

# 電源供應設計研討會

## 相位轉換全橋式轉換器基礎

作者

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



# 課程大綱

- 為什麼選用相位轉換全橋式 (PSFB) ?
  - 電源趨勢與軟性切換轉換器的需求
  - PSFB 目標應用
- PSFB 運作和設計考量
  - PSFB 是如何運作的？又如何進行軟性切換？
  - PSFB 的輸出整流器類型
  - 輸出整流器的電壓突波與鉗位選項
  - 電壓模式與峰值電流模式控制
  - 運作的同步整流 (SR) 模式
  - 輕載管理
- PSFB 設計範例
- 摘要

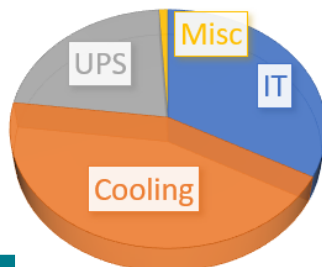
# 為什麼要用 PSFB ?

# 電源趨勢

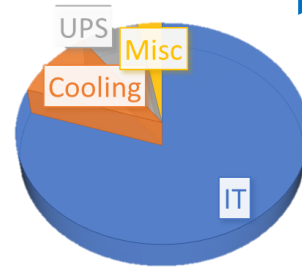
- 尺寸小、輕負載且高效率的系統頗有需求
- 80 Plus 認證與開放運算計劃 (OCP) 模組化硬體系統通用冗餘電源供應器 (M-CRP) 規格能提升效率



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

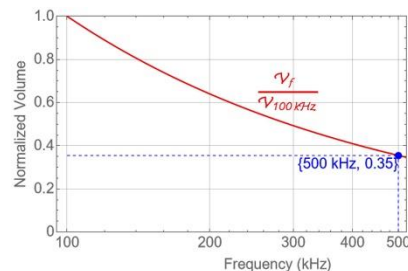


電源使用效率 (PUE) : 3



PUE : 1.25

不同負載的效率	10% 負載	20% 負載	50% 負載	100% 負載	備註
80 Plus 鈦金	90%	94%	96%	91%	230-V <sub>AC</sub> 的輸入
M-CRPS (<2,500 W)	90%	94%	96%	92%	240-V <sub>AC</sub> 的輸入
M-CRPS (≥2,500 W)	90%	94%	96%	94%	240-V <sub>AC</sub> 的輸入



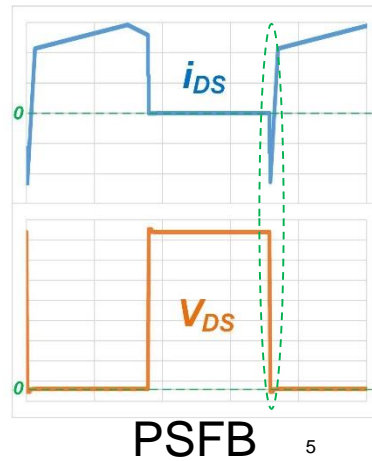
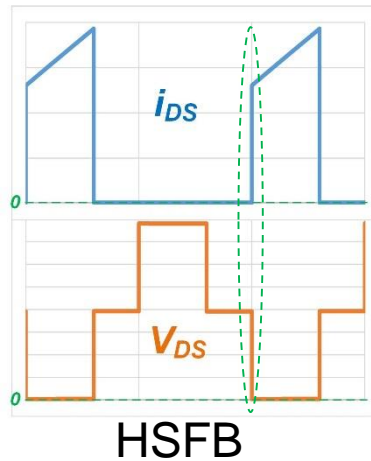
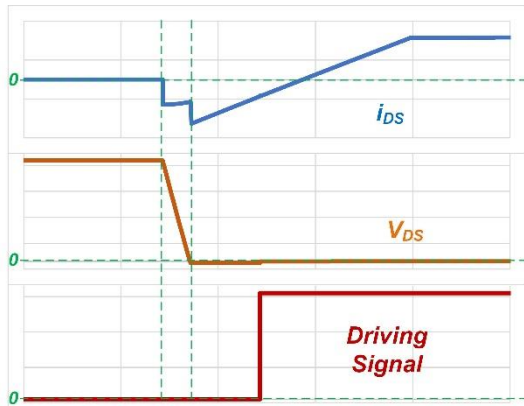
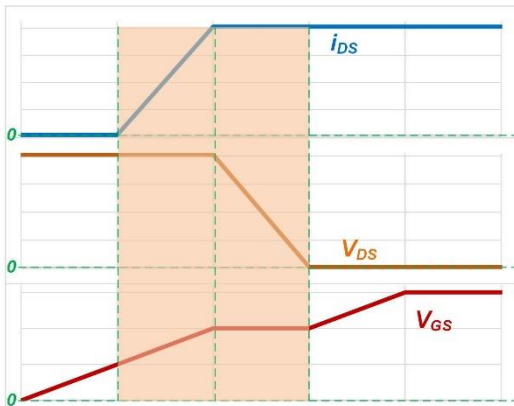
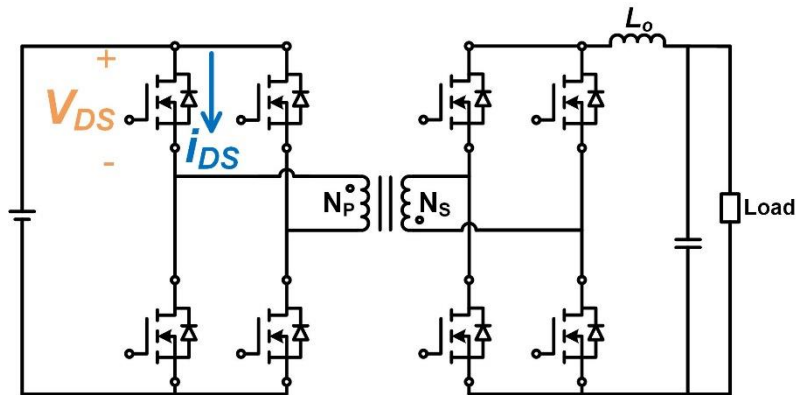
# 軟性切換的動機

- 硬性切換開啟

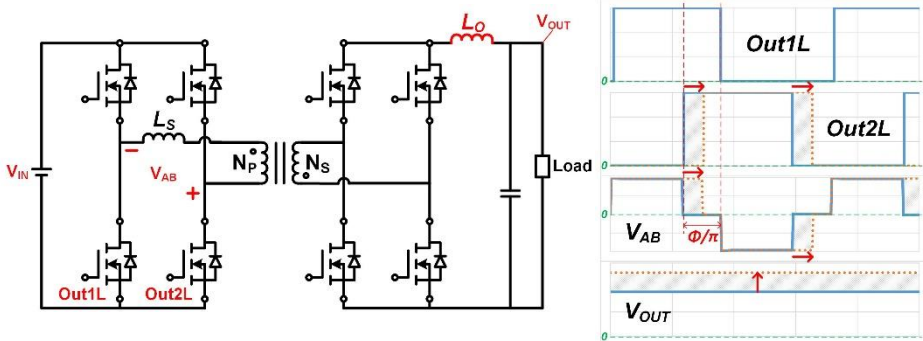
- 開啟時的 MOSFET 電流/電壓重疊
- 開啟速度 ( $t_{on}$  losses) 的取捨與切換節點暫態電壓 ( $dV/dt$ ) (EMI 雜訊)
- 例如：硬性切換全橋轉換器 (HSFB)

- 軟性切換開啟

- 先放出 MOSFET  $V_{DS}$ ，再應用  $V_{GS}$
- 開啟速度對高效率而言並非關鍵
- 允許更高的  $F_{sw}$

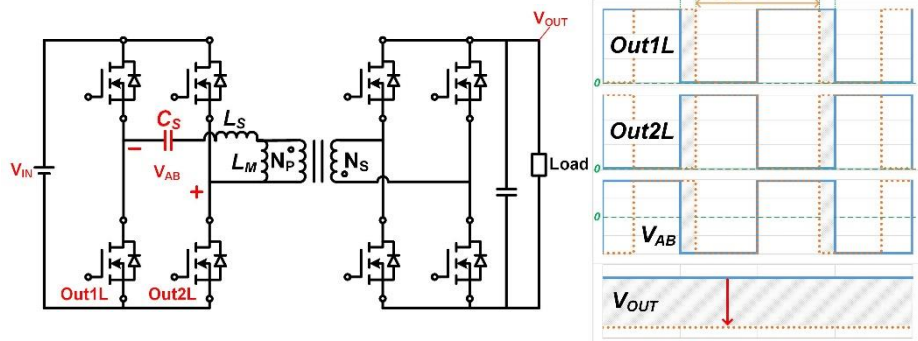


# 拓撲比較：PSFB 與 LLC



## PSFB 轉換器

- 使用了儲存在  $L_S$  和  $L_O$  的能源，實現零電壓切換 (ZVS)
- 針對不同的  $V_{OUT}/V_{IN}$  增益，變更相位角度
- 競爭優勢
  - 更快速的暫態響應
  - 適用電壓運作範圍廣泛
  - 固定頻率，輕鬆進行 SR 控制
- 劣勢
  - 整流器反向復原
  - 在輕負載下，一次側的 ZVS 損耗
  - 更高的整流器電壓應力

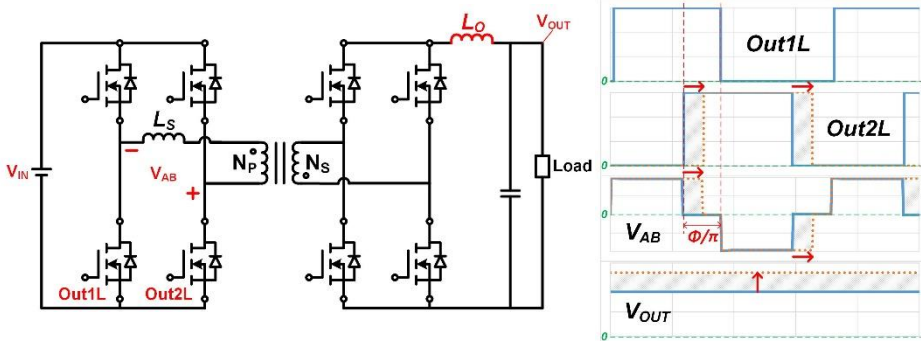


## LLC 串聯共振轉換器

- 使用了儲存在  $L_M$  的能源，實現 ZVS
- 針對不同的  $V_{OUT}/V_{IN}$  增益，變更  $F_{sw}$
- 競爭優勢
  - 在  $F_{sw} \leq f_r$  時，在輸出整流器上進行軟性切換
  - 在  $f_{sw} \approx f_r$  時，效率更高
- 劣勢
  - 二次側 RMS 電流變大
  - 更不容易進行 SR 控制
  - 限制運行範圍

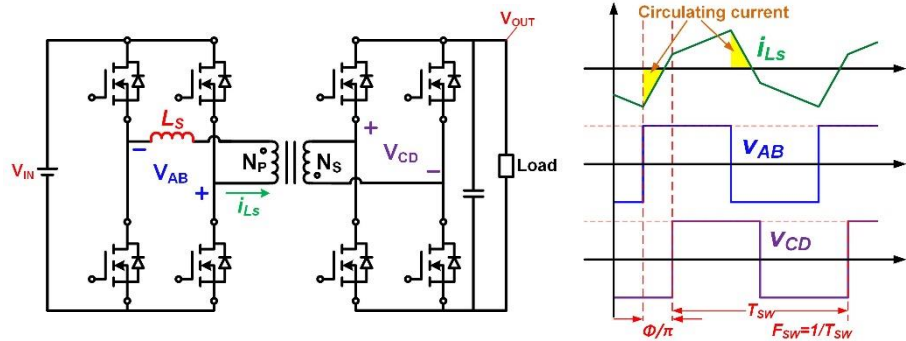
串聯共振  $f$

# 拓撲比較：PSFB 與 DAB



## PSFB 轉換器

- 使用了儲存在  $L_S$  和  $L_O$  的能源，實現 ZVS
- $V_{OUT}/V_{IN}$  增益：由一次側半橋式之間的相位角決定
- 比雙主動橋式 (DAB) 更低的輸出漣波電流
- 更高的輸出整流器應力



