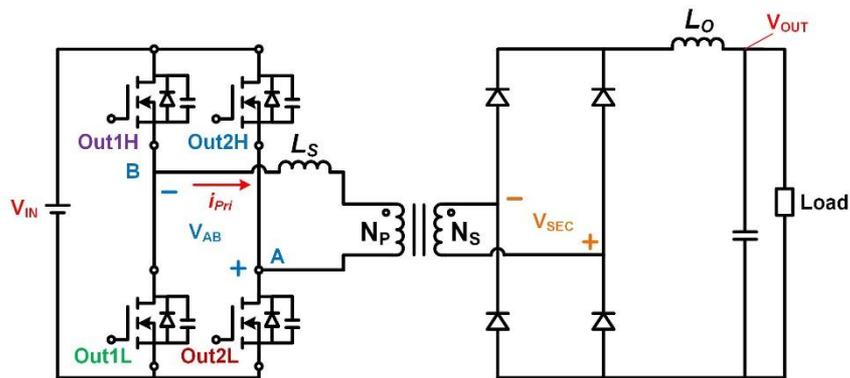
汽车电池:
9V 至 16V,
电流高达
300A



软开关和工作原理

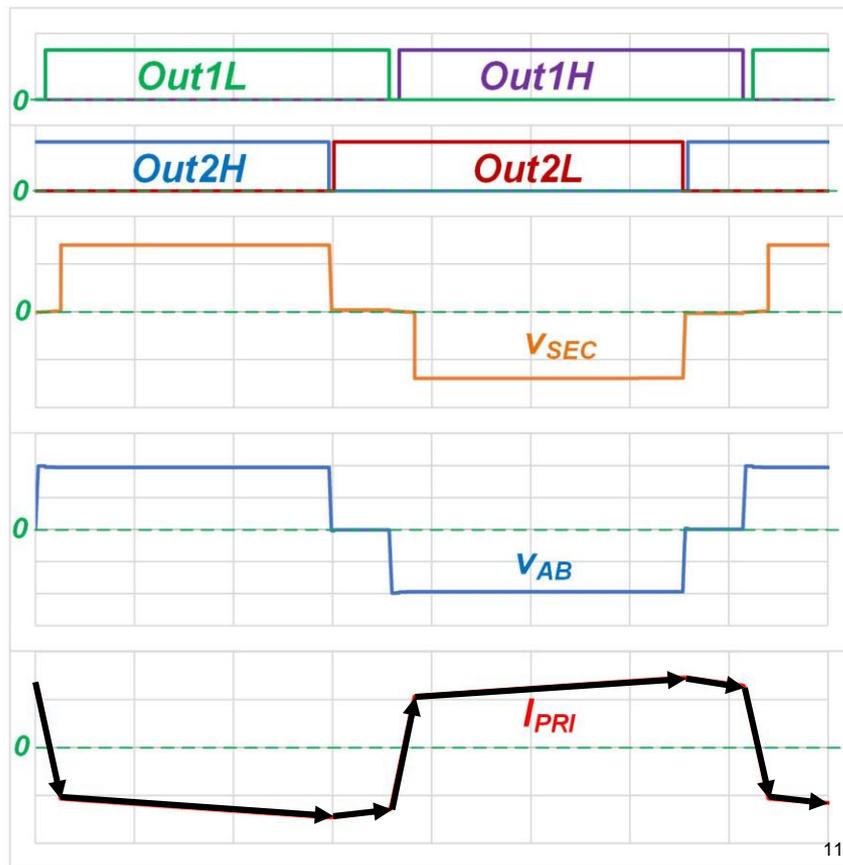
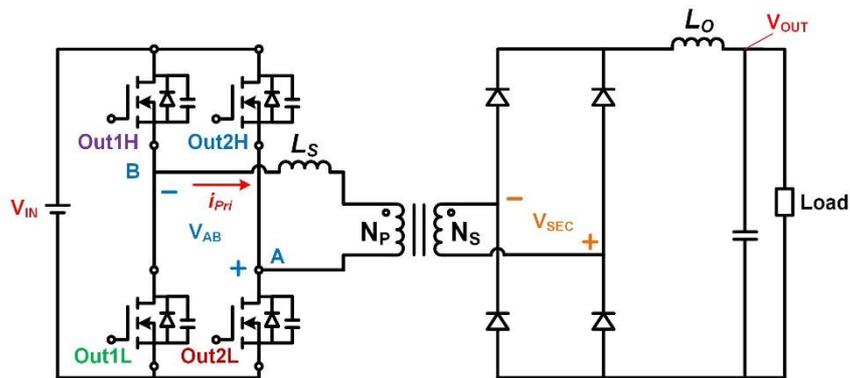
PSFB 如何工作?

1. 通过相移来控制非零电压互感器脉冲宽度
2. 通过输出级的降压运行来实现调节
3. 占空比损耗限制了有效占空比



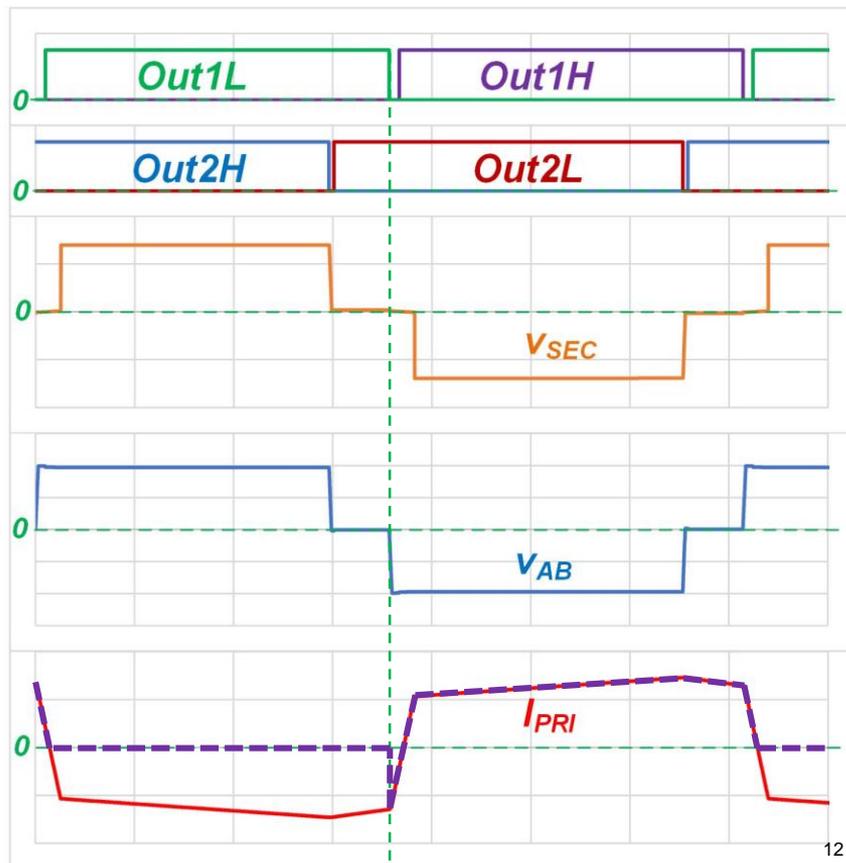
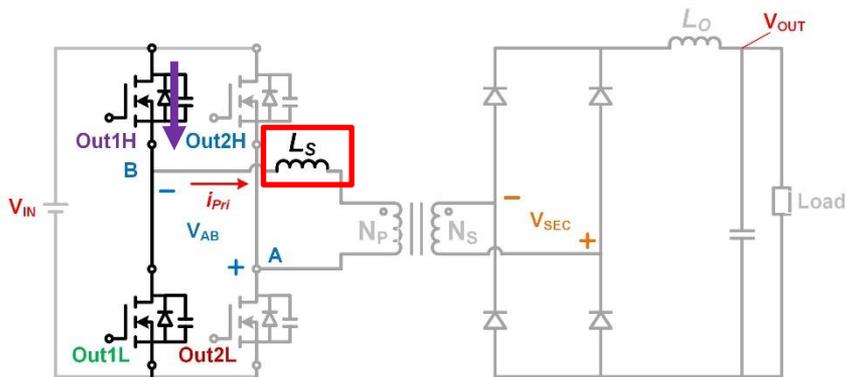
PSFB 如何实现软开关?

- 允许续流电流
 - L_S 和 L_O 能量可用于进行 ZVS



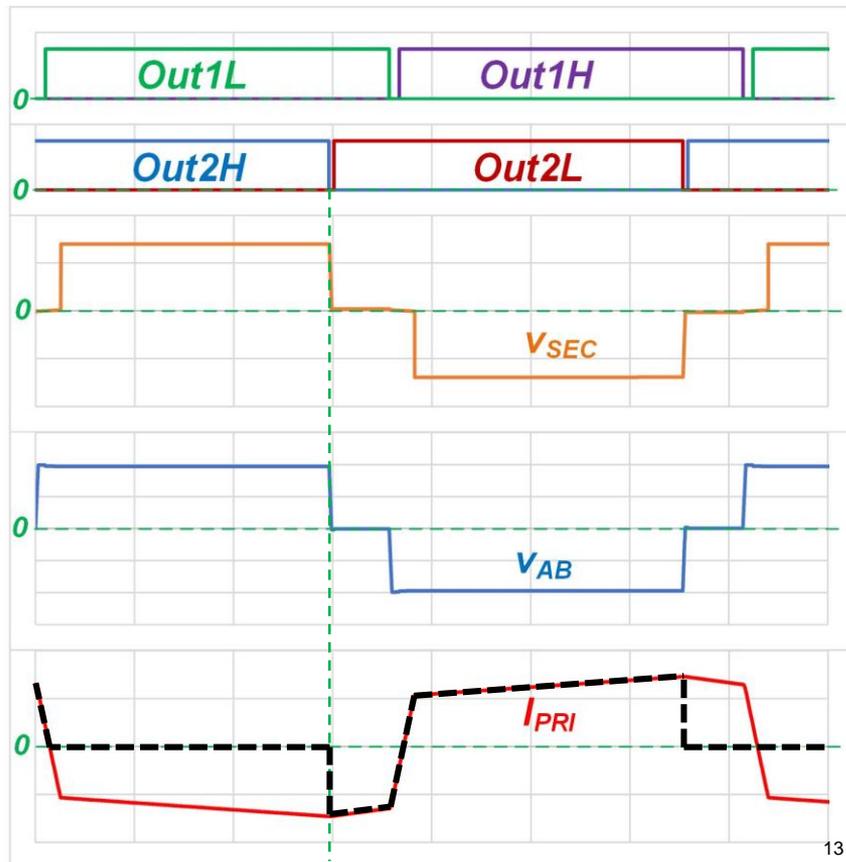
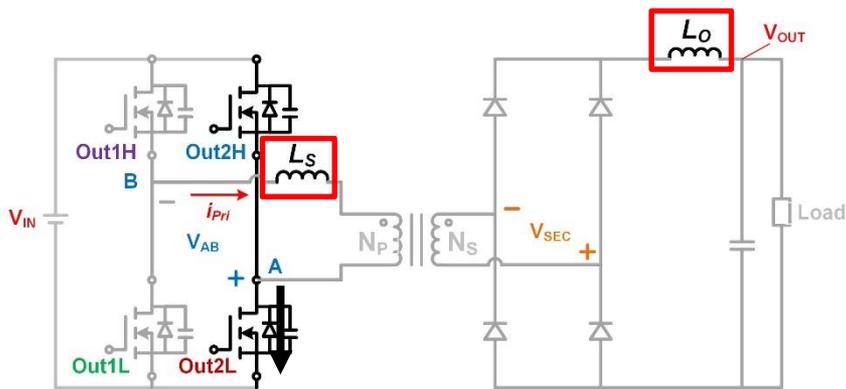
PSFB 如何实现软开关?