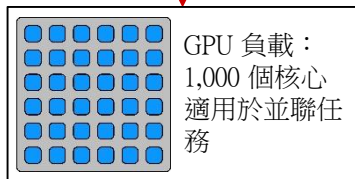
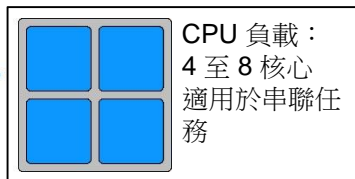
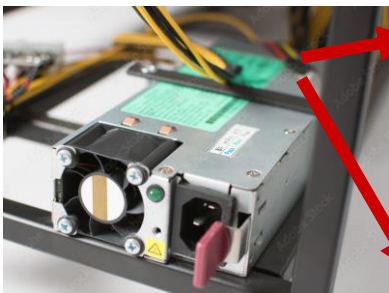
## DAB 轉換器

- 使用了儲存在  $L_S$  的能源，實現 ZVS
- $V_{OUT}/V_{IN}$  增益：由變壓器繞組之間的相位角決定
- 具單相移控制的大循環電流
- 應用多相移控制能降低循環電流
- 輸出漣波電流高於 PSFB



# PSFB 目標應用

- 適合 PSFB 的應用：
  - 快速瞬態需求
    - 在伺服器電源供應單元 (PSU) 12-V 匯流排和圖形處理單元 (GPU) 負載下，電流變化率  $\geq 10 \text{ A}/\mu\text{s}$
  - 輸入/輸出範圍廣泛
    - 高功耗電池應用



電動車電池：  
250 V 至  
450 V



車用電池：  
9 V 至 16 V，  
最高 300 A

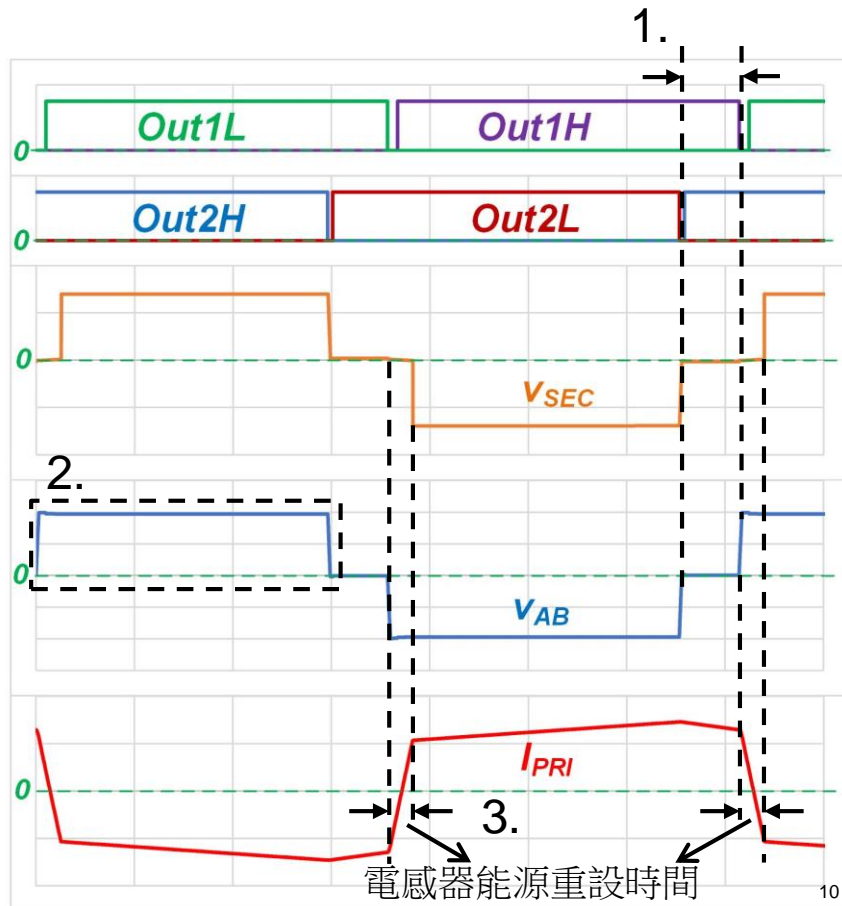
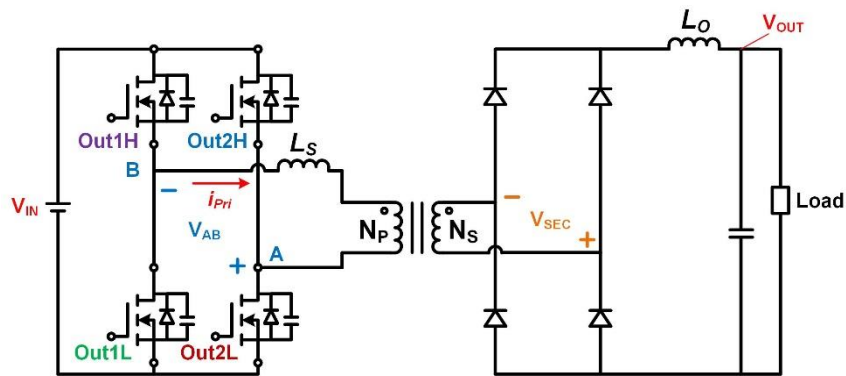




# 軟性切換與運作

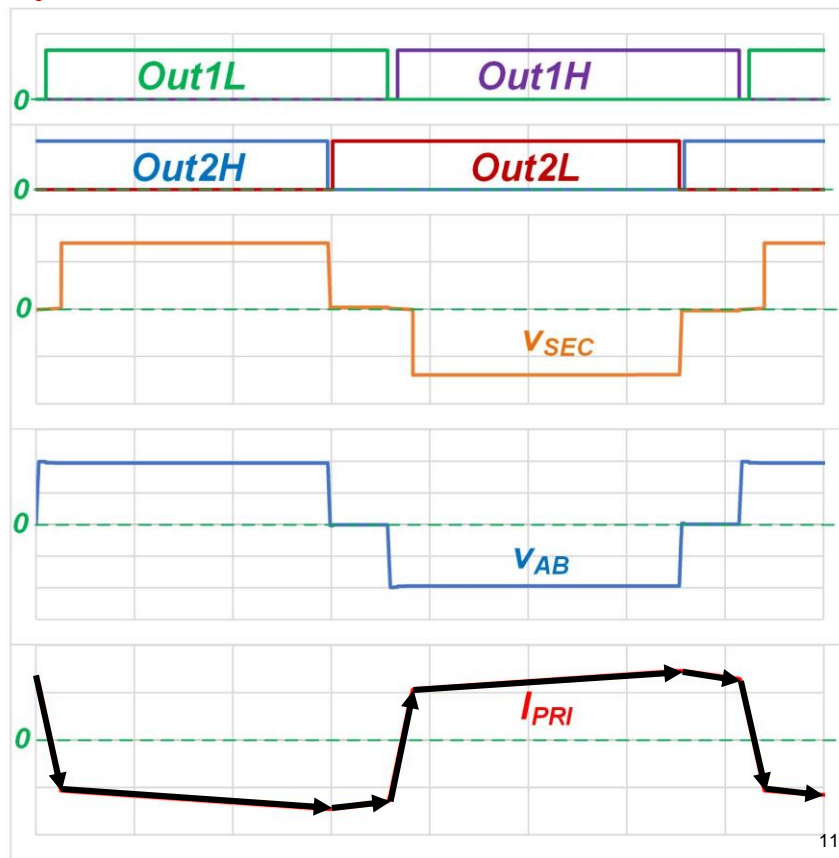
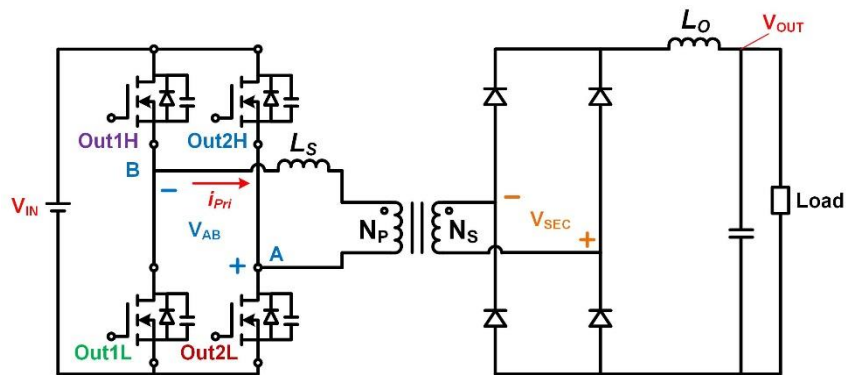
# PSFB 如何發揮作用？

1. 藉由相移，控制非零電壓變壓器脈寬
2. 在輸出級降壓操作，以進行調節
3. 工作週期損耗限制有限的工作週期



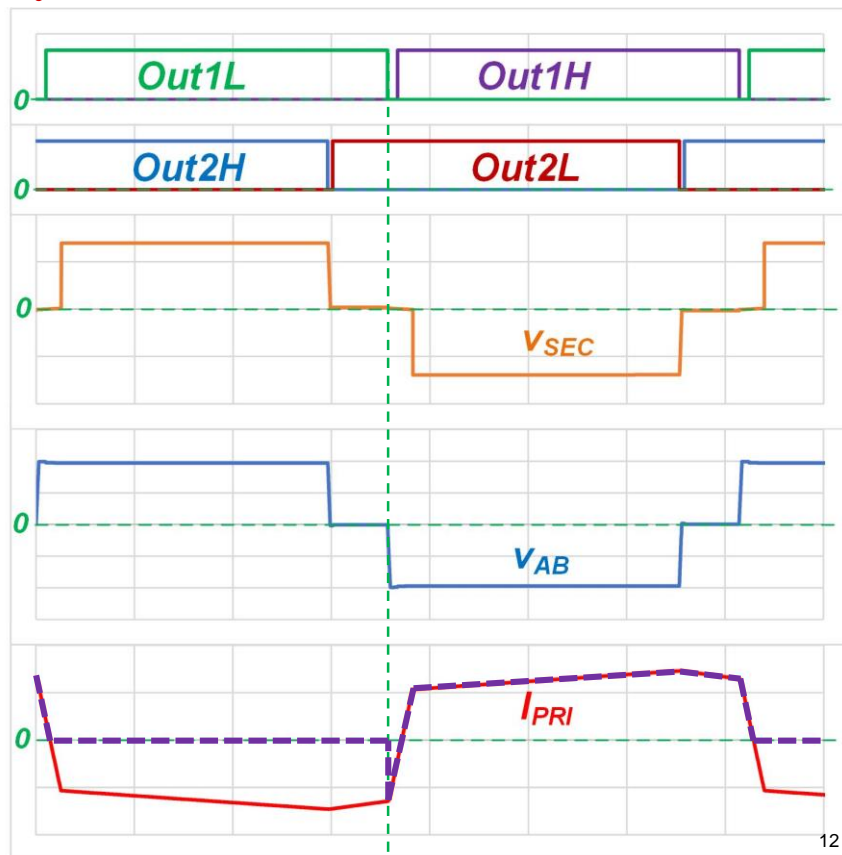
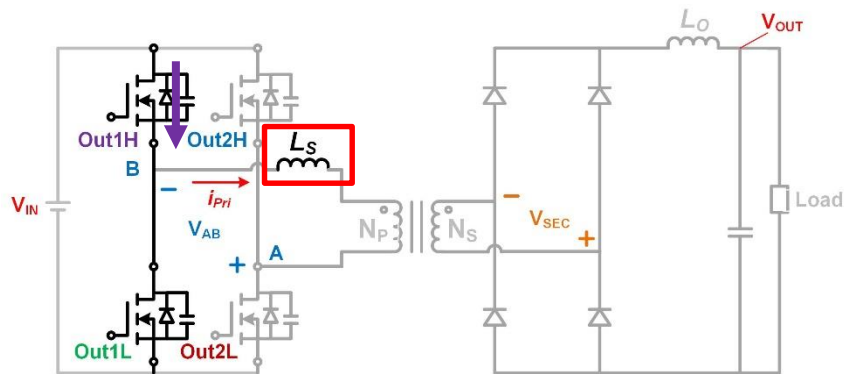
# PSFB 是如何進行軟性切換的？