- 允许续流电流
 - L_S 和 L_O 能量可用于进行 ZVS
- 桥臂 1 ZVS: 主要依赖 L_S



PSFB 如何实现软开关?

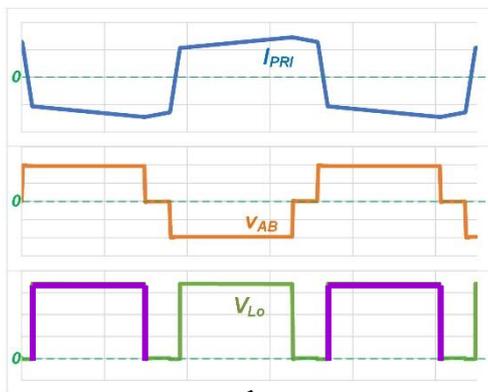
- 允许续流电流
 - L_S 和 L_O 能量可用于进行 ZVS
- 桥臂 1 ZVS: 主要依赖 L_S
 - 在轻负载时容易**失去** ZVS
- 桥臂 2 ZVS: 同时依赖 L_S 和 L_O
 - 在轻负载时容易**保持** ZVS



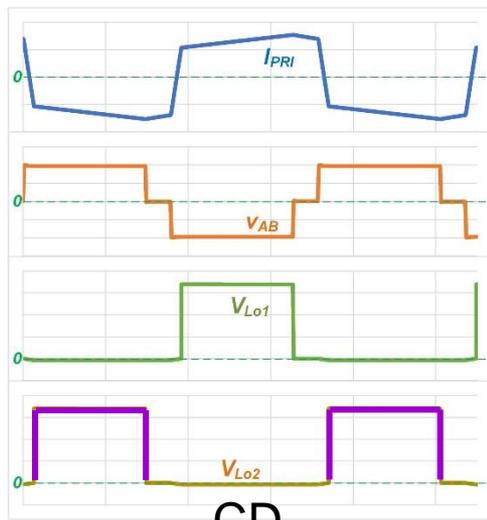
整流器和钳位

PSFB 的输出整流器

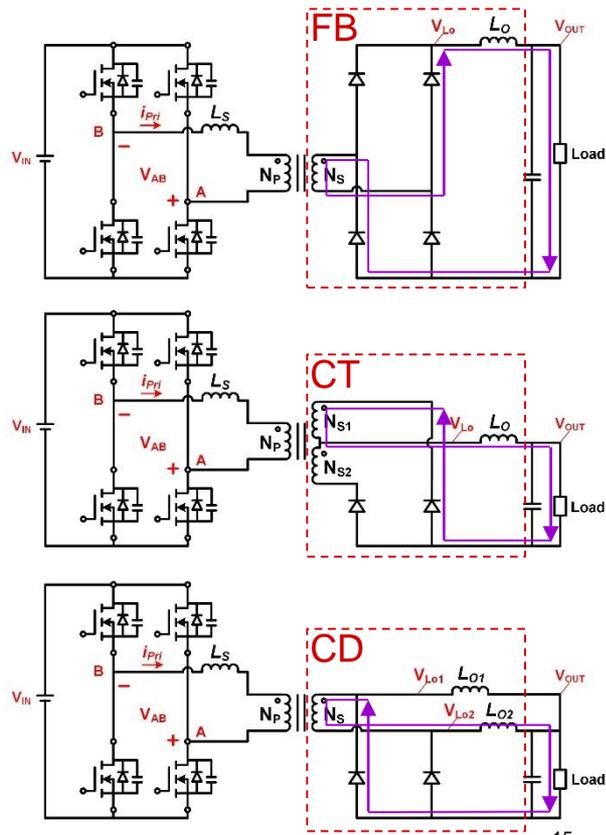
- 整流器可分为三种类型：
 - 全桥 (FB) 整流器
 - 中心抽头 (CT) 整流器
 - 倍流整流器



FB 和 CT

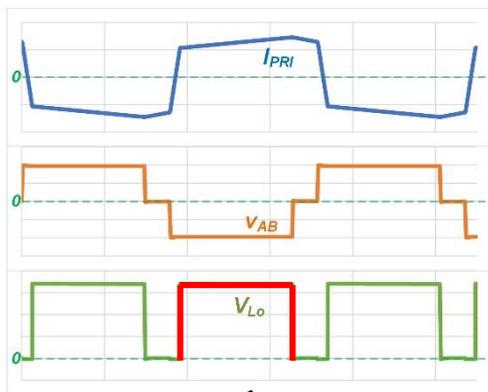


CD

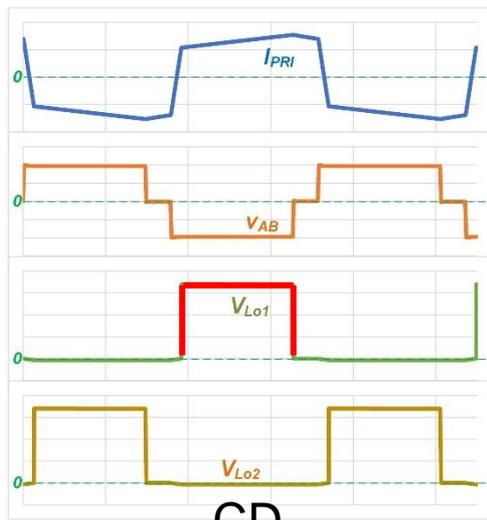


PSFB 的输出整流器

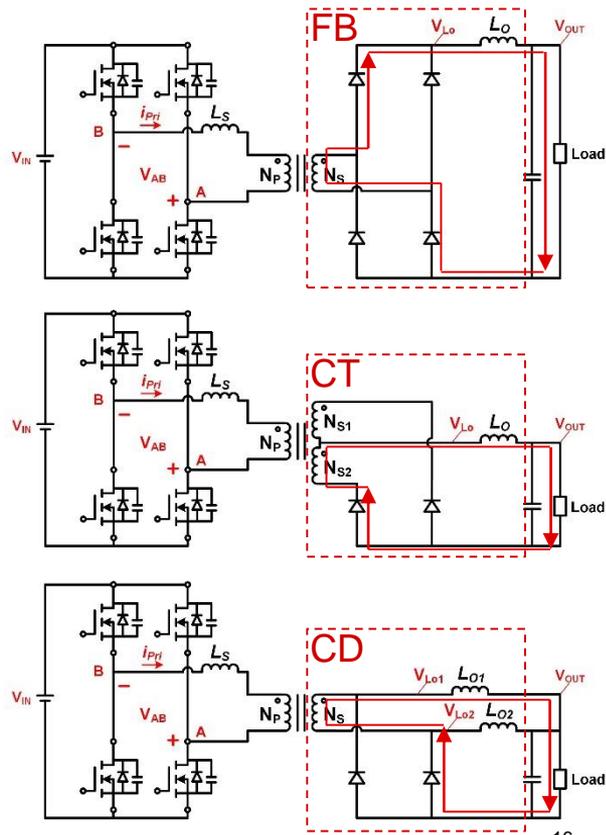
- 整流器可分为三种类型：
 - 全桥 (FB) 整流器
 - 中心抽头 (CT) 整流器
 - 倍流整流器



FB 和 CT

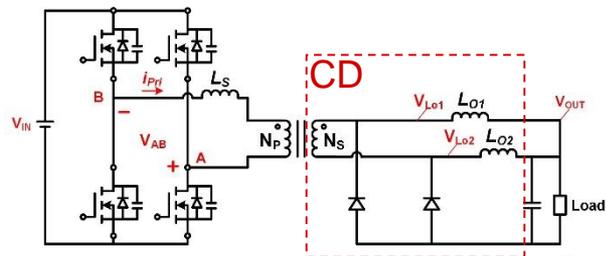
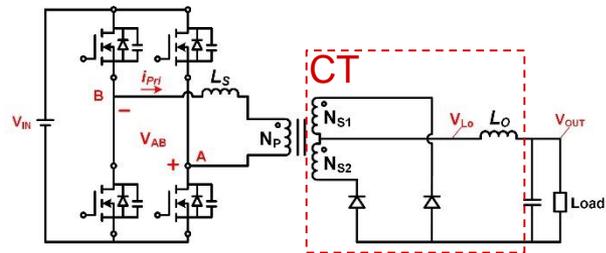
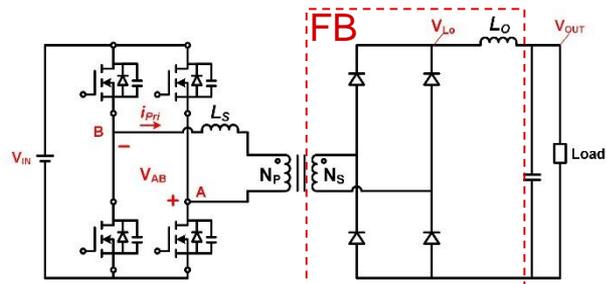
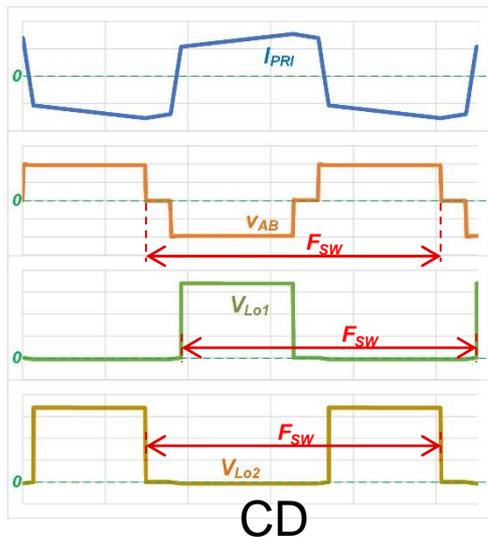
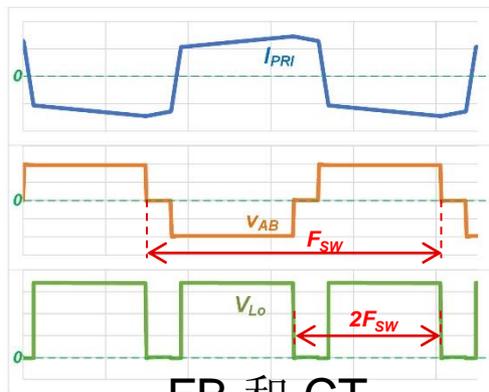


CD



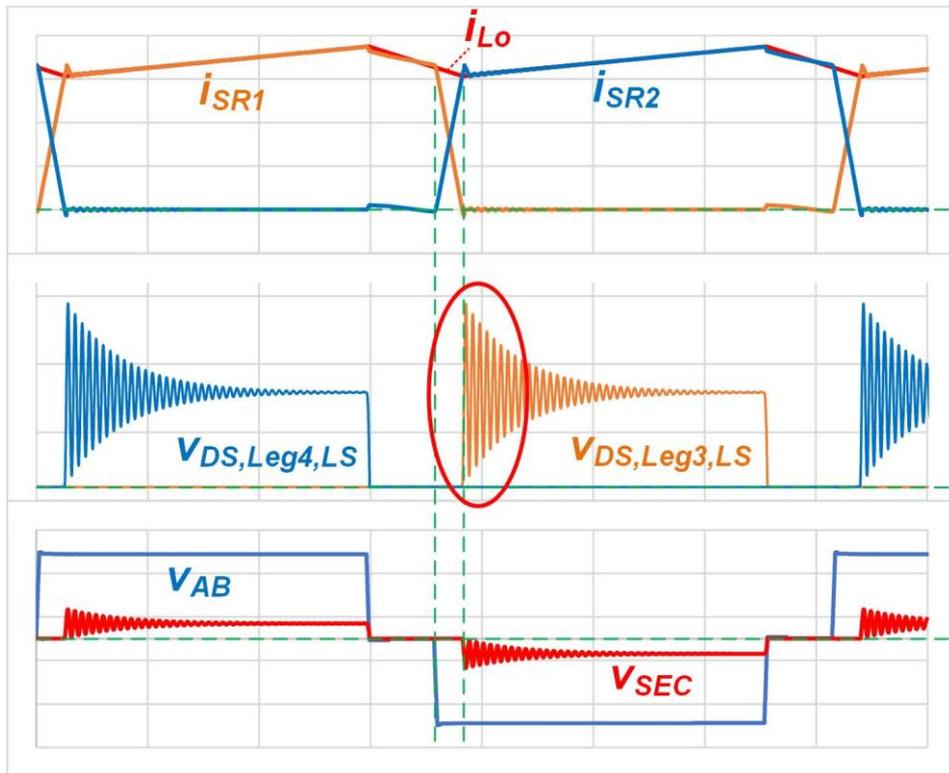
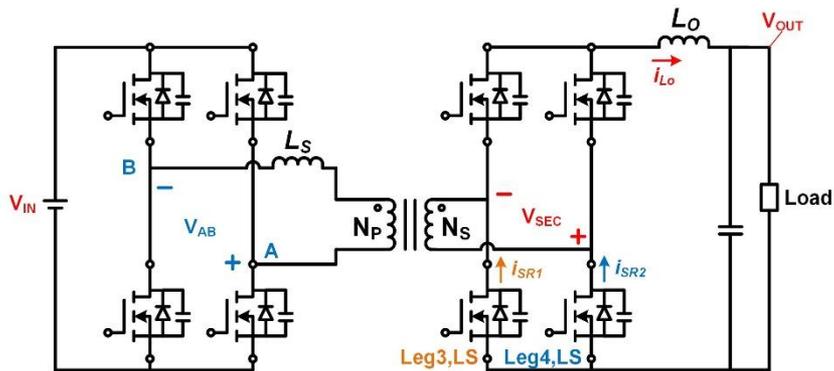
PSFB 的输出整流器

类型	电感器 F_{SW}	D 范围	N_s	Rec	L_o	特性
FB	$2 \times F_{SW,PRI}$	0-100%	1	4	1	变压器利用率较高, 适合高 V_o
CT	$2 \times F_{SW,PRI}$	0-100%	2	2	1	元件数量最少, 变压器利用率较低
CD	$1 \times F_{SW,PRI}$	0-50%	1	2	2	变压器利用率较高, i_{L_o} 减半



输出整流器上的电压尖峰

- 变压器绕组串联电感器与整流器 C_{OSS} 谐振
- 电压峰值可高达 $2V_{IN} \frac{N_S}{N_P}$



钳位整流器电压尖峰：被动

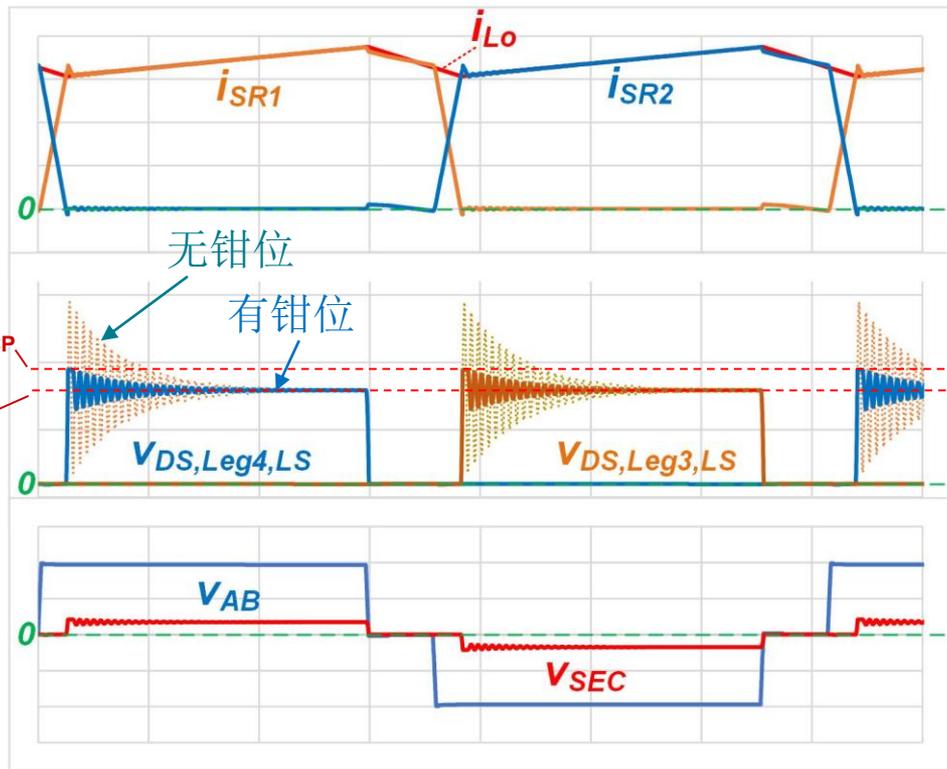
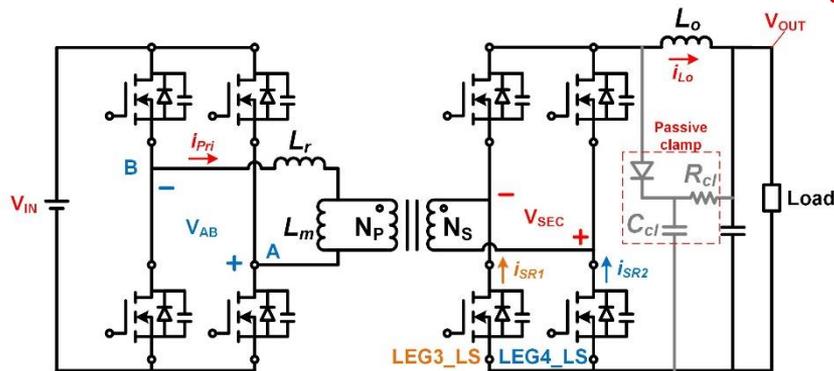
- C_{clamp} 作为理想电压源

$$R_{\text{cl}} = \frac{(V_{\text{CP}} - V_{\text{OUT}})(V_{\text{CP}} - V_{\text{d}})}{C_{\text{cl}}V_{\text{CP}}(2V_{\text{d}} - V_{\text{CP}})F_{\text{sw}}}$$