- 允許飛輪電流
  - $L_S$  和  $L_O$  能量可用於 ZVS



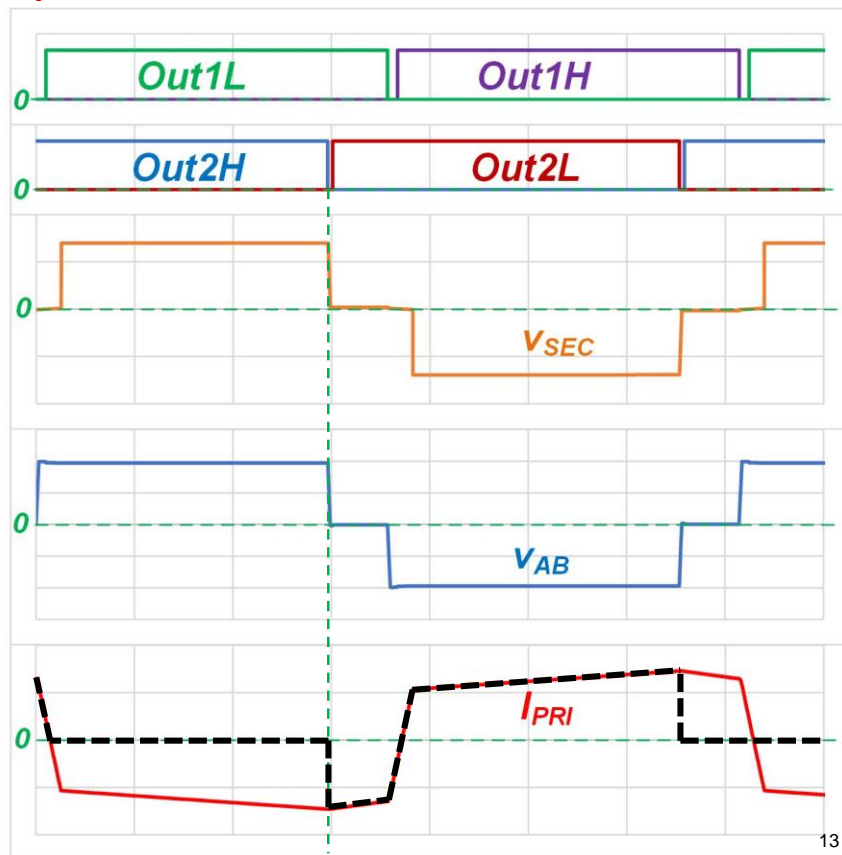
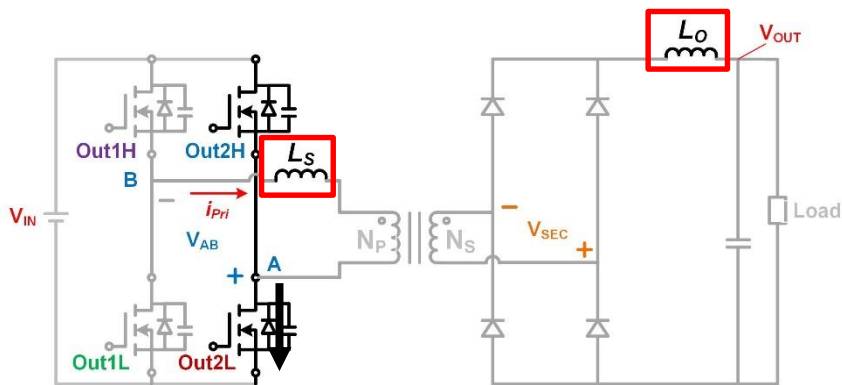
# PSFB 是如何進行軟性切換的？

- 允許飛輪電流
  - $L_S$  和  $L_O$  能量可用於 ZVS
- 第 1 段 ZVS：主要仰賴  $L_S$



# PSFB 是如何進行軟性切換的？

- 允許飛輪電流
  - $L_S$  和  $L_O$  能量可用於 ZVS
- 第 1 段 ZVS：主要仰賴  $L_S$ 
  - 在輕負載的情況下，容易**損耗** ZVS
- 第 2 段 ZVS：同時需要  $L_S$  and  $L_O$ 
  - 在輕負載的情況下，容易**維持** ZVS

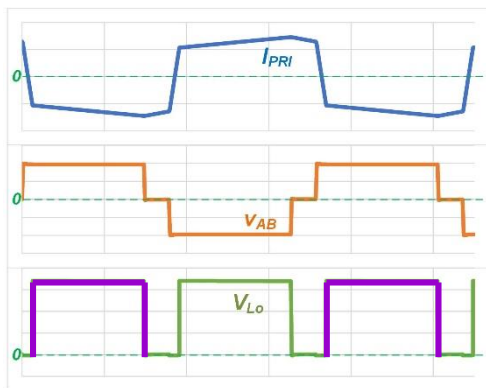


# 整流器與箝位

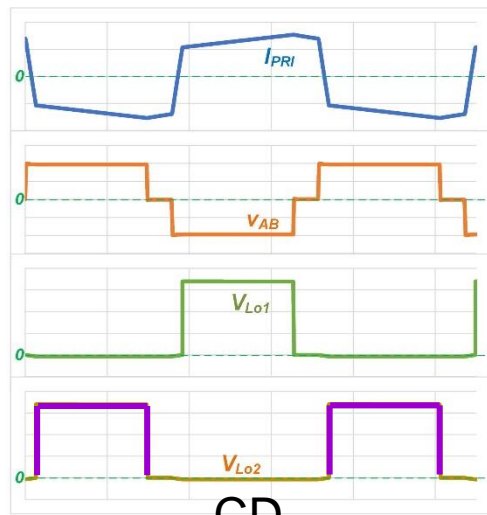


# PSFB 的輸出整流器

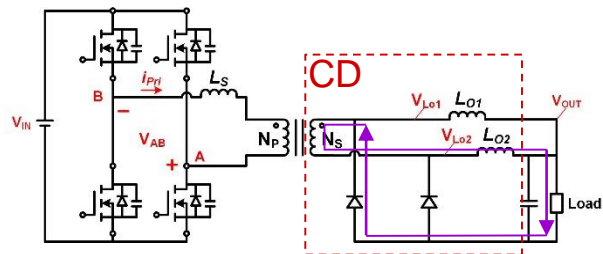
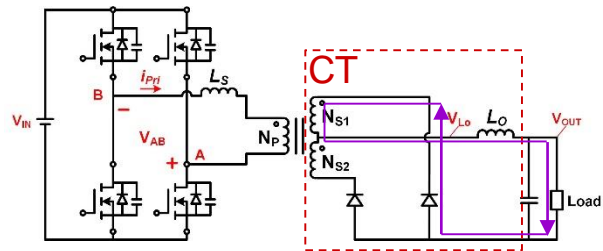
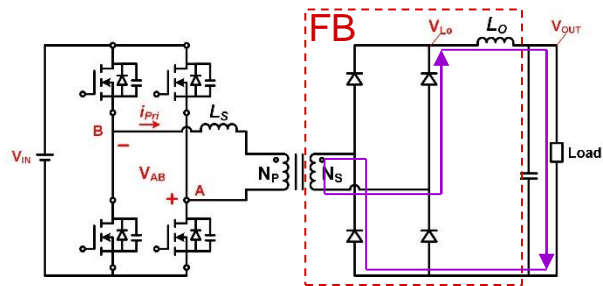
- 有三個類型的整流器：
  - 全橋式 (FB) 整流器
  - 中心分接 (CT) 整流器
  - 電流倍增器 (CD) 整流器



FB 和 CT

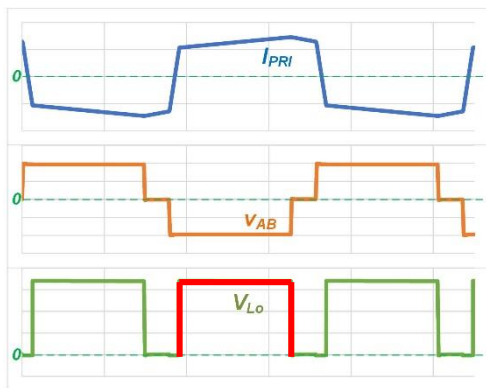


CD

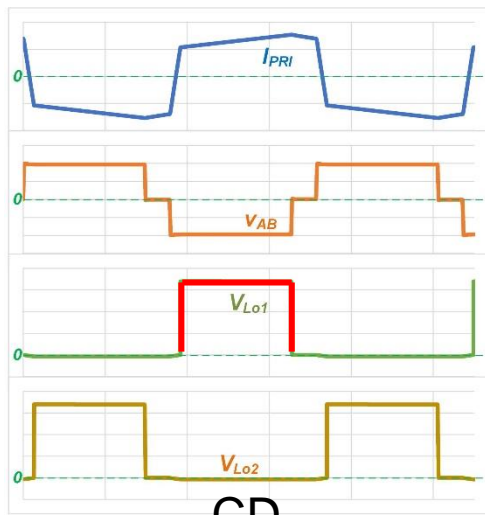


# PSFB 的輸出整流器

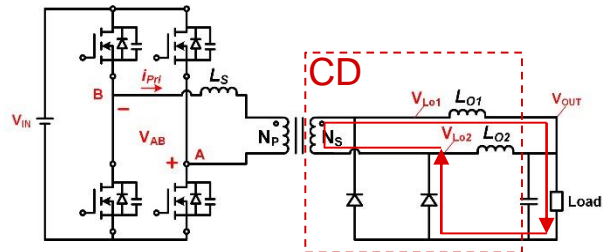
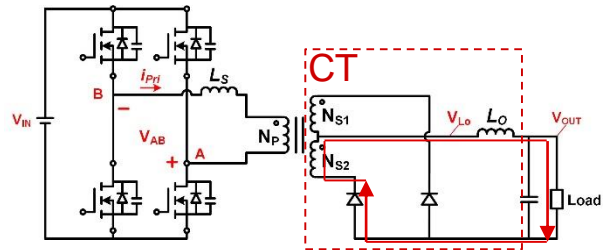
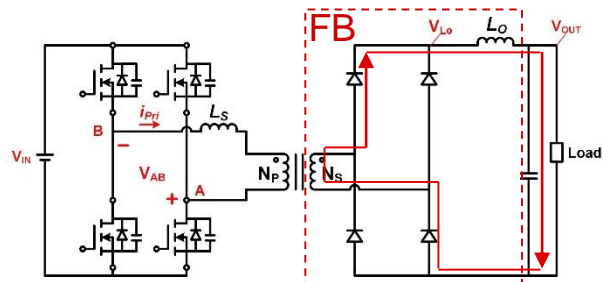
- 三個類型的整流器：
  - 全橋式 (FB) 整流器
  - 中心分接 (CT) 整流器
  - 電流倍增器 (CD) 整流器



FB 和 CT

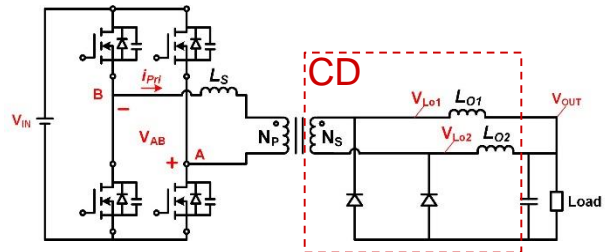
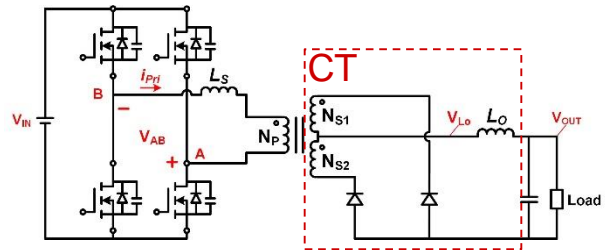
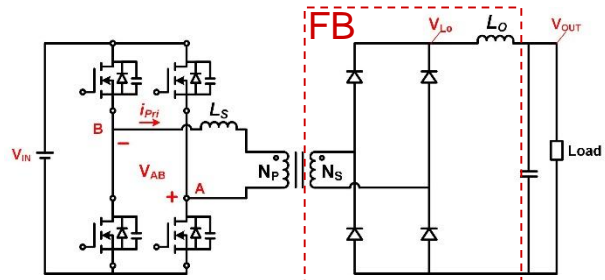
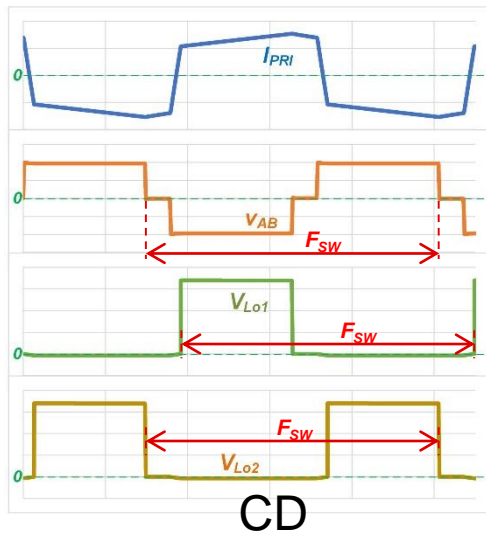
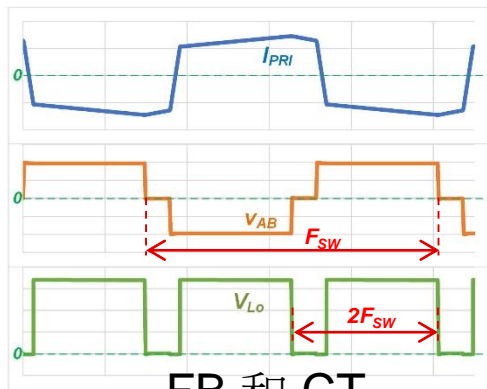