- 钳位电阻器耗散

$$P_{\text{Rcl}} = \frac{(V_{\text{CP}} - V_{\text{OUT}})^2}{R_{\text{cl}}}$$

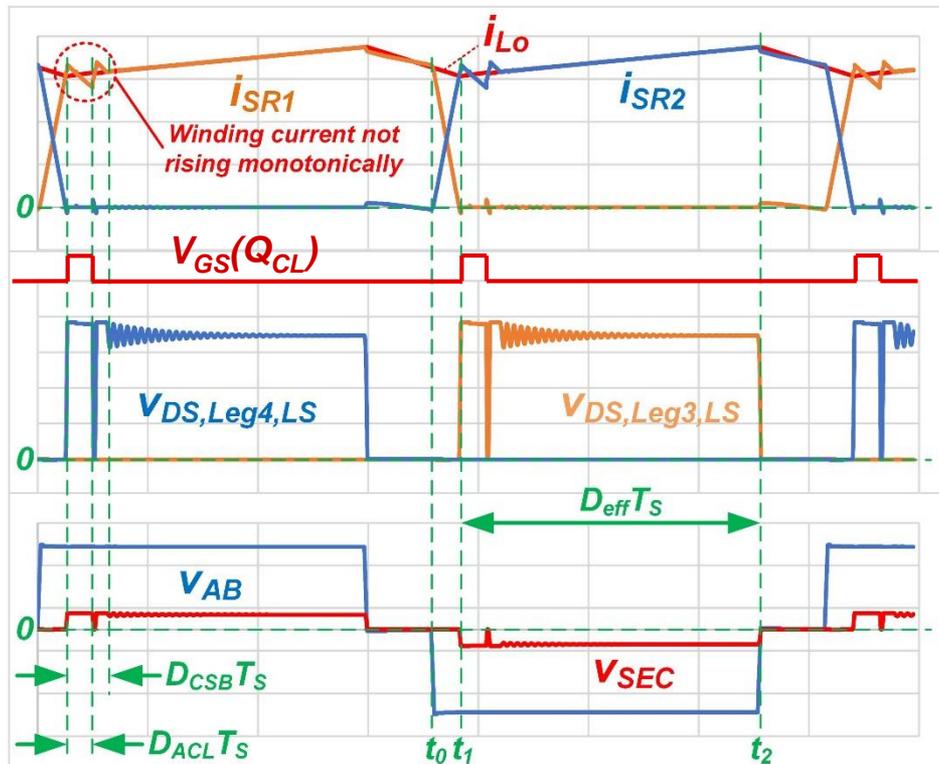
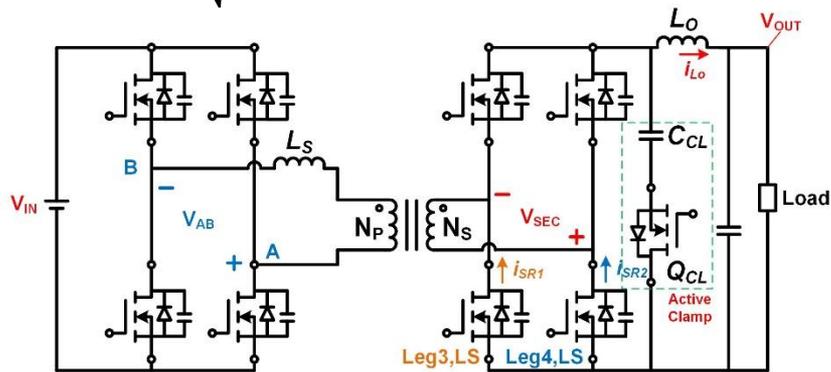
较小的 R_{cl} \Rightarrow 较低的 V_{CP}
 \Rightarrow 较大的 P_{Rcl}



钳位整流器电压尖峰：有源钳位

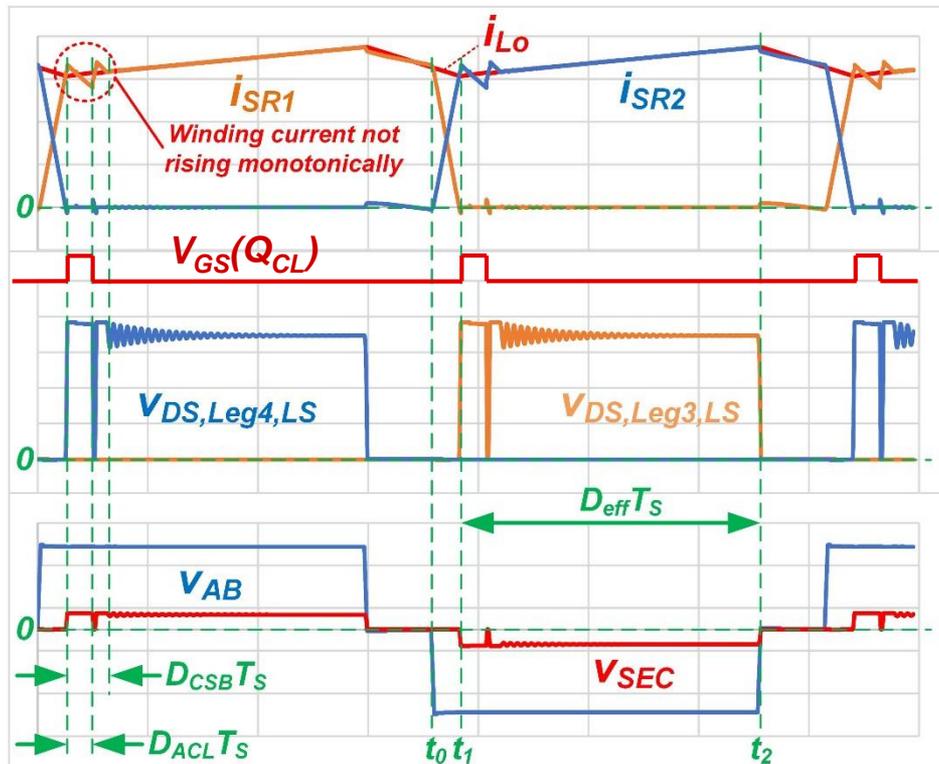
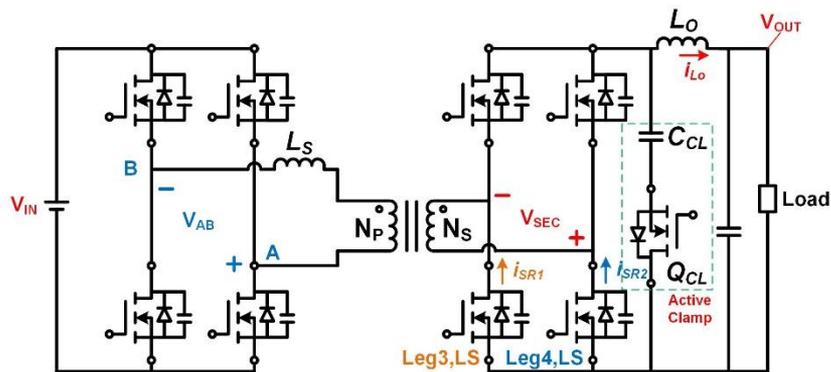
- 在 t_1 之后导通 Q_{CL} ，以允许整流器电压钳位至 V_{CCL}
- 调整 C_{CL} 电容大小以实现相对较低的纹波电压：

$$2\pi \sqrt{\left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2 \times L_S \times C_{CL}} \gg T_S$$



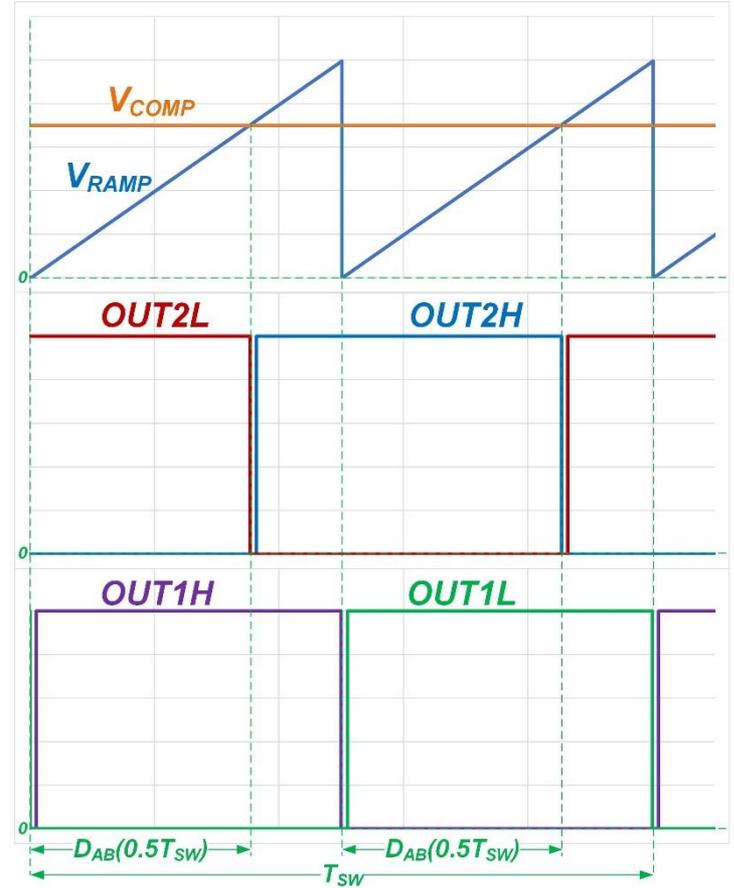
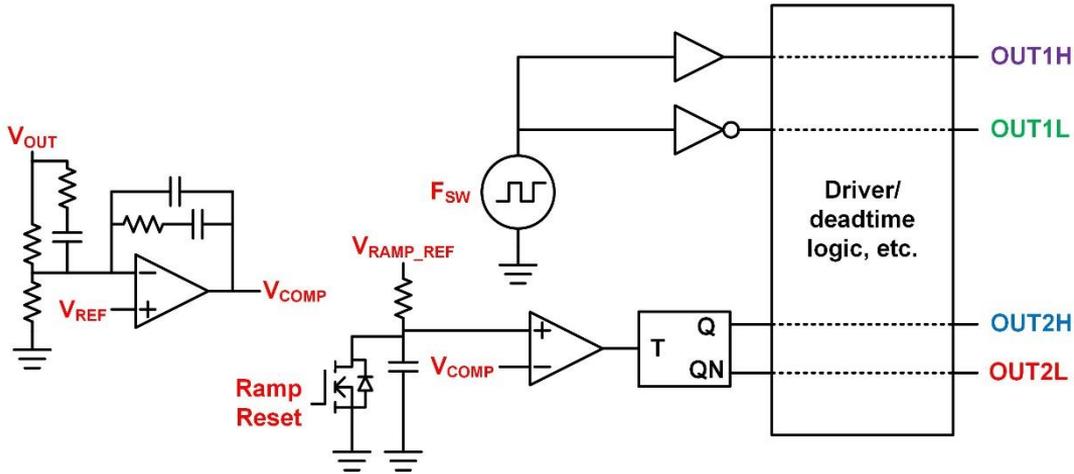
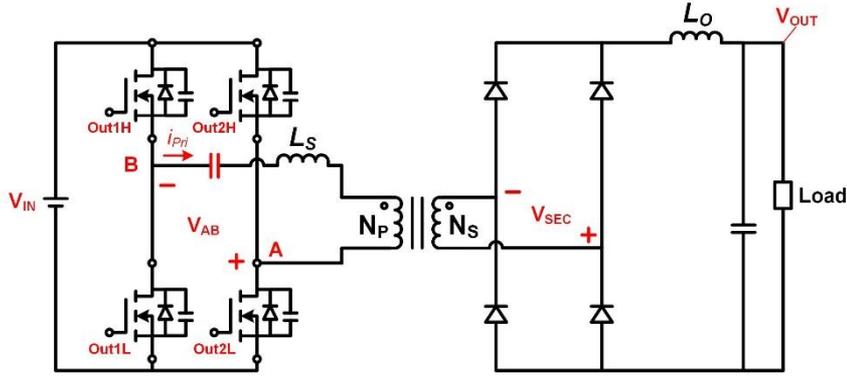
钳位整流器电压尖峰：有源钳位