CD



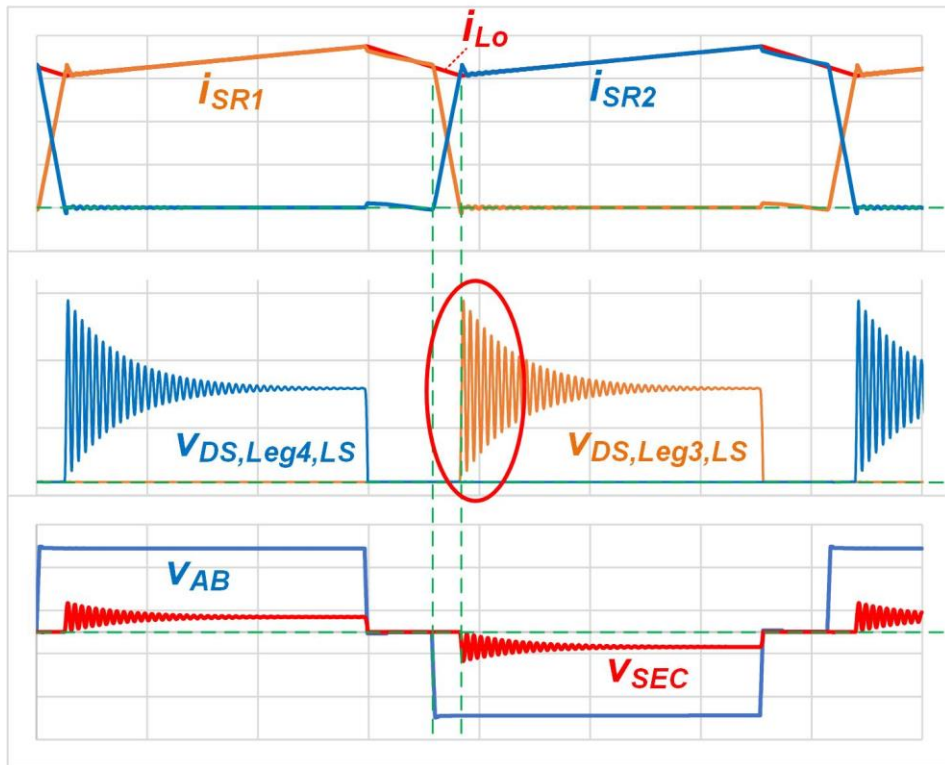
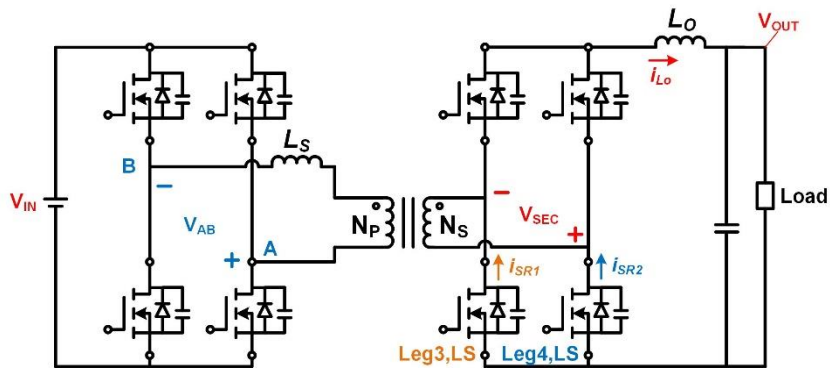
# PSFB 的輸出整流器

類型	電感器 $F_{SW}$	D 範圍	$N_s$	Rec	$L_o$	特徵
FB	$2 \times F_{SW, PRI}$	0-100%	1	4	1	變壓器使用率更高、適用於高 $V_o$
CT	$2 \times F_{SW, PRI}$	0-100%	2	2	1	元件數量最少、變壓器使用率較低
CD	$1 \times F_{SW, PRI}$	<b>0-50%</b>	1	2	<b>2</b>	變壓器使用率更高、半 $i_{L_o}$



# 輸出整流器的電壓突波

- 變壓器繞組串聯電感器與整流器  $C_{OSS}$  共振
- 電壓峰值能與  $2V_{IN} \frac{N_S}{N_P}$  一樣高



# 箝位整流器電壓突波：被動式

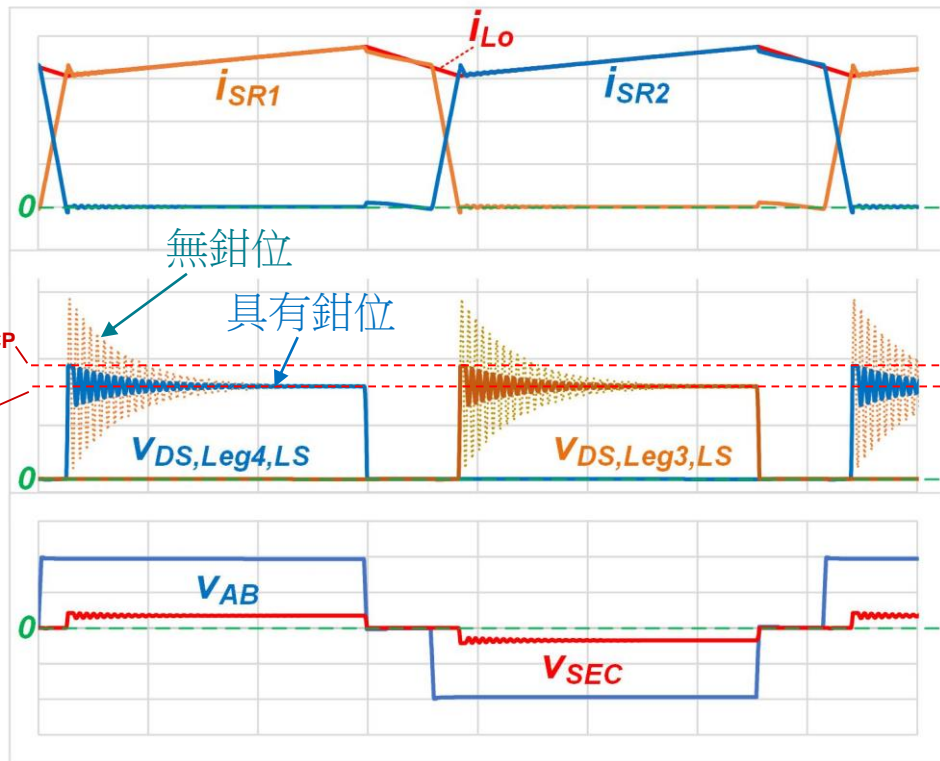
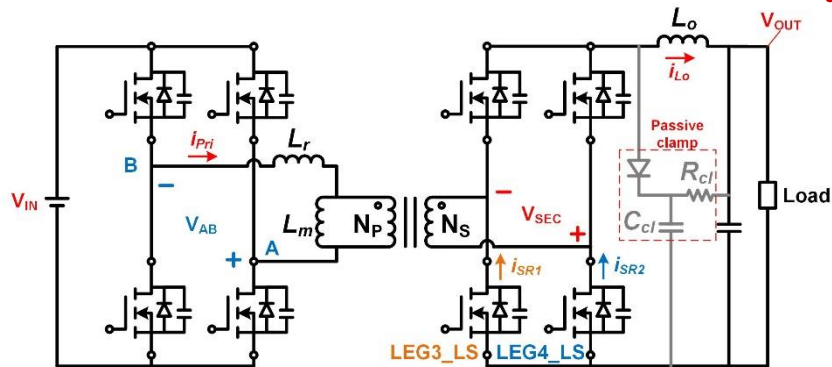
- $C_{clamp}$  是理想的電壓來源

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

- 箝位電阻器耗散

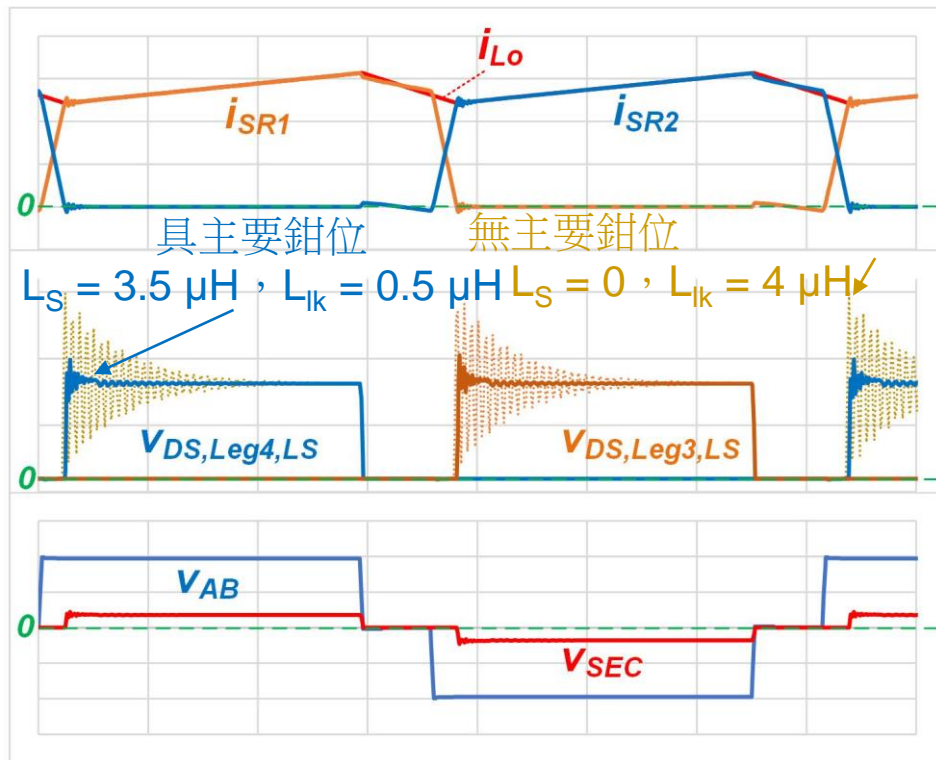
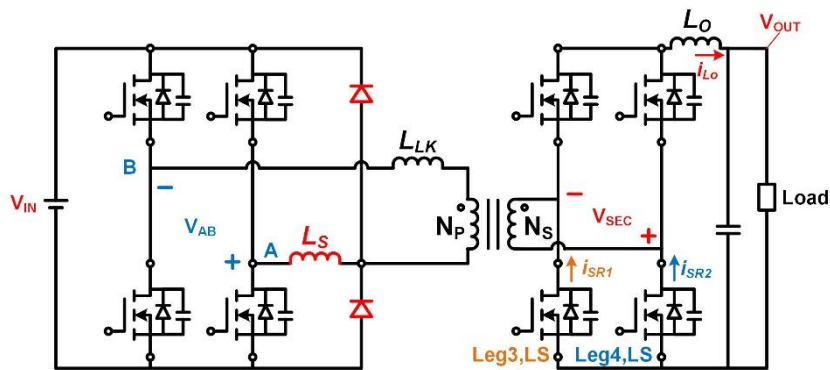
$$P_{R_{cl}} = \frac{(V_{CP} - V_{OUT})^2}{R_{cl}}$$

$R_{cl}$  變小  $\Rightarrow V_{CP}$  降低  $\Rightarrow P_{R_{cl}}$  變大



# 箝位整流器電壓突波：主要鉗位

- 優點：
  - 允許  $L_S$  能量回收
  - 允許耦合穩定的變壓器繞組，以降低整流器的電壓應力
- 缺點：
  - 需要額外二極體與離散串聯電感器，才能進行 ZVS

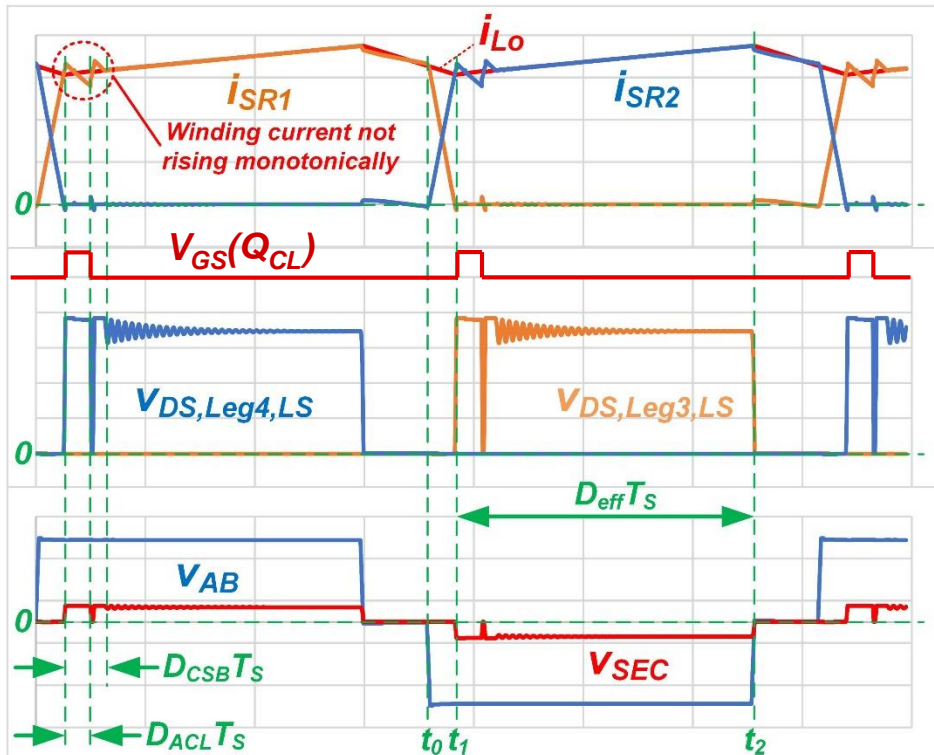
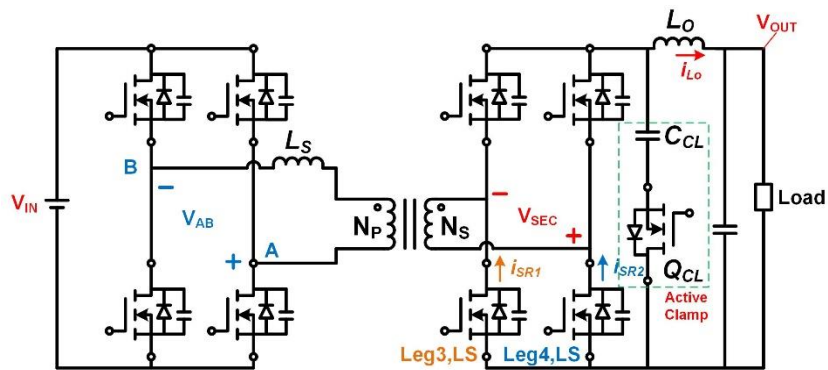




# 箝位整流器電壓突波：主動箝位

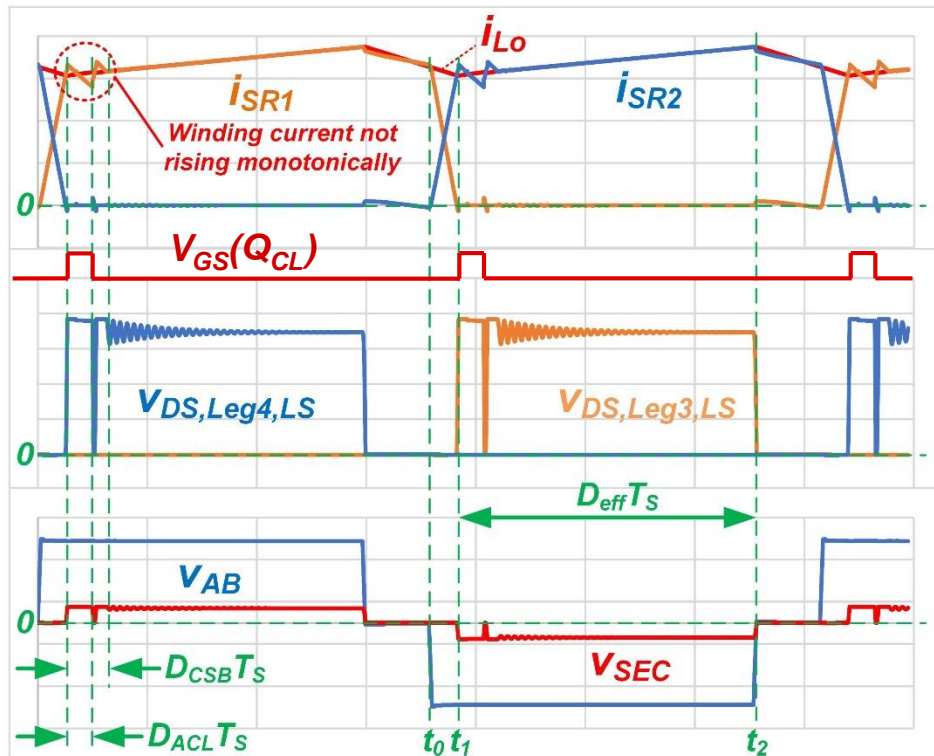
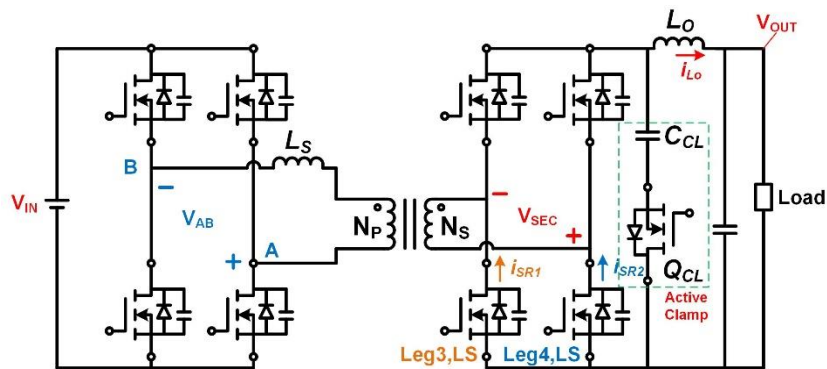
- $t_1$  後，開啟  $Q_{CL}$ ，允許整流器電壓箝制  $V_{CCL}$
- 相對低漣波電壓的  $C_{CL}$  尺寸電容：

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



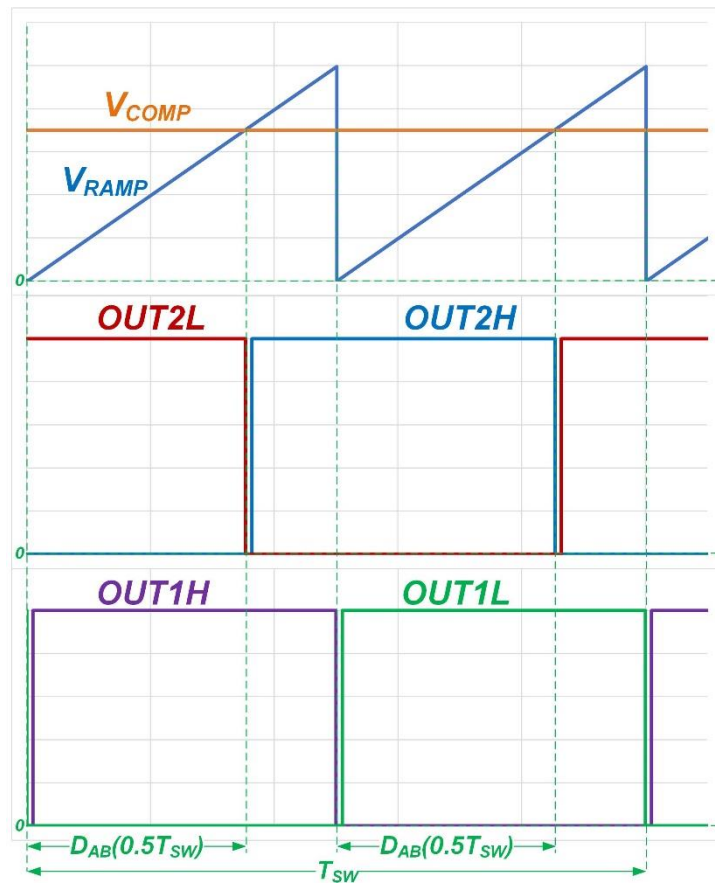
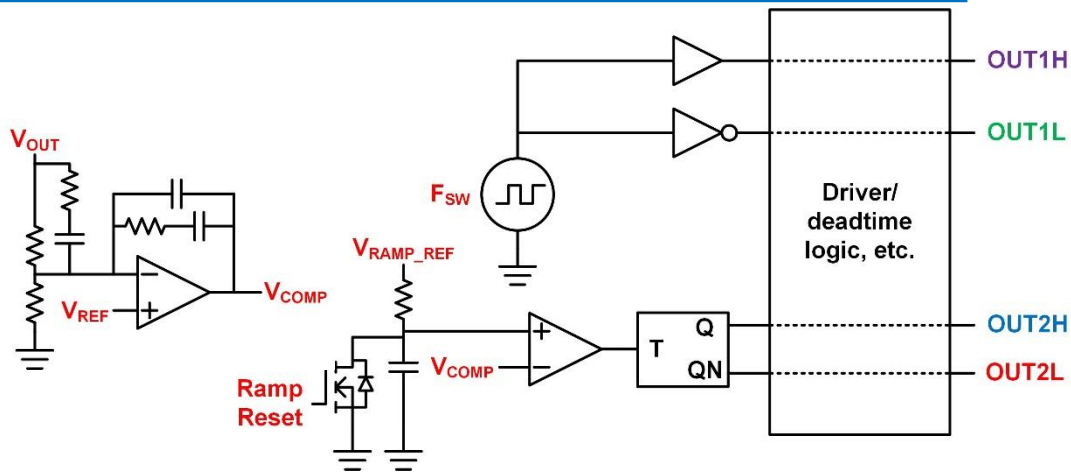
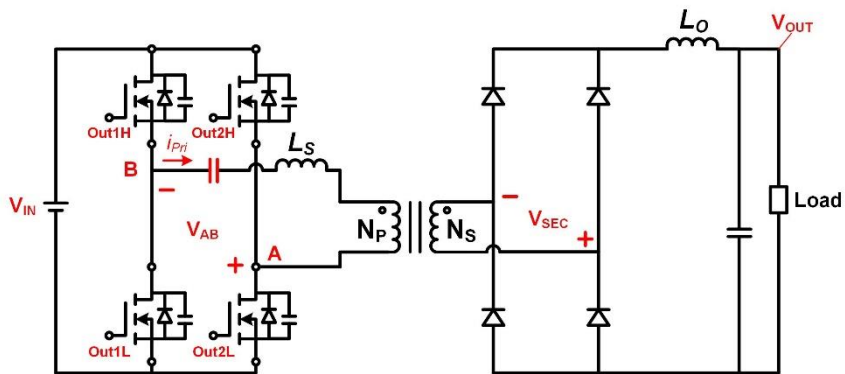
# 箝位整流器電壓突波：主動箝位