- 在 i_{PRI} 和 i_{SR} 上产生电流失真
 - 使峰值电流模式控制变得困难
- Q_{CL} 只需要导通很短的时间即可钳位
 - 较长的 $D_{ACL}T_S \Rightarrow$ 较大的 i_{CL} 和较宽的非单调电流持续时间

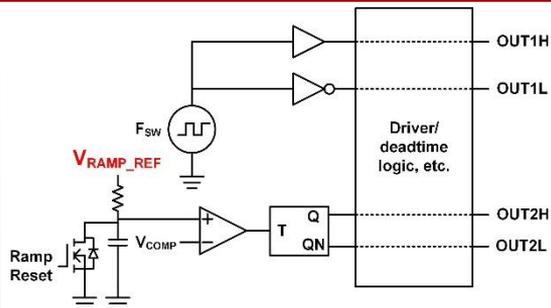


控制

PSFB 控制

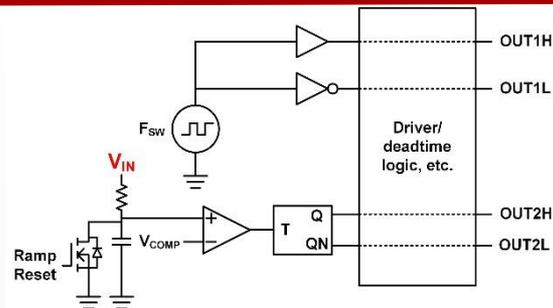


PSFB 控制模式



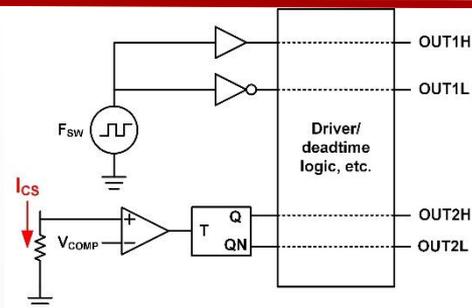
电压模式控制

- 一个高侧/低侧对由时钟以开关频率直接控制
- 第二个高侧/低侧对由 T 触发器进行控制



具有前馈的电压模式控制

- 电压斜坡基准由 V_{IN} 或与 V_{IN} 成正比的电压提供
- 立即响应输入电压变化

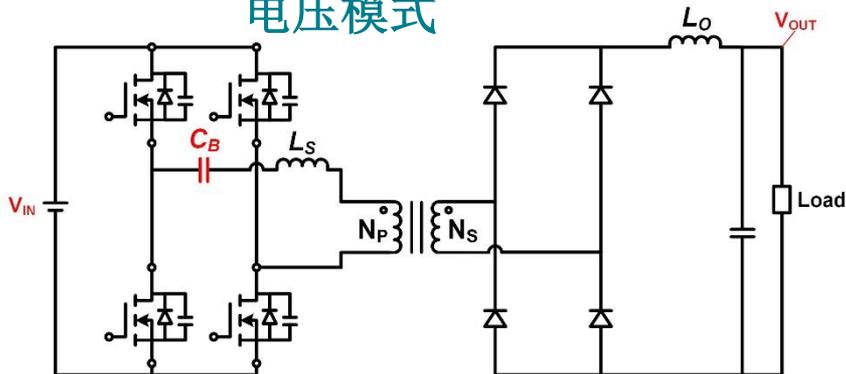


峰值电流模式控制

- 来自功率级的电流信息取代了斜坡信号
- 电流检测 (CS) 电阻加放大器或 CS 变压器常用方法

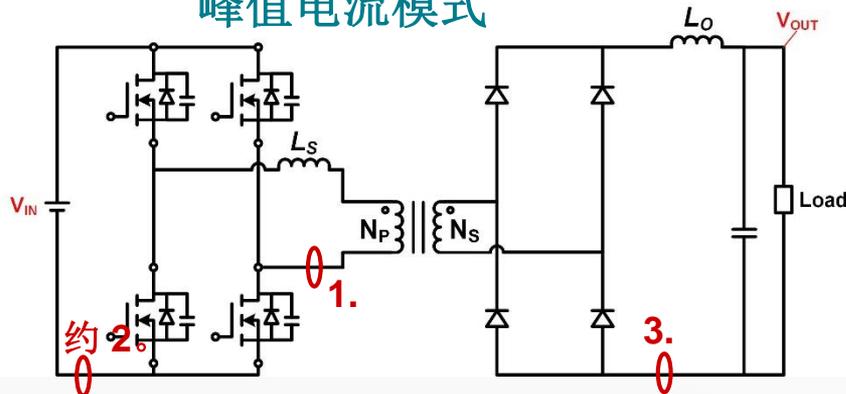
电压模式与峰值电流模式

电压模式



- 需要使用直流阻断电容器 C_B 来防止变压器饱和
- 直流阻断电容器将增加 PSU 占用空间和 SR 上的电压应力

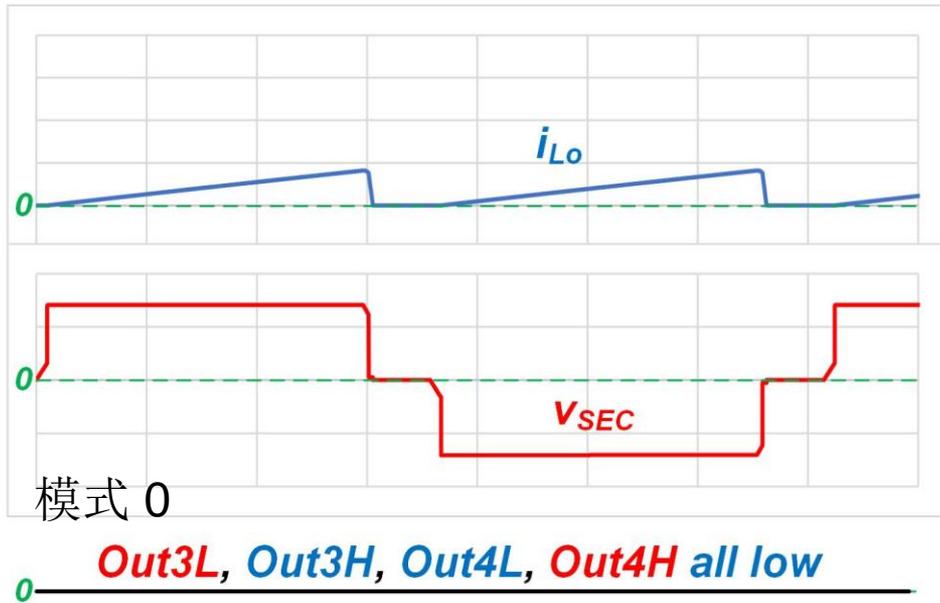
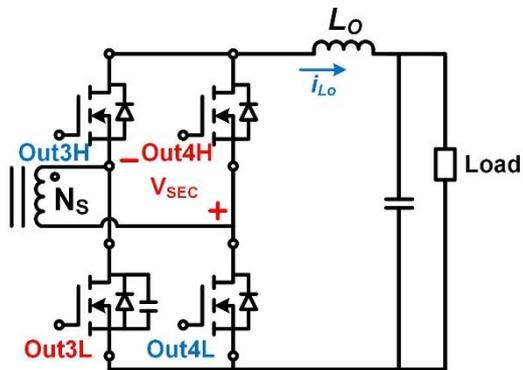
峰值电流模式



1.
 - CS 变压器磁芯自动复位
 - 不包含直流电流信息
2.
 - CS 变压器复位更加棘手
 - 寄生环路电感更高
3.
 - 电阻加 CS 放大器很常见
 - 缺少磁化电流信息