- 在  $i_{PRI}$  and  $i_{SR}$  建立電流失真
  - 增加峰值電流模式控制的難度
- $Q_{CL}$  只需要導通非常短的時間即可箝位
  - 更長的  $D_{ACL}T_S \Rightarrow$  更大的  $i_{CL}$  以及更寬廣的非單調電流持續時間

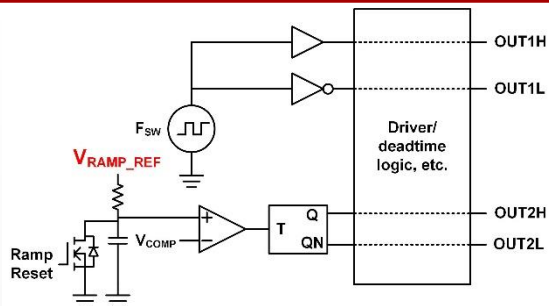


# 控制

# PSFB 控制

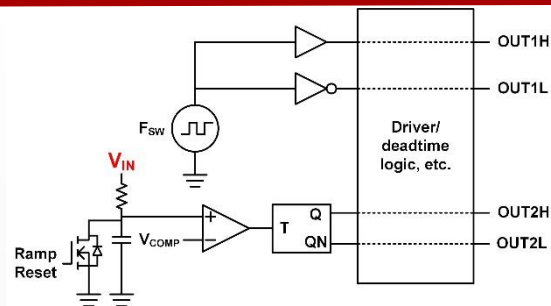


# PSFB 控制模式



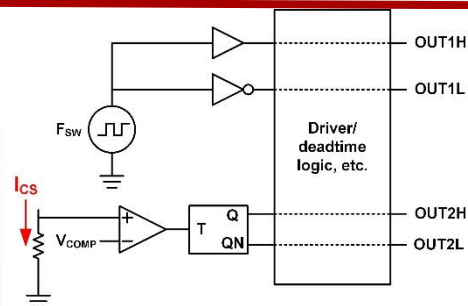
## 電壓模式控制

- 時脈以切換頻率直接控制一對高側/低側對
- 第二對高側/低側對則由 T 正反器控制



## 有前饋的電壓模式控制

- 斜升電壓參考由  $V_{IN}$  或是與  $V_{IN}$  成正比的電壓提供
- 對輸入電壓變化的立即反應

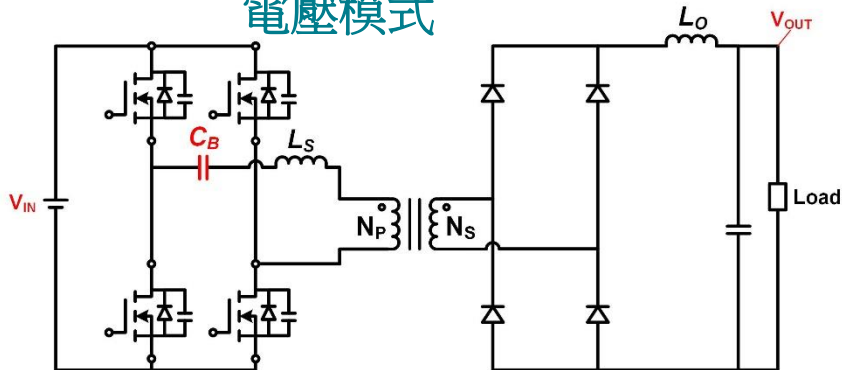


## 峰值電流模式控制

- 功率級的電流資訊會取代斜率訊號
- 電流感測 (CS) 電阻兼放大器或 CS 變壓器常見方法

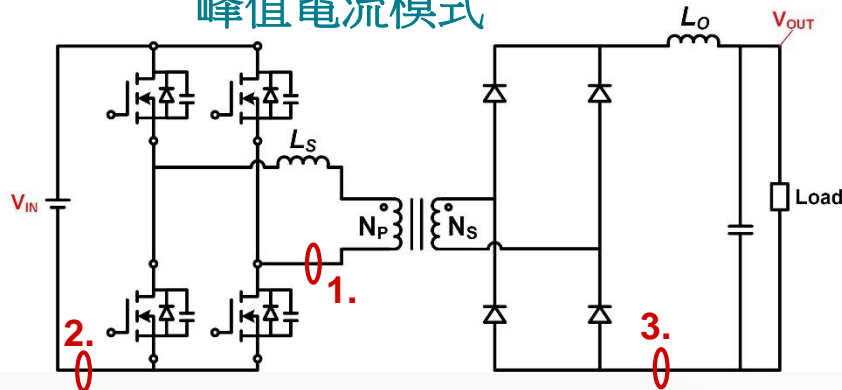
# 電壓模式與峰值電流模式

## 電壓模式



- 需要 DC 阻隔電容器  $C_B$  來防止變壓器飽和
- 阻隔電容器會增加 PSU 面積與 SR 的電壓應力

## 峰值電流模式

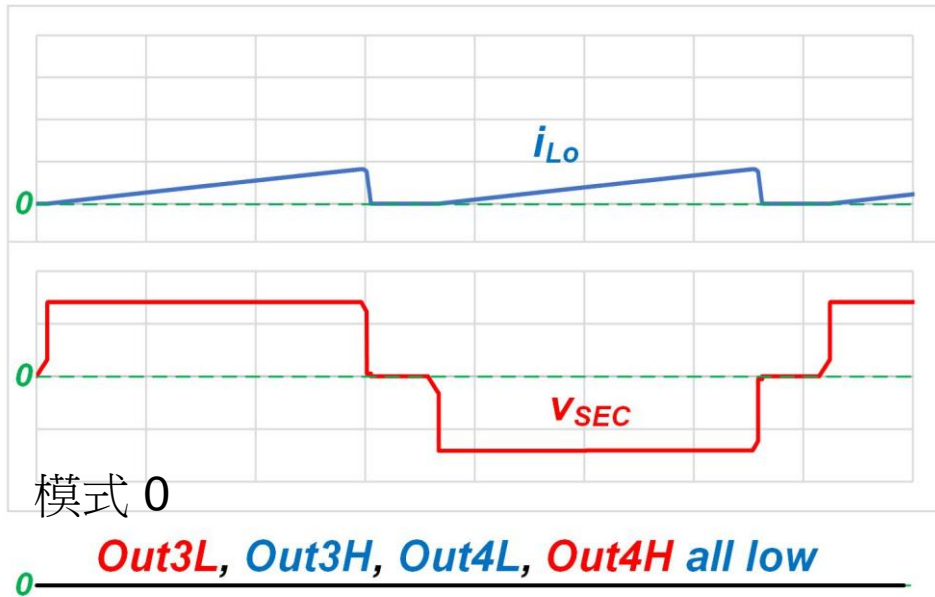
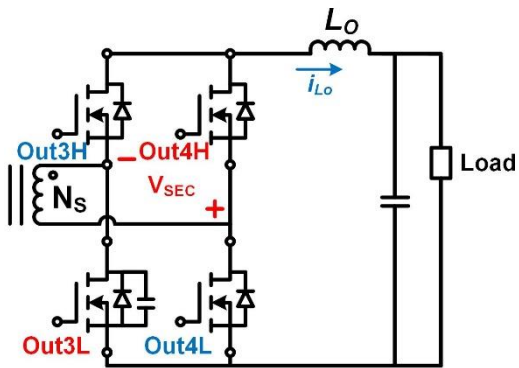


1.
  - CS 變壓器核心會自動重設
  - 不含 DC 電流資訊
2.
  - 重設 CS 變壓器會更困難
  - 寄生迴路電感更高
3.
  - 電阻器搭配 CS 放大器很常見
  - 缺少磁化電流資訊



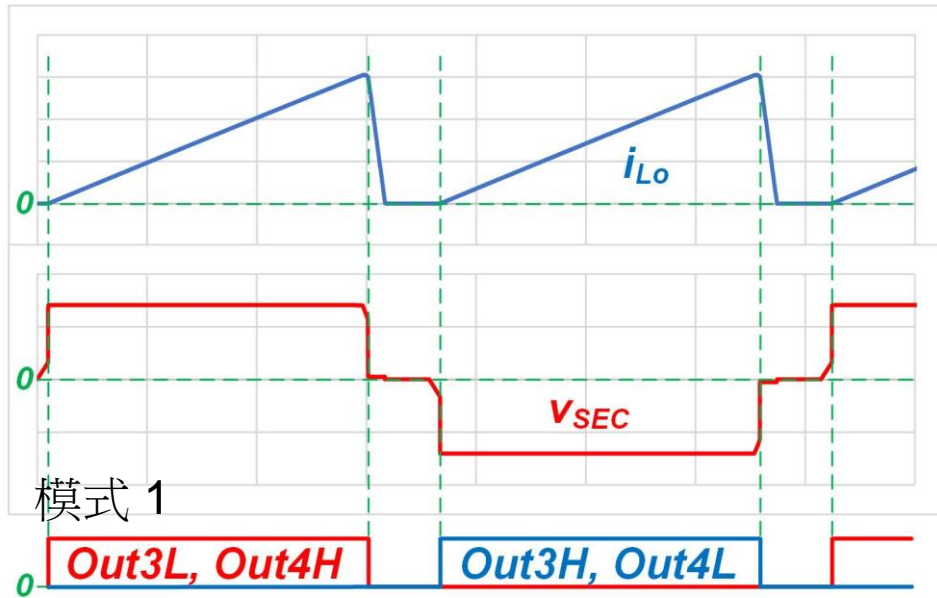
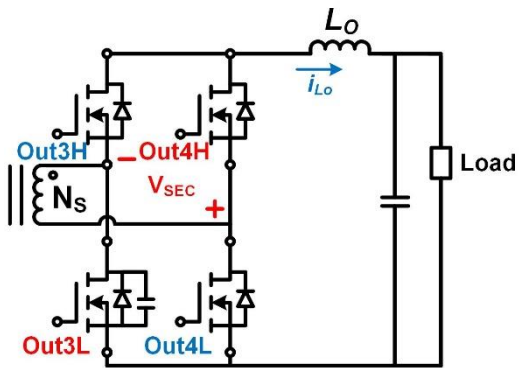
# PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 0：二極體傳導 (非連續傳導模式 [DCM])



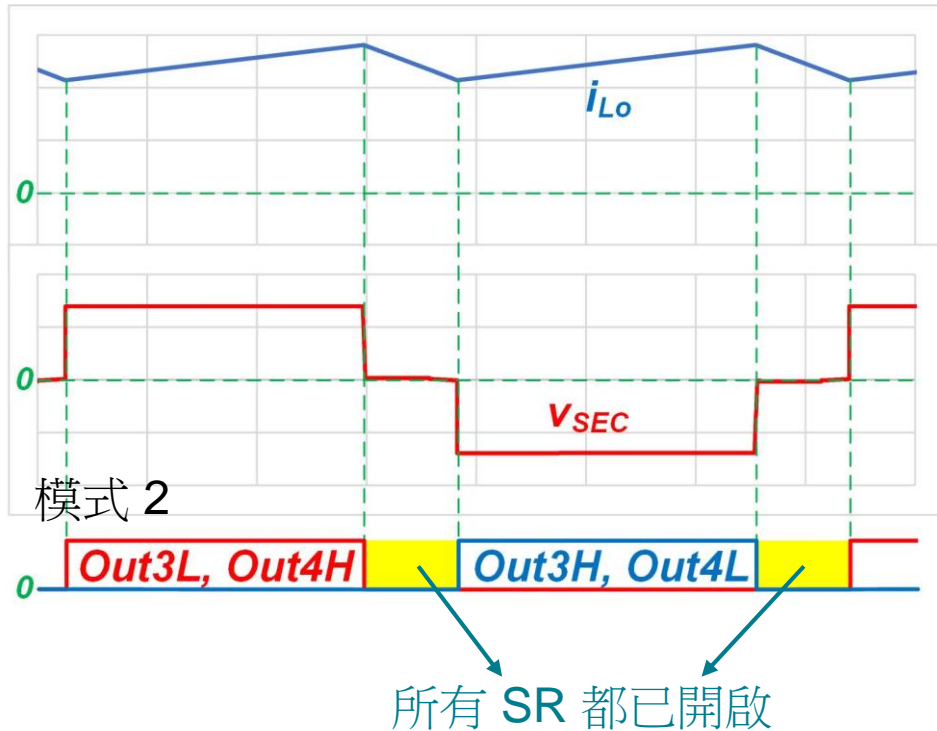
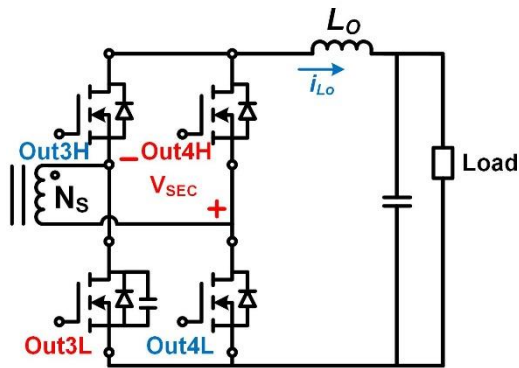
# PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 1：僅限電感器充電期間的 SR 通道傳導
  - 避免反向電流傳導