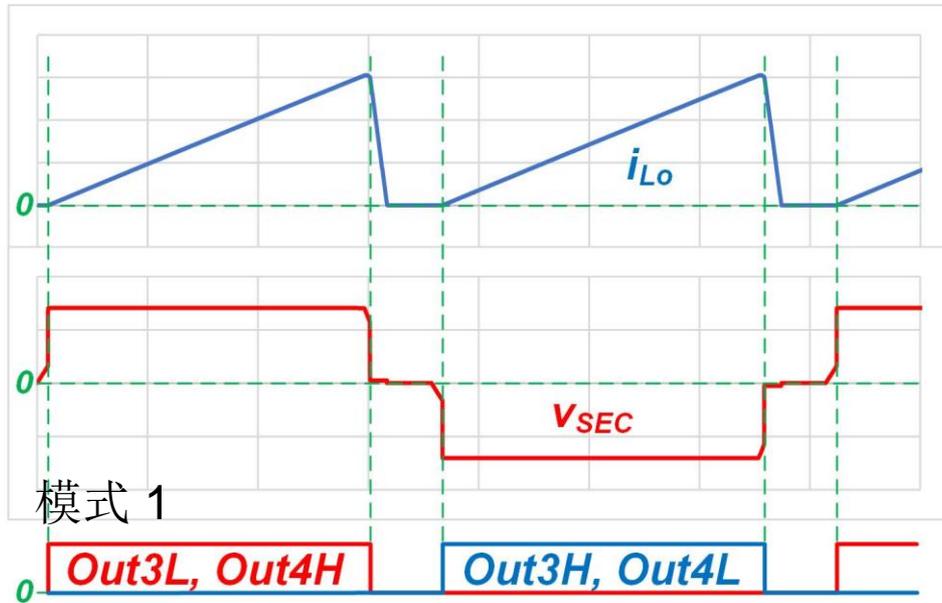
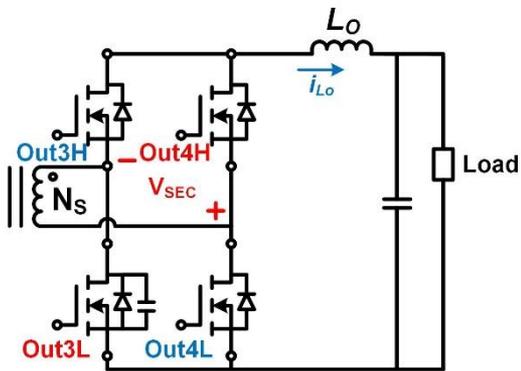
PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 0: 二极管导通 (不连续导通模式 [DCM])



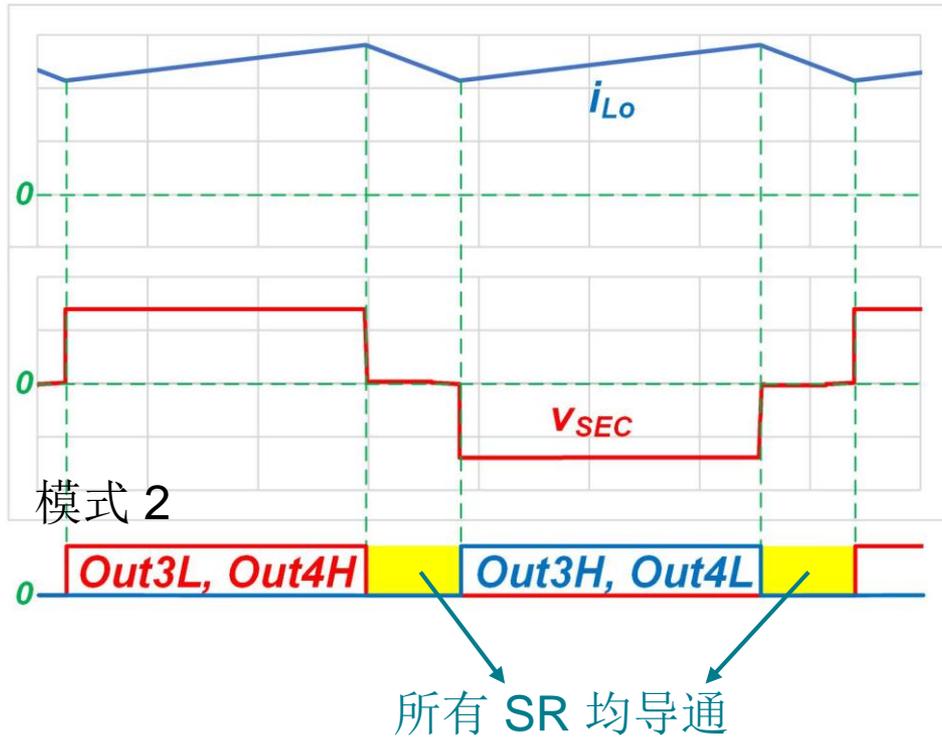
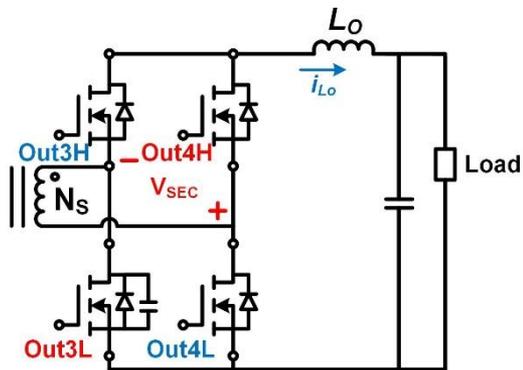
PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 1: SR 通道仅在电感器充电期间导通
 - 避免反向电流导通



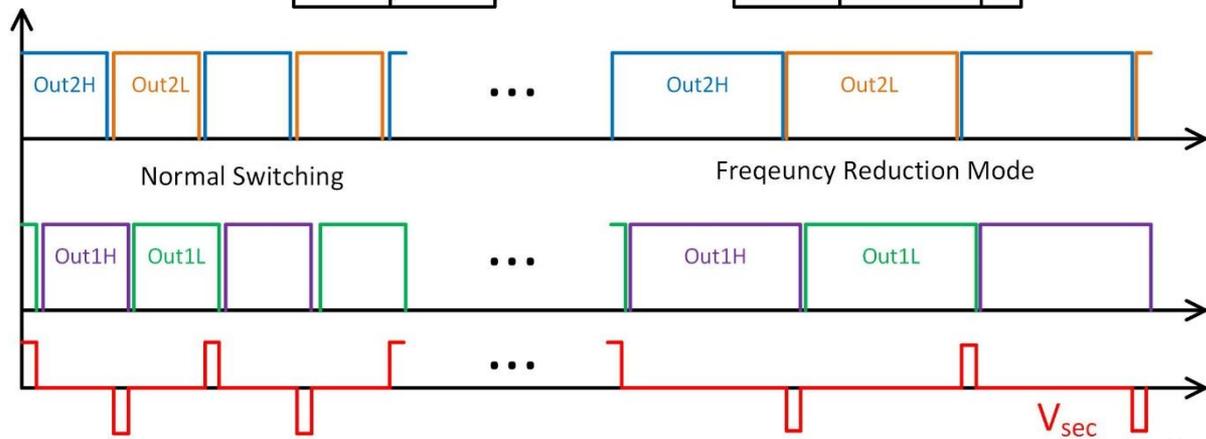
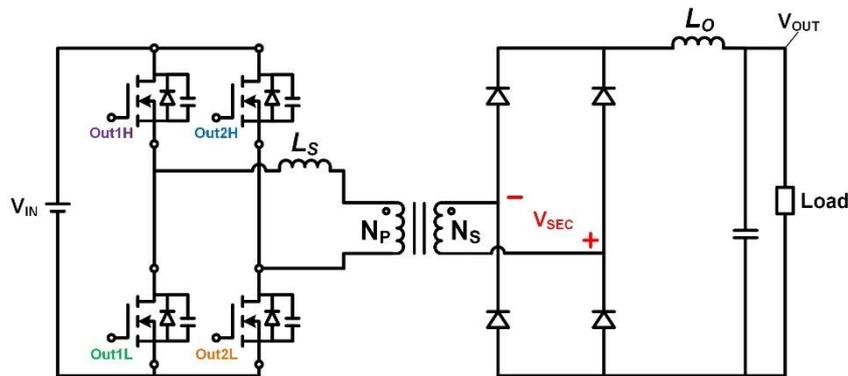
PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 2: 在续流期间导通所有整流器/FET
 - 在重负载时具有更低的导通损耗



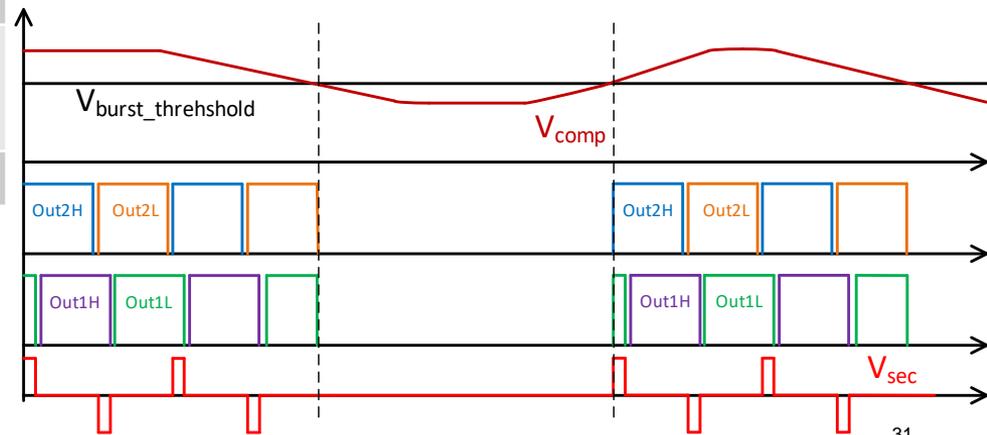
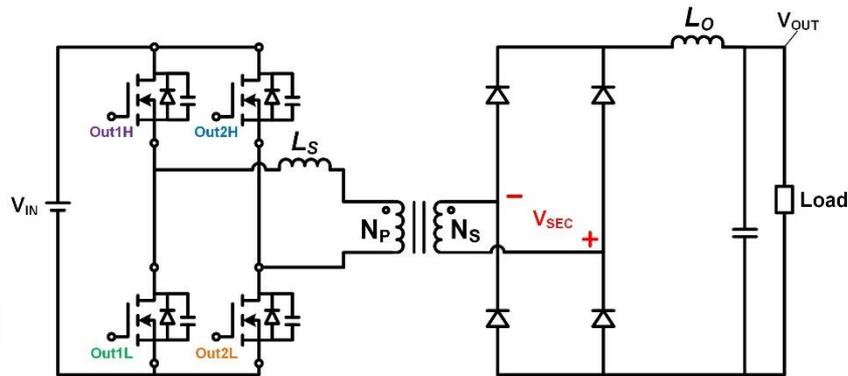
轻负载管理：降频模式