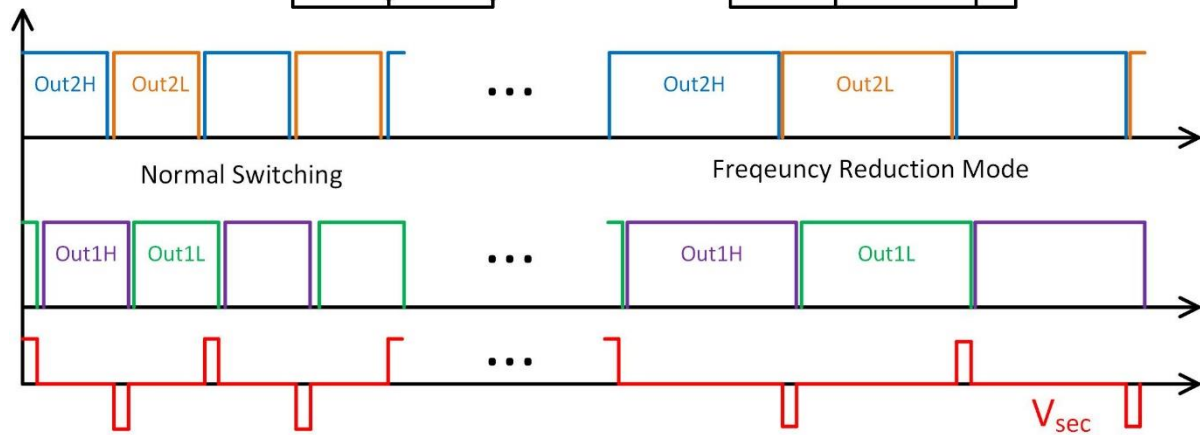
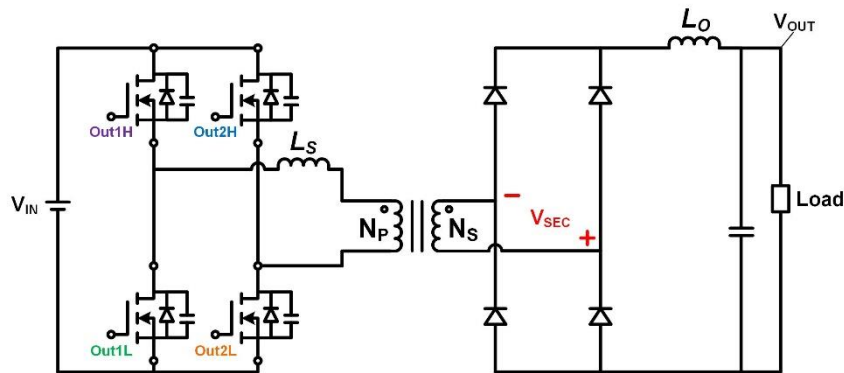
# PSFB 中 SR 的不同模式

- 模式 2：在飛輪持續時間裡，開啟所有整流器/FET
  - 在高負載下，傳導損耗較低



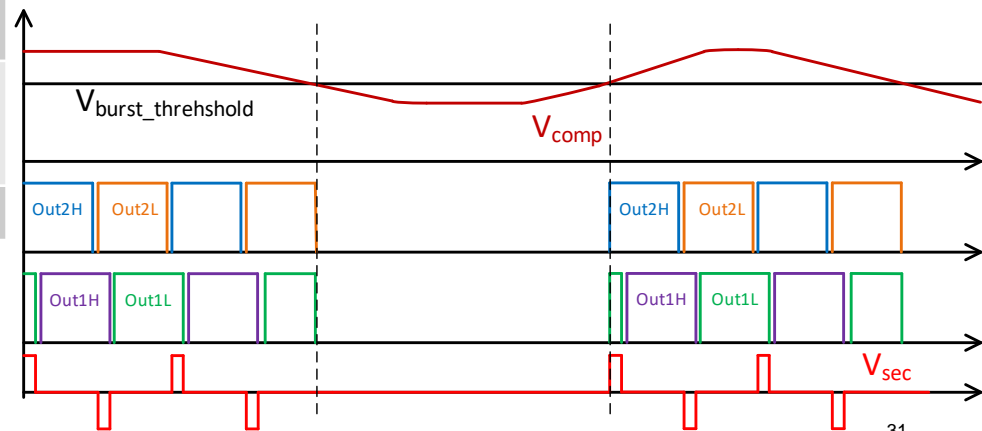
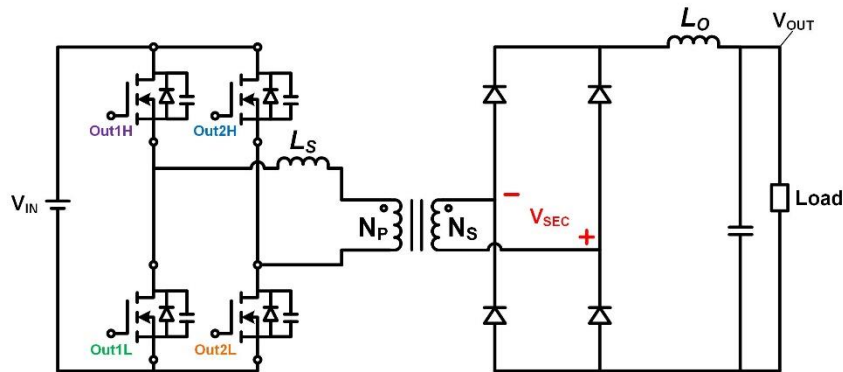
# 輕載管理：頻率調降模式

- PSFB 持續切換
- 能減少有效工作週期，同時維持最低開啟時間
- 不建議使用閘極驅動器變壓器 (飽和)



# 輕載管理：磁滯叢發模式

- $V_{comp} < V_{burst\_threshold}$  閾值後，PSFB 會停止切換
- $V_{comp} > V_{burst\_threshold}$  閾值後，PSFB 會持續切換



31

# PSFB 設計範例

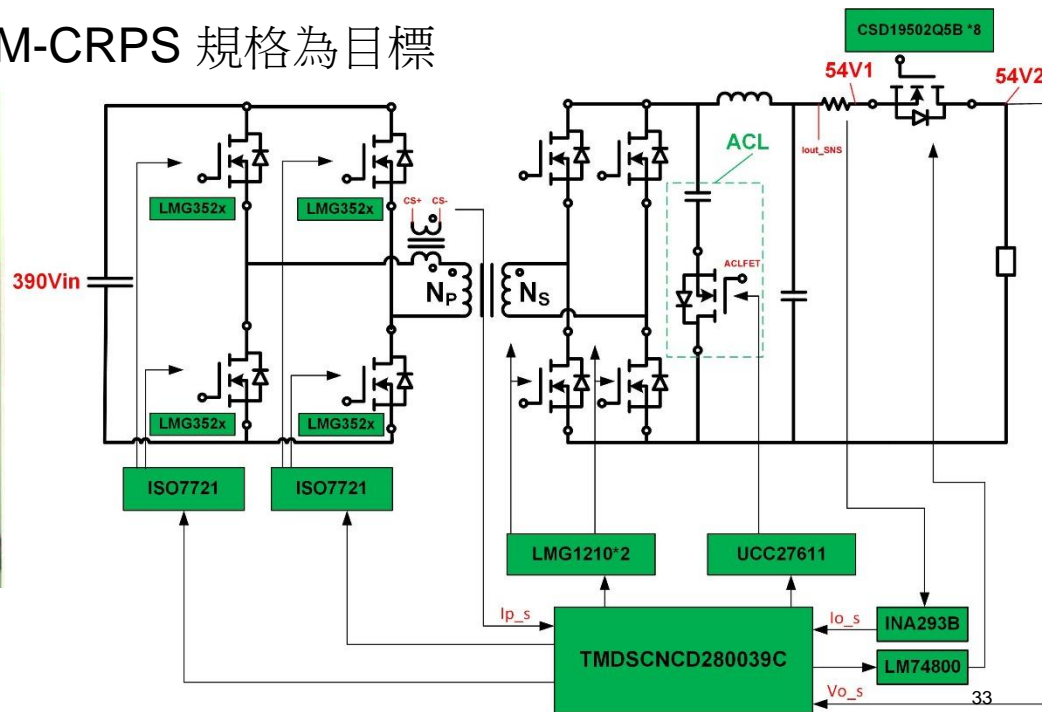


# PSFB 設計範例：PMP22951

- 輸入電壓：390 V<sub>nom</sub>、340 V<sub>min</sub>
- 輸出：最高 54-V/3-kW，以 OCP M-CRPS 規格為目標