- PSFB 连续开关
- 能够降低有效占空比，同时保持最短的导通时间
- 不推荐使用栅极驱动变压器（饱和）



轻负载管理：磁滞突发模式

- 当 V_{comp} 变为 $<V_{burst_threshold}$ 时，PSFB 停止开关
- 当 V_{comp} 变为 $>V_{burst_threshold}$ 时，PSFB 恢复开关

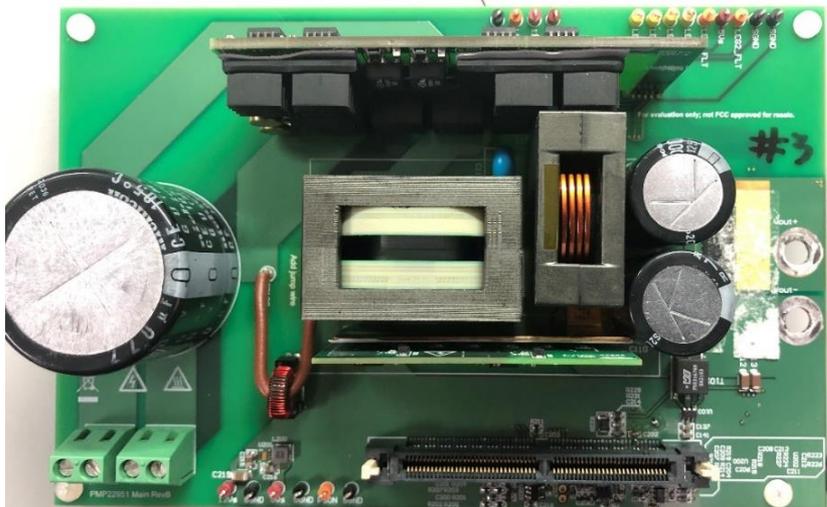


	降频模式	磁滞突发模式
瞬态响应	FR 模式下的控制环路带宽较小	快速
CPU 利用率	较大，需要计算所需的 F_{sw}	较小，根据比较器启用/禁用脉宽调制 (PWM)
输出纹波	较小	与 FR 模式相比较较大

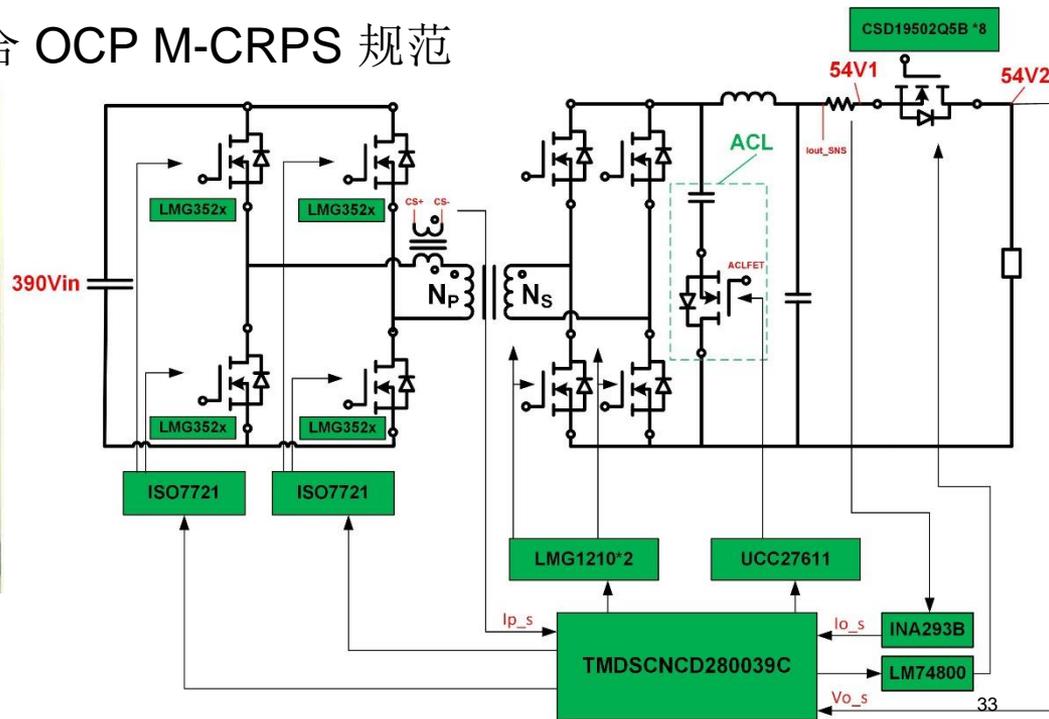
PSFB 设计示例

PSFB 设计示例：PMP22951

- 输入电压: 390V 标称值, 340V 最小值
- 输出: 54V/3kW 最大值, 旨在符合 OCP M-CRPS 规范

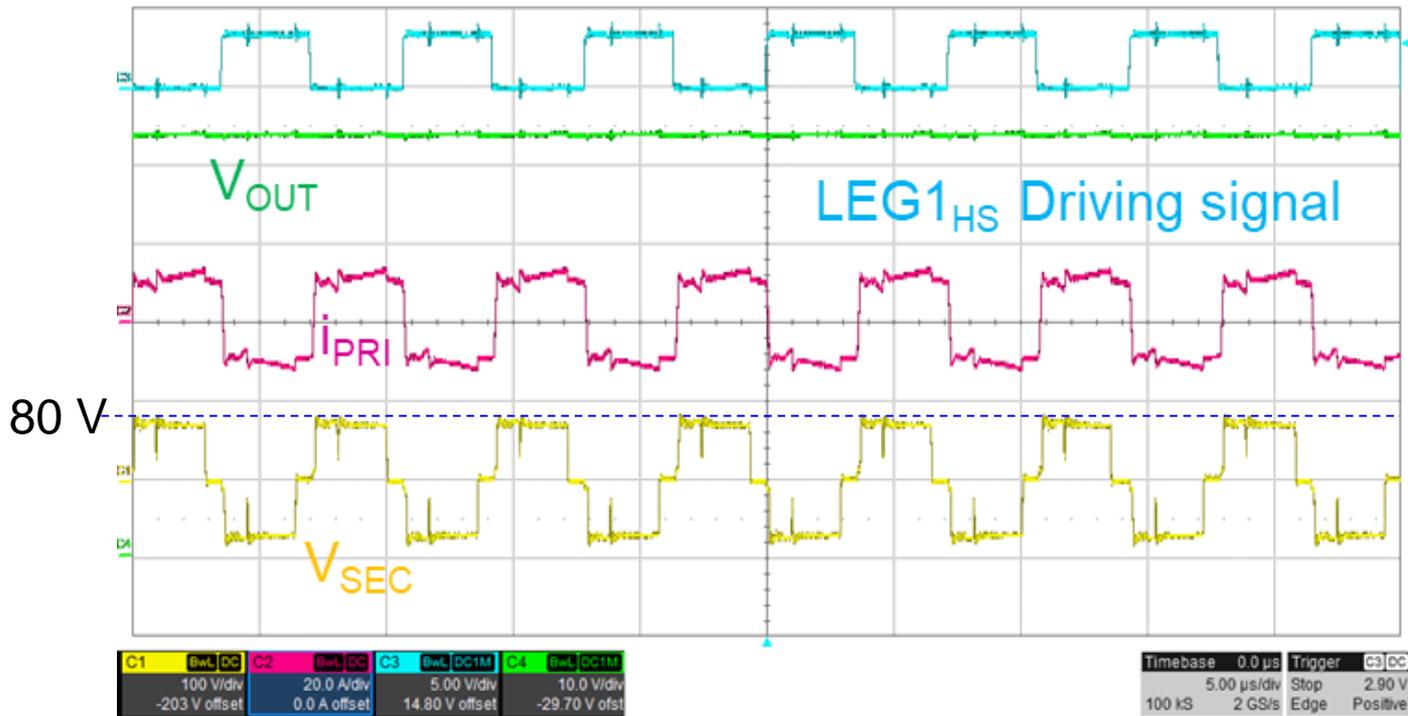


具有有源钳位的 54V、3kW 相移全桥参考设计



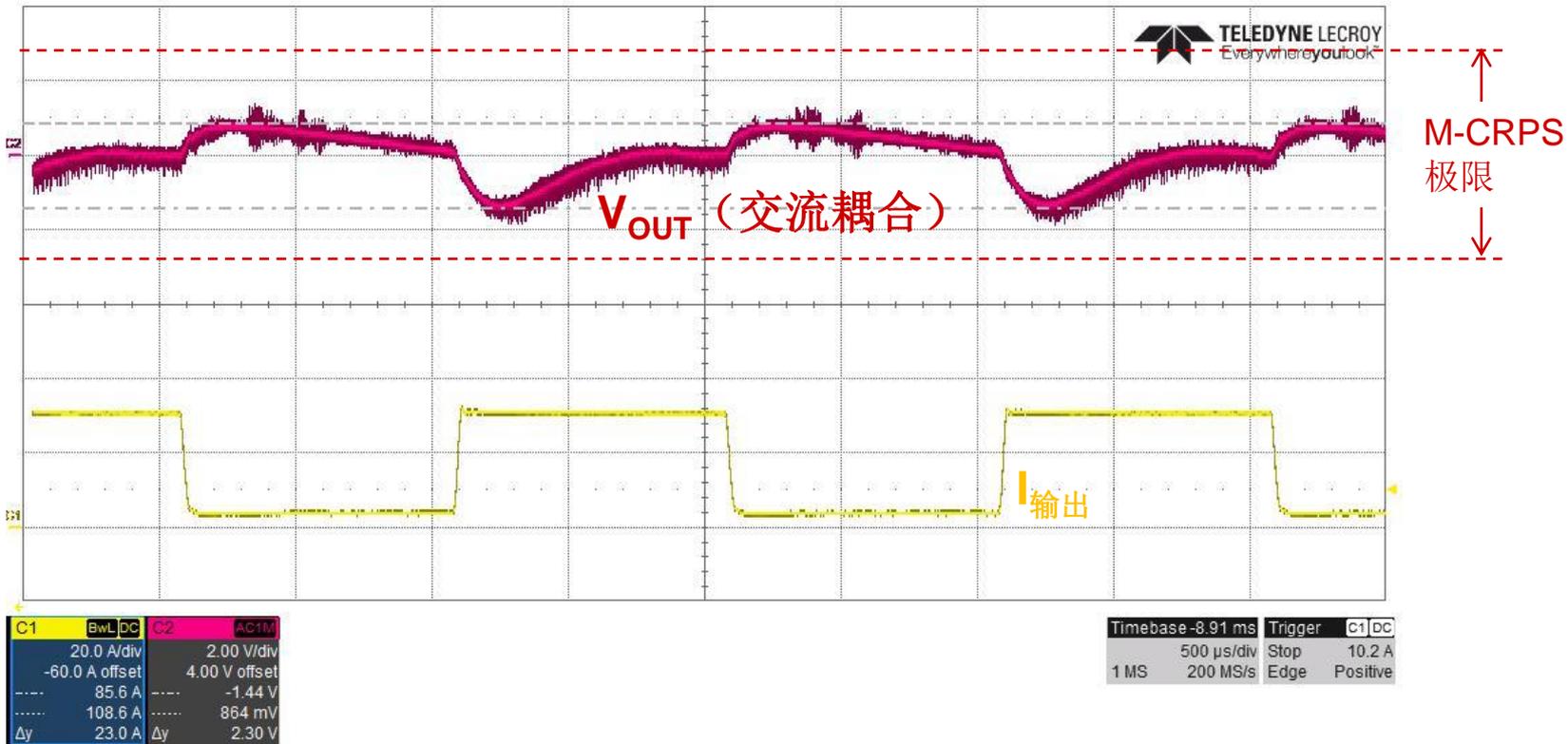
3kW 稳态波形

- 140kHz 工作频率

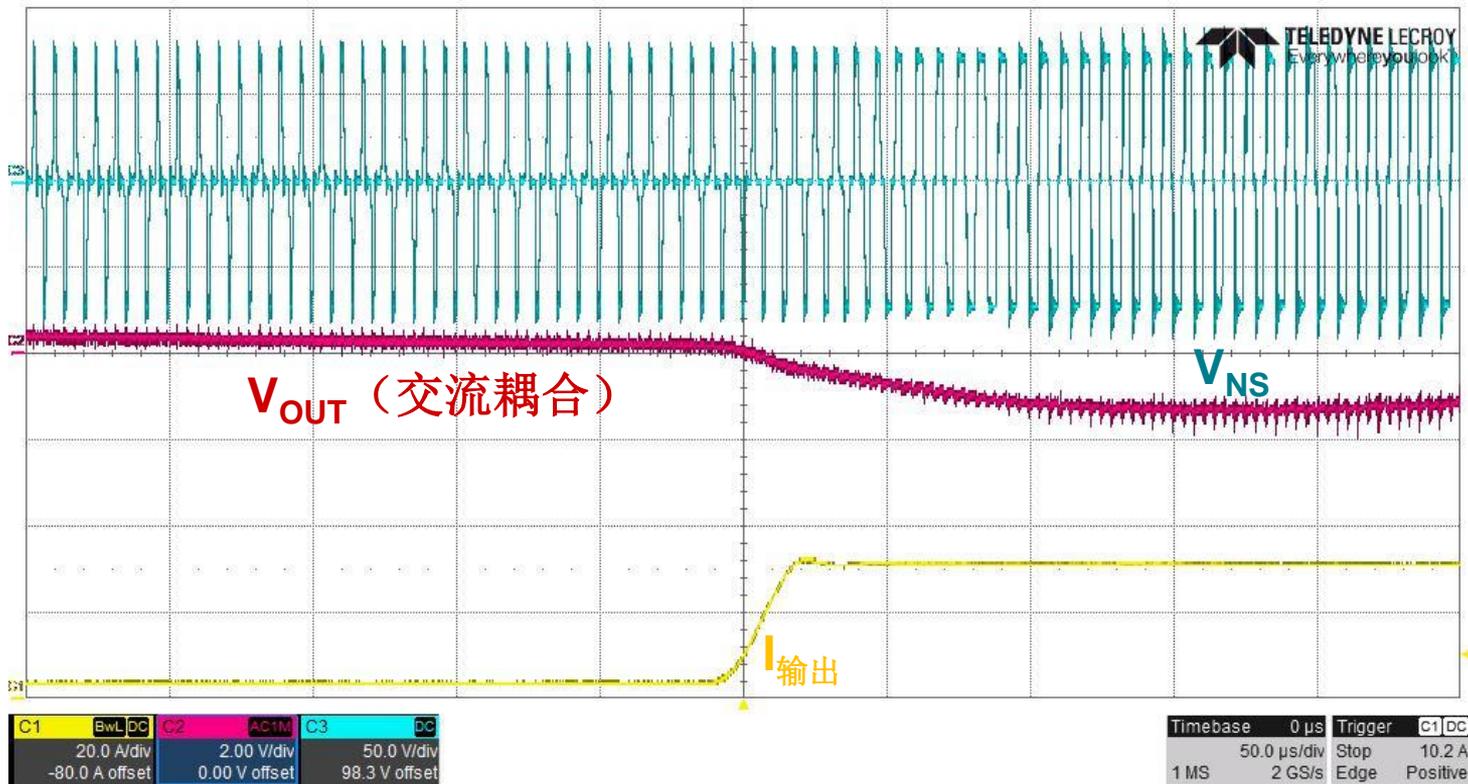


M-CRPS 负载瞬态, 50% 负载阶跃 (3A 至 31A)

负载电流



M-CRPS 负载瞬态, 50% 负载阶跃 (3A 至 31A)



概要

- PSFB 非常适合需要宽输入/输出电压范围和快速负载瞬态响应的应用
- PSFB 和其他隔离式拓扑的特性
- PSFB 工作原理
- 讨论了不同类型的整流器、整流器钳位选项、控制模式
- 展示了符合 M-CRPS 规范且具有有源钳位的 PSFB 参考设计
- 以下幻灯片的内容是行动呼吁

行动呼吁：电源发展趋势和规格

- 电源发展趋势：
 - Yin, Richard. “Power Tips #109: Five major trends in power supply design for servers.” EDN Power Tips series, August 2022. <https://www.edn.com/five-major-trends-in-power-supply-design-for-servers/>
- **80 Plus** 标准：
 - <https://www.clearexult.com/80plus/program-details#program-details-table>
- **OCP M-CRPS** 规范：
 - <https://www.opencompute.org/wiki/Server/Working>
- **OCP Open Rack v3** 规范：
 - https://www.opencompute.org/wiki/Open_Rack/SpecsAndDesigns

行动呼吁：拓扑比较

- 谐振转换器与 **DAB**:

- Yu, Sheng-Yang 等。“使用 SiC FET 设计高功率、双向交流/直流电源。”德州仪器 (TI) 电源设计研讨会 SEM2400, 文献编号 SLUP399, 2020。

<https://www.ti.com/seclit/ml/slup399/slup399.pdf>

- 谐振转换器与 **PSFB**:

- Gillmor, Colin。德州仪器 (TI) 视频库中的“用于高功率直流/直流转换的 PSFB 和 FB-LLC 比较”。

- 第 1 部分 : <https://www.ti.com/video/5979520091001>
- 第 2 部分 : <https://www.ti.com/video/5980232599001>
- 第 3 部分 : <https://www.ti.com/video/5980257698001>
- 第 4 部分 : <https://www.ti.com/video/5980260615001>
- 第 5 部分 : <https://www.ti.com/video/5980344049001>
- 第 6 部分 : <https://www.ti.com/video/5980375024001>

行动呼吁：PSFB 工作原理和整流器

- **PSFB 工作原理以及如何实现 PSFB 软开关：**
 - Sabate, J.A., et al. “Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter.” In Proc.APEC, 1990, pp. 275-284.
- **PSFB 输出整流器：**
 - Balogh, Laszlo. “倍流整流器：推挽和桥式转换器的替代整流技术。”德州仪器 (TI) 应用手册，文献编号 SLUA121。 <https://www.ti.com/cn/lit/an/sl原因121/sl原因121.pdf>

行动呼吁：PSFB 钳位选项

- 无源钳位：
 - Lin, Song-Yi, et al. “Analysis and design for RCD clamped snubber used in output rectifier of phase-shift full-bridge ZVS converters.” In IEEE Transactions on Industrial Electronics 45, no. 2 (April 1998), pp. 358-359.
- 初级钳位：
 - Redl, Richard. “Optimum ZVS Full-Bridge DC/DC Converter with PWM Phase-Shift Control: Analysis, Design Considerations, and Experimental Results.” In Proc. APEC, 1994, pp. 159-165, vol. 1.
- 有源钳位：
 - Yu, Sheng-Yang 等。“借助 PSFB 转换器中的有源钳位实现高转换器效率。”德州仪器 (TI) 模拟设计期刊，文献编号 SLYT835，2023 年第 1 季度。
<https://www.ti.com/cn/lit/an/slyt835/slyt835.pdf>

行动呼吁：PSFB 控制和设计示例

- **PSFB 控制：**

- Wang, Shi-song, et al. “Small-Signal Modeling of Phase-Shift Full-Bridge Converter with Peak Current Mode Control.” 2020 IEEE ASEM, Tianjin, China, 2020, pp. 1-2.
- Ahmed, M.R., et al. “Enhanced Models for Current-Mode Controllers of the Phase-Shifted Full Bridge Converter with Current Doubler Rectifier.” In IEEE ECCE Asia 2019, pp. 3271-3278.
- Vlatkovic V., et al. “Small-signal analysis of the phase-shifted PWM converter.” Published in IEEE Transactions on Power Electronics 7, issue 1 (January 1992): pp. 128-135.
- Basso, Christophe. “Transfer Functions of Switching Converters.” Faraday Press, 2021.

- **设计示例：**

- 具有有源钳位的 3kW（400V 至 12V）相移全桥参考设计：
<https://www.ti.com.cn/tool/cn/PMP23126>
- 具有有源钳位的 3kW（400V 至 54V）相移全桥参考设计：
<https://www.ti.com.cn/tool/cn/PMP22951>



© Copyright 2024 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

This material is provided strictly “as-is,” for informational purposes only, and without any warranty.
Use of this material is subject to TI’s **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)

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