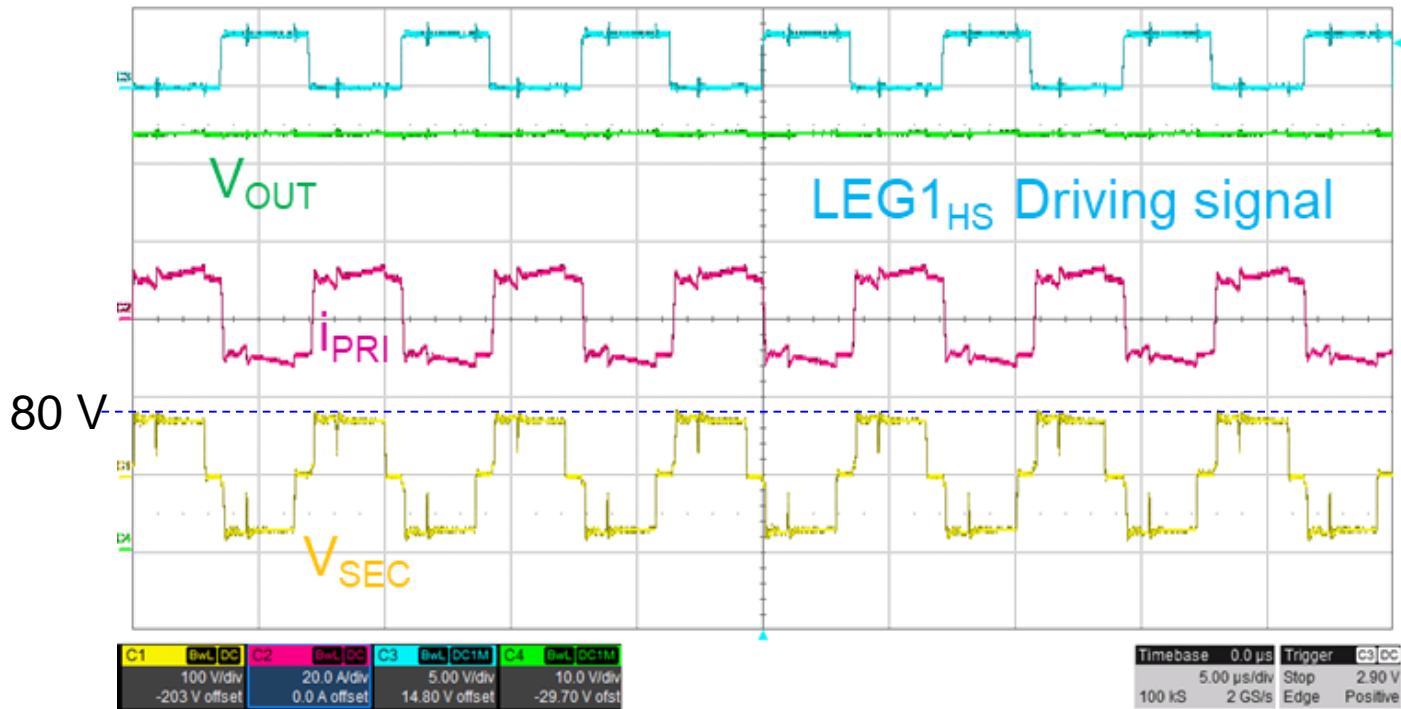


具有主動鉗位參考設計的 54-V、3-kW 相移式全橋



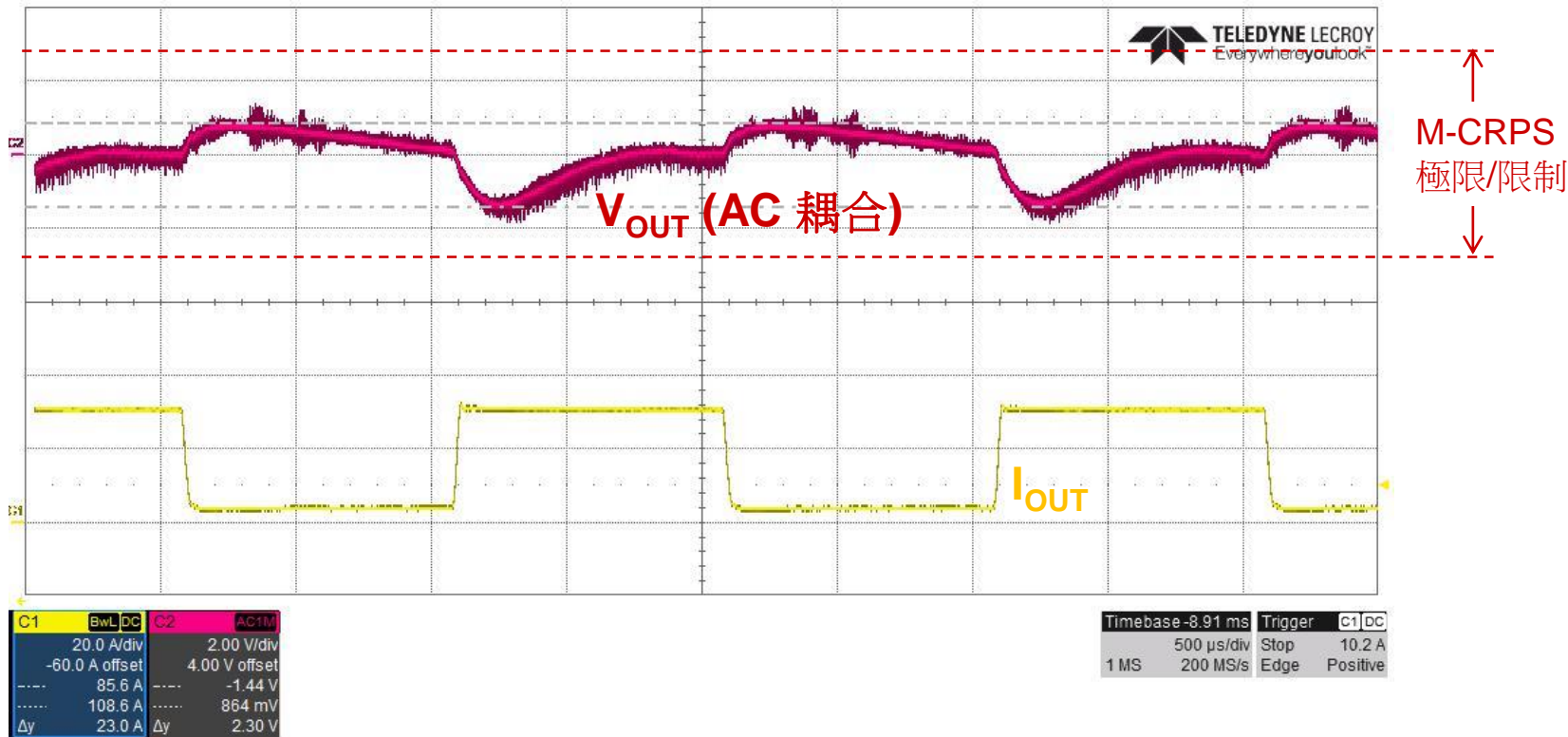
# 3-kW 穩定狀態波形

- 140-kHz 運算

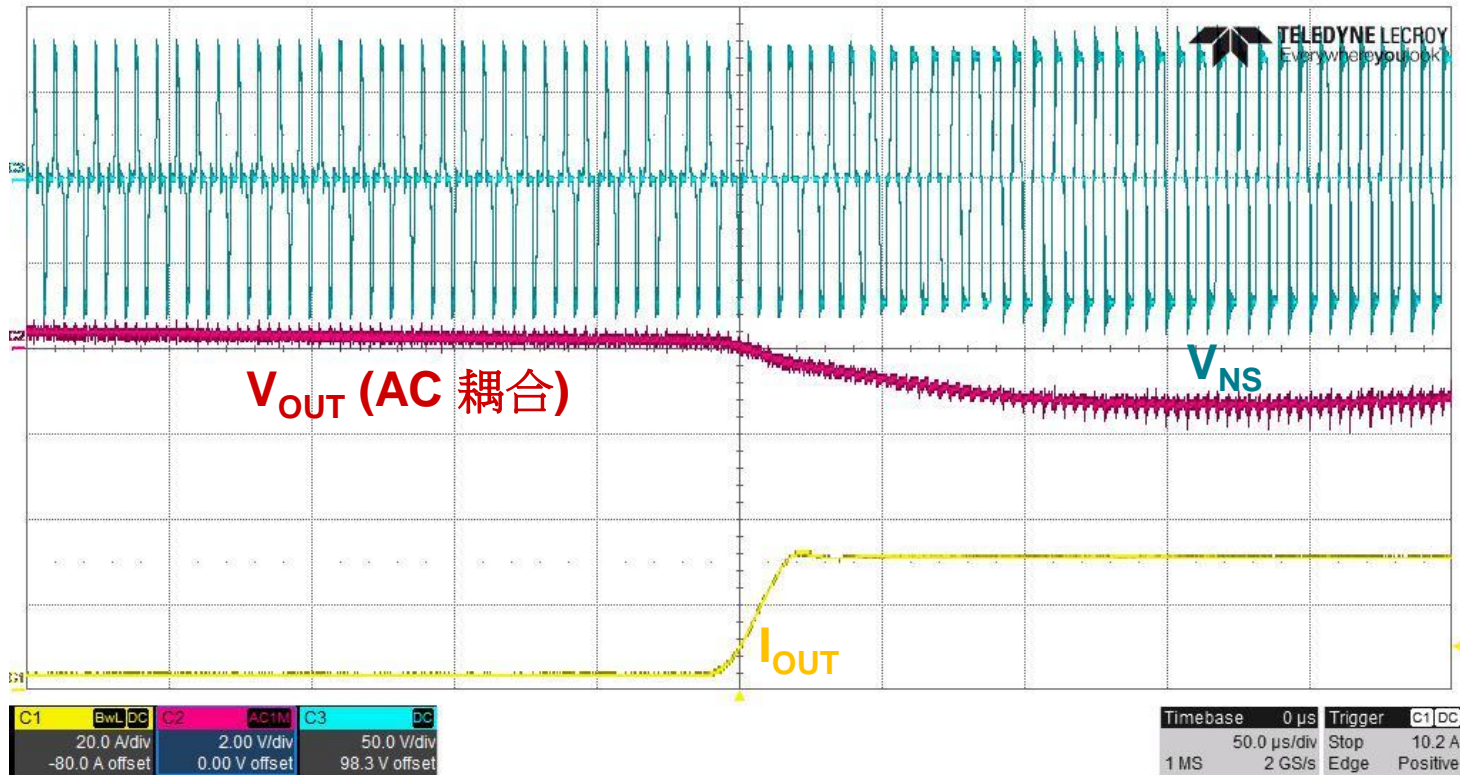


# M-CRPS 負載瞬態，50% 負載步進 (3 A 至 31 A)

負載電流



# M-CRPS 負載瞬態，50% 負載步進 (3 A 至 31 A)



# 摘要

- PSFB 非常適合需要廣泛輸入/輸出電壓範圍與快速負載暫態響應的應用
- PSFB 和其他隔離拓撲的特性
- PSFB 操作原理
- 討論不同類型的整流器、整流器鉗位選項與控制模式
- 展示符合 M-CRPS 規格的 PSFB 參考設計，具有主動箝位
- 下列投影片的號召行動

# 號召行動：電源趨勢與規格

- 電源趨勢：
  - Yin, Richard。「用電訣竅 #109：伺服器電源設計的五大趨勢」EDN 用電訣竅系列文章，2022 年 8 月。<https://www.edn.com/five-major-trends-in-power-supply-design-for-servers/>
- **80 Plus** 標準：
  - <https://www.cleareresult.com/80plus/program-details#program-details-table>
- **OCP M-CRPS** 規格：
  - <https://www.opencompute.org/wiki/Server/Working>
- **OCP Open Rack v3** 規格：
  - [https://www.opencompute.org/wiki/Open\\_Rack/SpecsAndDesigns](https://www.opencompute.org/wiki/Open_Rack/SpecsAndDesigns)

# 號召行動：拓撲比較

- 共振轉換器與 **DAB**：

- Yu, Sheng-Yang 等。「用 SiC FET 設計高功率雙向 AC/DC 電源供應」德州儀器電源供應設計研討會 SEM2400，文件編號 SLUP399，2020 年。

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

- 共振轉換器與 **PSFB**：

- Gillmor, Colin。「PSFB 和 FB-LLC 用於高功率 DC/DC 轉換之比較」，德州儀器影片庫。

- 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>

# 號召行動：PSFB 運作與整流器

- **PSFB 運作**，以及進行軟性切換的方式：
  - Sabate, J.A 等。「高壓高功率全橋式零電壓切換 PWM 轉換器的設計考量」In Proc.APEC, 1990 年, 第 275-284 頁。
- **PSFB 輸出整流器**：
  - Balogh, Laszlo。「電流倍增器整流器：推拉式與橋式轉換器的替代整流技術」德州儀器應用說明，文件編號 SLUA121。<https://www.ti.com/lit/an/slua121/slua121.pdf>



# 號召行動：PSFB 鉗制選項

- 被動箝位：
  - Lin, Song-Yi, 等。「應用在相移全橋 ZVS 轉換器輸出整流器中的 RCD 箝位緩衝器之分析語設計。」《IEEE Transactions on Industrial Electronics》第 45 冊，編號 2 (1998 年 4 月)：第 358-359 頁。
- 主要鉗位：
  - Redl, Richard。「具 PWM 相移控制的最佳 ZVS 全橋式 DC/DC 轉換器：分析、設計考量與實驗結果」In Proc. 《APEC》第 1 冊，第 159-165 頁，1994 年。
- 主動箝位：
  - Yu, Sheng-Yang 等。「在 PSFB 轉換器中以主動箝位實現高轉換器效率」德州儀器 Analog Design Journal，文件編號 SLYT835，2023 年第 1 季。  
<https://www.ti.com/lit/an/slyt835/slyt835.pdf>

# 號召行動：PSFB 控制與設計範例

- **PSFB 控制：**

- Wang, Shi-song 等。「峰值電流模式控制移相全橋式轉換器的小型訊號建模」2020 年 IEEE ASEM, 中國天津, 2020 年, 第 1-2 頁。
- Ahmed, M.R. 等。「電流倍增器整流器的移相全橋式轉換器之電流模式控制器增強模型」《IEEE ECCE Asia》2019 年, 第 3271-3278 頁。
- Vlatkovic V. 等。「相移式 PWM 轉換器的小型訊號分析」出版於《IEEE Transactions on Power Electronics》第 7 冊第 1 期 (1992 年 1 月)：第 128-135 頁。
- Basso, Christophe。「切換轉換器的轉換函數」Faraday Press 出版, 2021 年。

- **設計範例：**

- 具有主動鉗位參考設計的 3-kW (400 V to 12 V) 全橋相移式轉換器：  
<https://www.ti.com/tool/PMP23126>
- 具有主動鉗位參考設計的 3-kW (400 V to 54 V) 全橋相移式轉換器：  
<https://www.ti.com/tool/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)

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated