

電源供應設計研討會

打造使用傳統升壓控制器的一次測
調節反馳式轉換器

作者

Jiri Panacek



課程大綱

- 返馳式轉換器
 - 基礎
 - 二次側調節 (Secondary-side regulation, SSR) 與一次側調節 (primary-side regulation, PSR) 的比較
- PSR
 - 詳細了解輔助繞組波型
 - 三種不同 PSR
 - 問題聲明
- 使用 LM5156-Q1 升壓控制器的設計範例
 - 概述輸入數據與可行性檢查
 - 處理回饋
 - 進一步最佳化 (人工負載、電流感測、緩衝器)
- 結論與其他材料

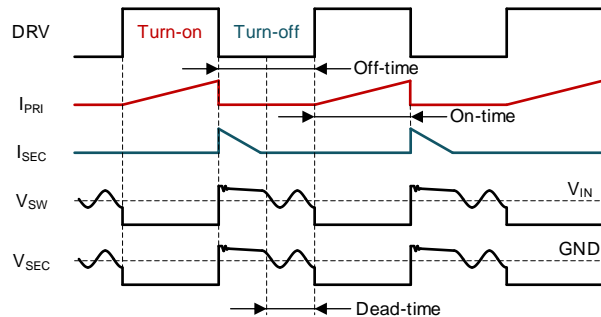
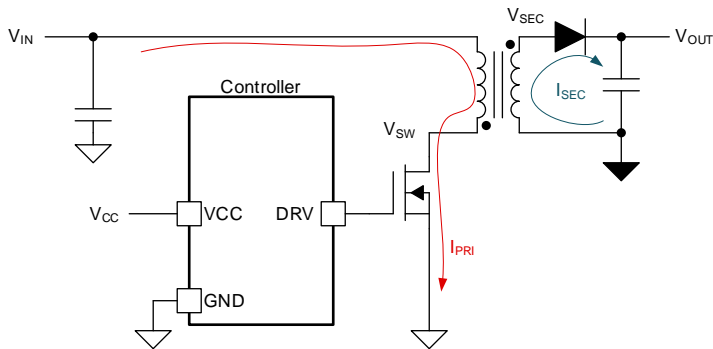
返馳式轉換器

開啟

- 開關傳導：主要電流 (I_{PRI}) 將能源儲存在耦合電感器
- 二次側整流器為反向極化 (二次電壓 [V_{SEC}] < 0)
- 耦合電感器儲存能量

關斷

- 開關開啟；磁化耦合電感器改變極性 ($V_{SEC} > 0$)
- 二次電流 (I_{SEC}) 流過次級繞組並為負載供電



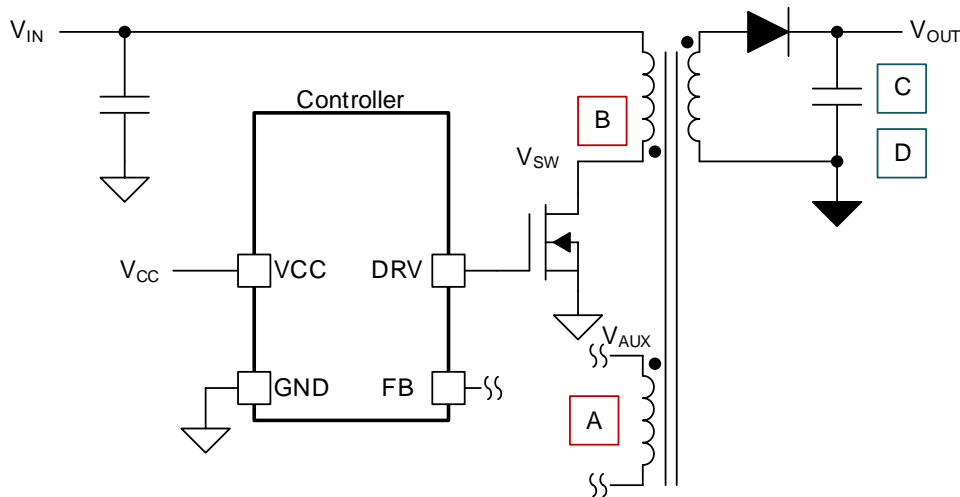
反馳式轉換器回饋

PSR 感測

- 感應整個輔助繞組 (A)
- 感應開關節點的反射電壓 (B)

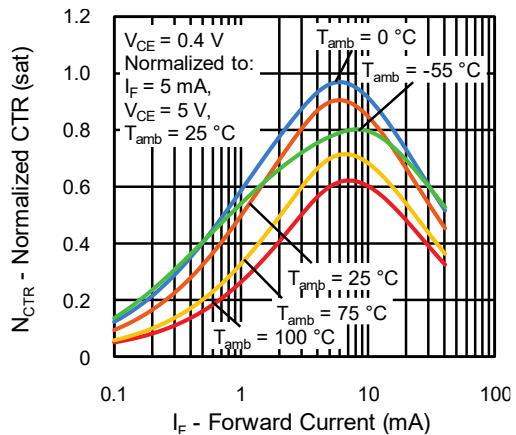
SSR 感測

- 使用電阻分壓器(C)
- (非隔離式拓撲)
- 使用光耦合器 (D)

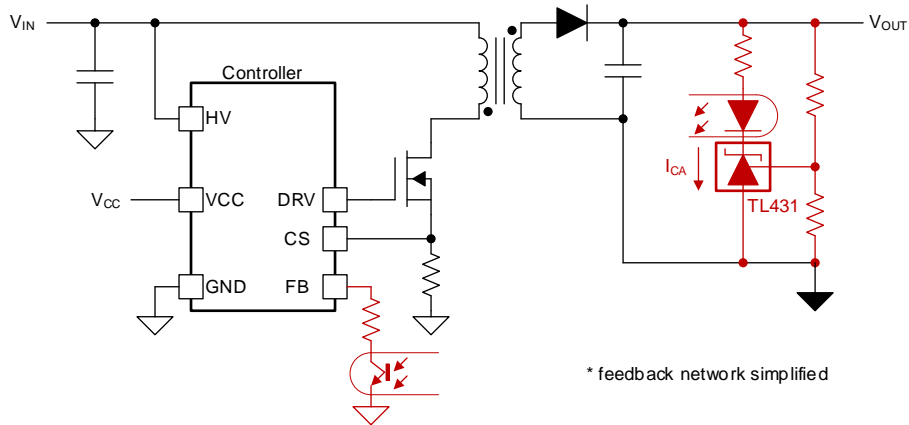


關閉迴路：SSR

- 431 型分流穩壓器感應輸出，並透過光耦合器調整電流



來源：Vishay 應用說明 45

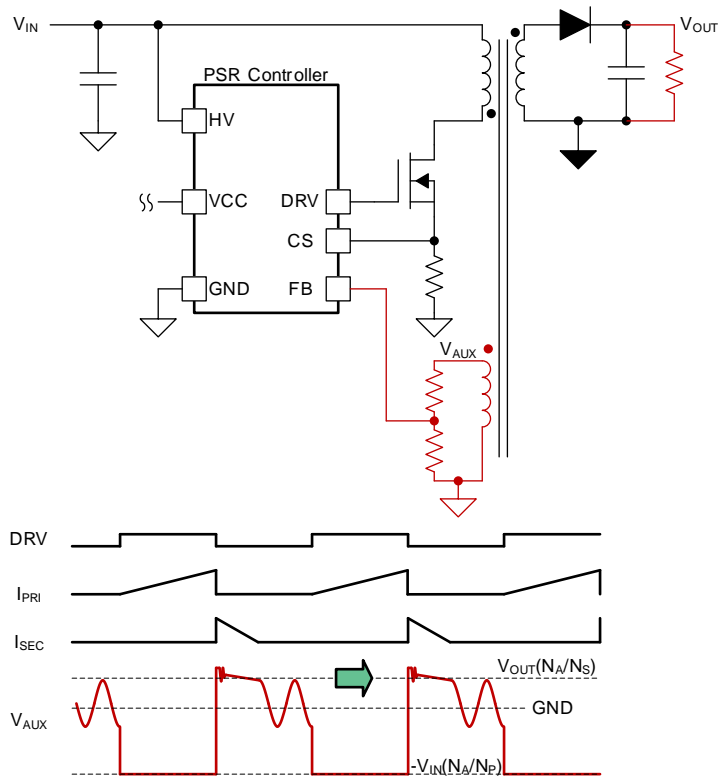


* feedback network simplified

- 光耦合器的電流傳輸比 (CTR) 隨以下因素改變：
 - 時間
 - 溫度
 - 電流

關閉迴路：PSR

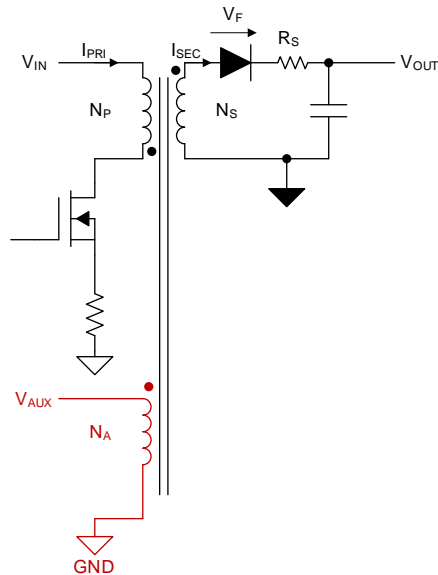
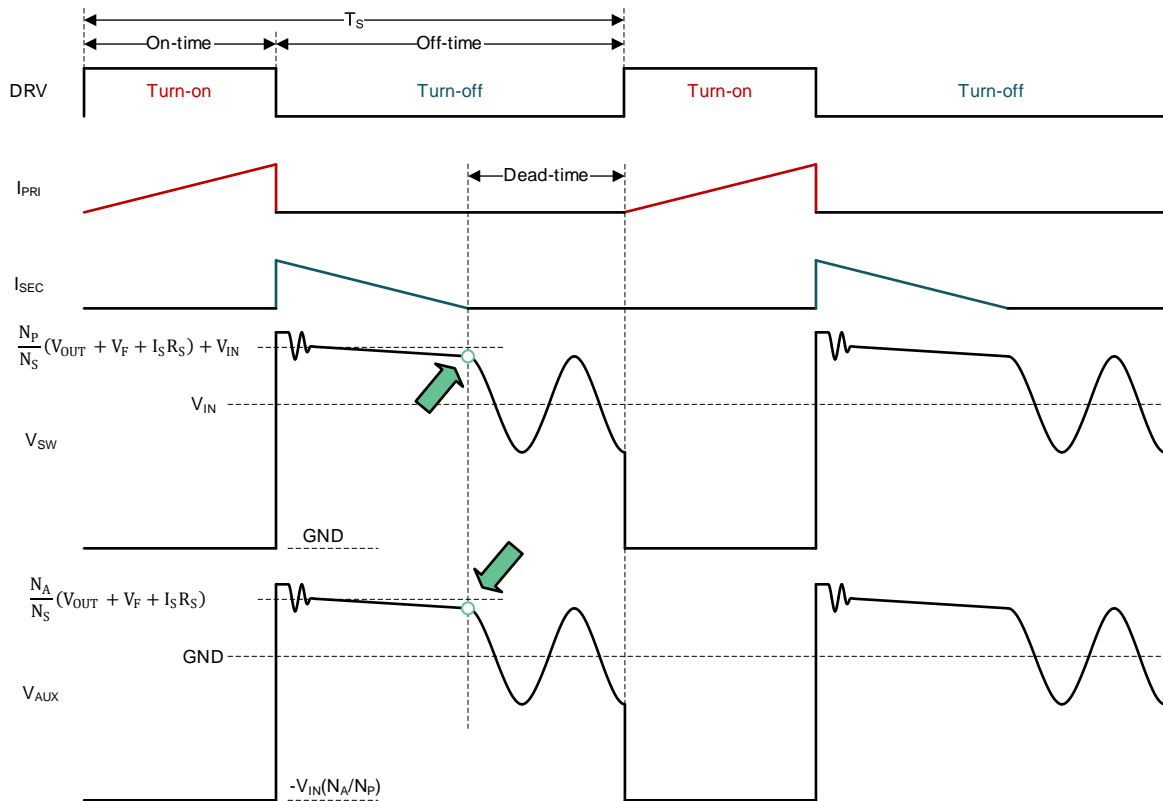
- 輔助繞組參考一次側
- 電壓追蹤隔離輸出
- 控制器感應整個輔助繞組的電壓
- PSR 返馳的連續開關非常重要，因為其確保輔助繞組電壓正確表示輸出



SSR 與 PSR 的比較

參數	具備光耦合器的 SSR	PSR
輕載行為	輕載調整能力良好	需要最小負載
意見反應	複雜回饋網路，使用 431 型穩壓器與光耦合器	取樣反射輸出電壓
初始輸出-電壓精確度	非常好	平均
負載調整	負載調整能力非常良好 (<1%)	平均負載調整 (>1%)
可靠性	光耦合器老化因素影響可靠性	非常好
瞬態回應	受限於光耦合器頻寬	大部分受限於切換頻率
成本	平均	由於移除光耦合器而改善
自偏壓	需要輔助繞組	利用輔助繞組實現偏壓與回饋

詳細了解輔助繞組波型

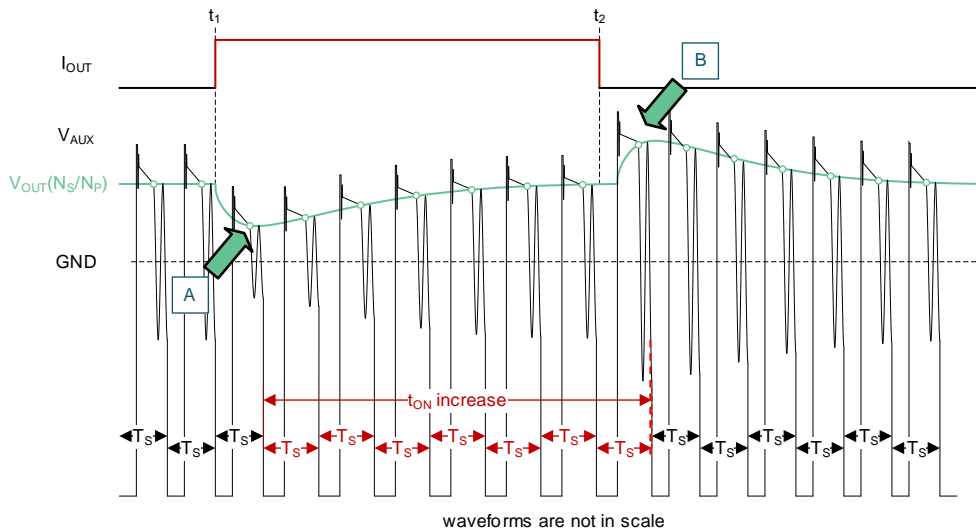


- 理想取樣點為 I_{SEC} 降至零的時候

負載瞬態時的輔助繞組波型

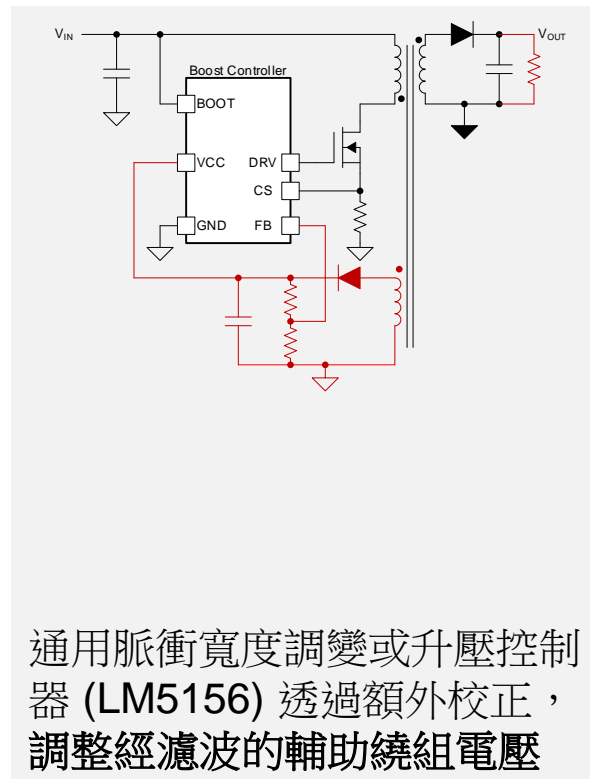
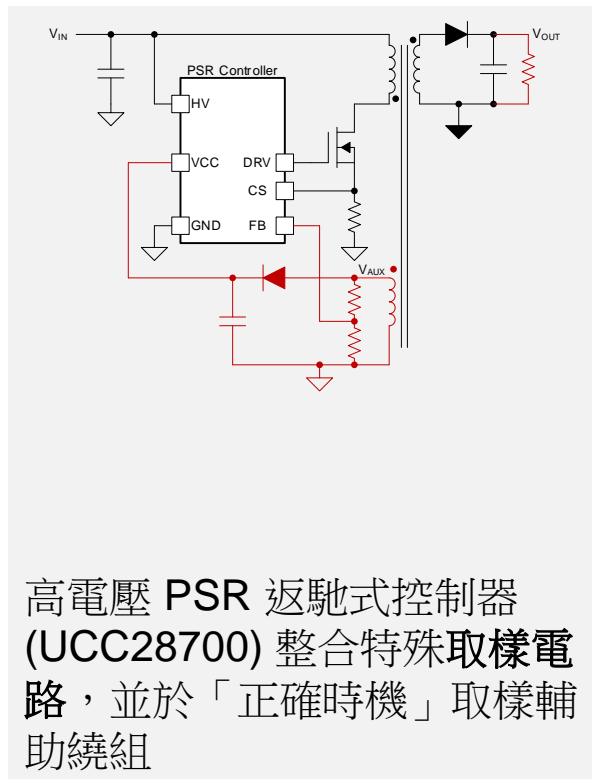
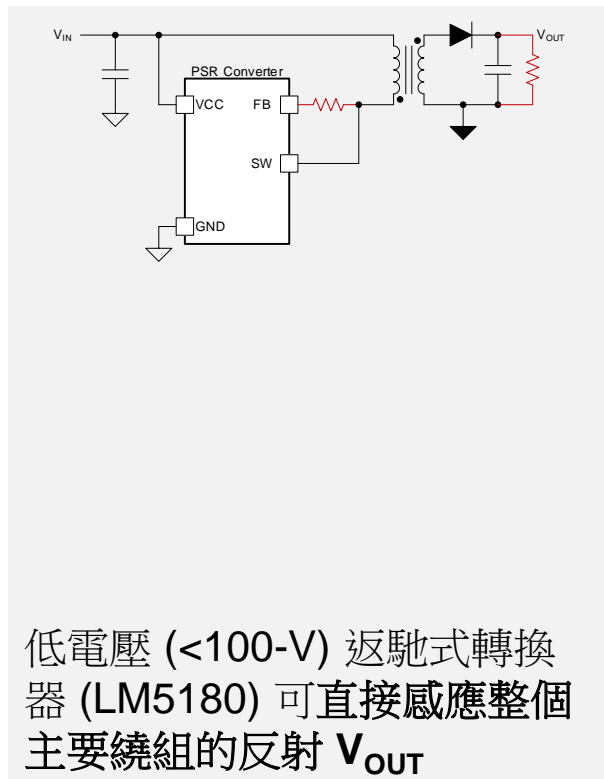
- 電流於 t_1 上升，導致輸出電壓 (V_{OUT}) 下降
- 控制器發現單一開關週期 (T_S) 內電流需求上升 (A)
- 控制器增加開啟時間 (t_{ON})
- 切換頻率 (f_{SW}) 下降
- V_{OUT} 在數個週期後回到所需等級
- 在 t_2 ，以逆邏輯重複進行該過程 (B)

準諧振 PSR 控制器範例



◦ Discriminator and sampler circuit sampling points (UCC28700-Q1)

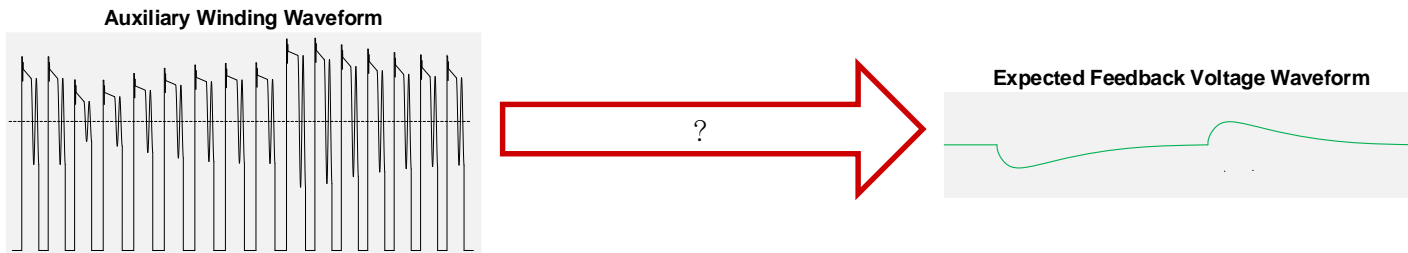
三種 PSR



問題聲明

- V_{AUX} 波形為複合式，並附帶大量資訊
- 一旦 I_{SE} 降到零， V_{AUX} 每個時期僅提供一次準確 V_{OUT} 資訊
- PSR 穩壓器回饋使用**取樣保持**
- 標準升壓控制器預期為**連續**回饋電壓

如何轉換輔助繞組波型？



完整步驟設計範例

配備 **LM5156-Q1** 升壓返馳式控制器的隔離式閘極驅動器偏壓電源



17 x 44 x 14 mm (W x L x H)



PSR 返馳設計建議流程



定義轉換器參數

- 由 12-V 汽車電瓶供電的隔離式閘極驅動器偏壓電源

參數	技術規格
輸入電壓 (V_{IN})	6 V _{DC} -42 V _{DC} (52-V 暫態)
輸出電壓 (V_{OUT})	+15 V、-9 V ($V_{OUT} = 24$ V)
輸出電流 (I_{OUT})	180 mA
切換頻率 (f_{SW})	400 kHz
運轉模式	不連續傳導模式 (DCM)
主要到次要隔離	基本，2.5 kV
控制器	LM5156-Q1

識別極端情況

- 不會出現頻率倒退或邊界導通模式 (BCM)。傳統控制器也會：
 - 以恆定 f_{SW} 操作
 - 在 V_{OUT} 超過規定等級時輸入脈衝略過模式
- 變壓器匝比與電感必須能實現 f_{SW} 時的 DCM
- 最糟情境 – 極端工作週期：
 - $V_{IN(MIN)}$ 及 $I_{OUT(MAX)}$ 導致最大工作週期
 - $V_{IN(MAX)}$ 及 $I_{OUT(MIN)}$ 導致最小工作週期
- Power Stage Designer™ 軟體迭代過程建議變壓器
- $L_{PRI} = 4 \mu H$ 、 $L_{SEC} = 16 \mu H$ ，匝比 $N_P:N_S = 1:2$

最糟情境可用性檢查

Power Stage Designer 軟體找出最小負載 $V_{IN} = 42\text{ V}$

參數	最小工作條件	最大工作條件	LM5156-Q1 裝置資料表規格
開啟時間	0.13 μs	1.57 μs	最小 130 ns (圖 8-12)
關閉時間	0.43 μs	0.76 μs	
工作週期	5.10%	62.86%	最大 92.8% (圖 8-16)
零時	1.94 μs	0.16 μs	
最大主要電流 (I_{PR})	1.33 A	2.36 A	
最大次要電流 (I_{SE})	0.66 A	1.18 A	
所需最小負載 ($I_{L(MIN)}$)	60 mA		



或者由控制器輸入脈衝略過模式

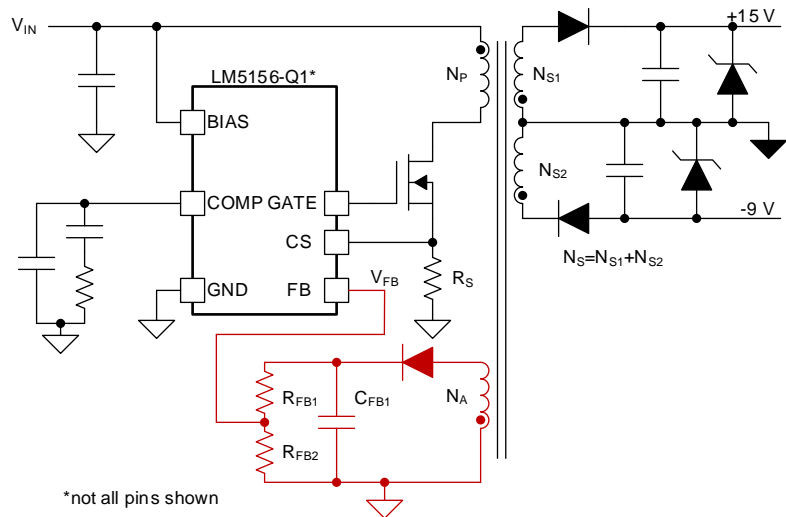
初版設計審核

- Magnetics 供應商確認變壓器設計合理
- LM5156-Q1 可支援所需的工作週期，即使在 $f_{SW} = 400 \text{ kHz}$
- 轉換器在 $V_{IN} = 42 \text{ V}$ 時需要 $\approx 60\text{-mA}$ 的人工負載，從而達到恆定 f_{SW} ，並對於輕負載期間的效率產生負面影響 ($V_{IN} = 12 \text{ V}$ 時 $\approx 5 \text{ mA}$)
- 允許控制器進入脈衝略過模式，盡量在下列各項項目之間達成理想的妥協取捨：
 - 減少人工負載，從而增加效率
 - 漸少脈衝略過模式中的暫態回應

設計者決策：此解決方案是否依舊滿足期待？

處理回饋

- 使用二極體作為半波整流器 (峰值偵測器)
- 偵測器 (濾波器) 必須能夠追蹤輸出暫態



- 設定輔助繞組匝比，支援整流電壓產生自偏壓 (例如 15 V)

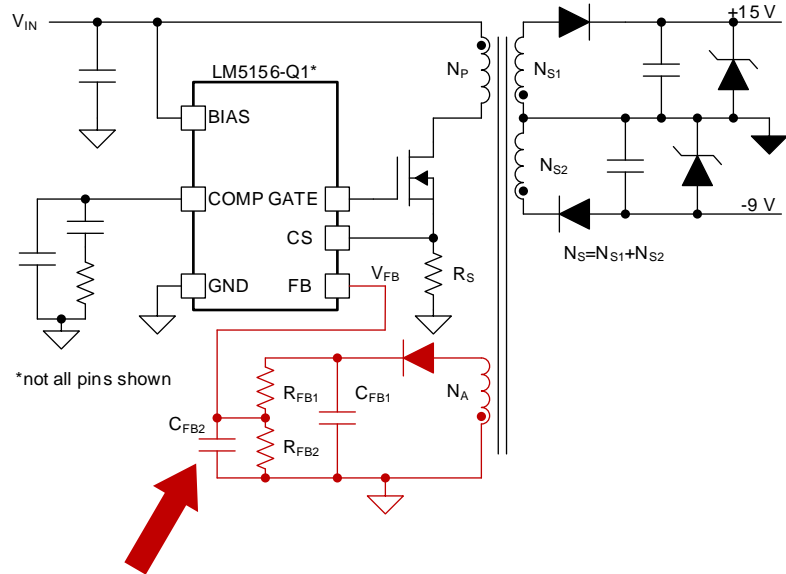
$$V_{VCC} \approx V_{OUT} \times \frac{N_A}{N_S}$$

- 計算電阻分壓器以匹配回饋電壓 (V_{FB})

$$V_{FB} = V_{OUT} \times \frac{N_A}{N_S} \left(\frac{R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} \right)$$

處理回饋

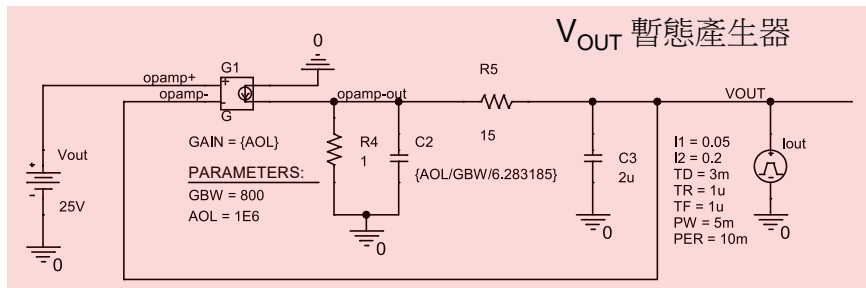
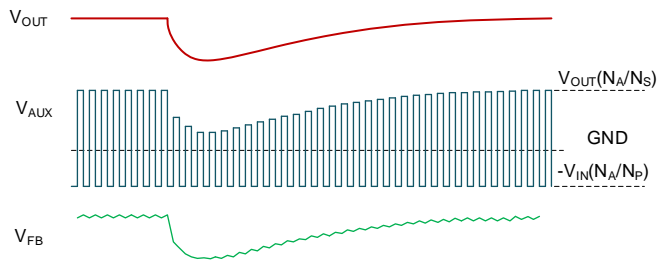
- 建議使用被動二階濾波器來過濾 V_{AUX} 包絡
- 電容器 C_{FB1} 與 C_{FB2} 定義濾波器時間常數 (τ)
- 使用模擬工具來找出最佳 C_{FB1} 與 C_{FB2} 值



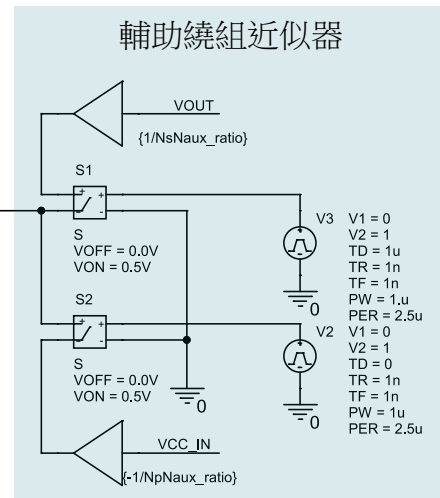
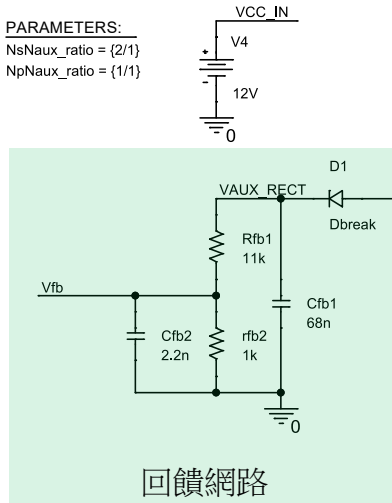
處理回饋：PSpice 中的模擬功能

三個步驟

1. 產生需要的 V_{OUT} 暫態回應
2. 得出 V_{AUX} 近似值
3. 使用 C_{FB1} 與 C_{FB2} 調整整流器與濾波器暫態回應



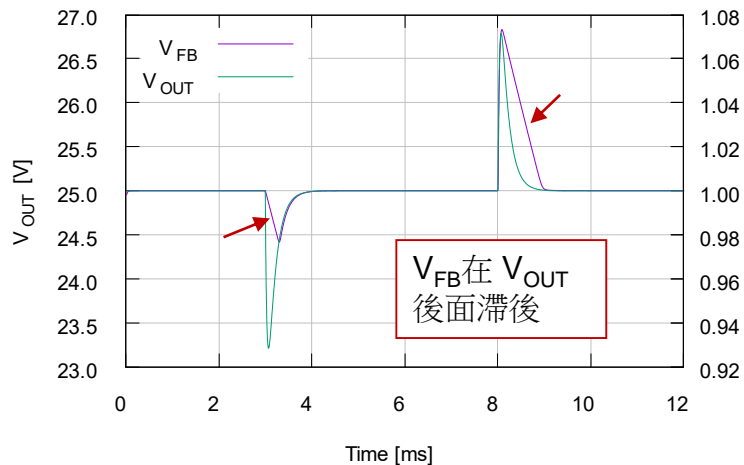
PARAMETERS:
NsNaux_ratio = (2/1)
NpNaux_ratio = (1/1)



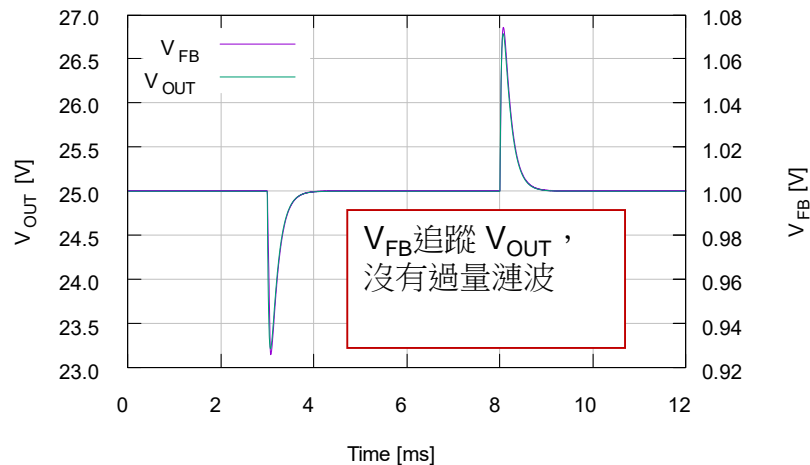
模擬濾波器 (峰值偵測器) 回應

檢查 V_{FB} 是否能追蹤 V_{OUT}

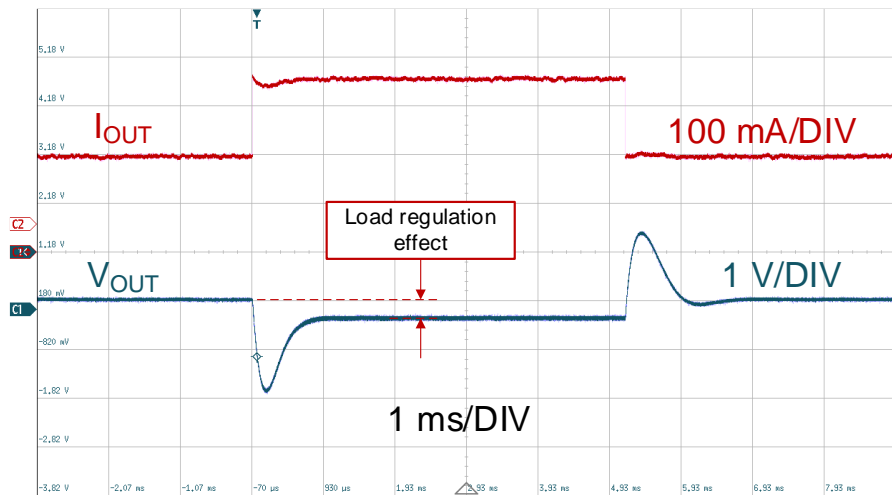
τ 太長



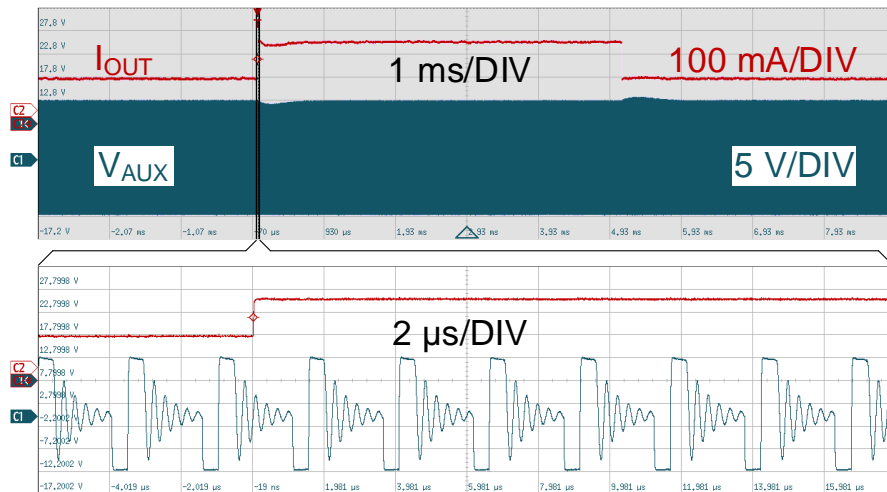
τ 為最佳數值



V_{OUT} 暫態回應與 V_{AUX} 回饋



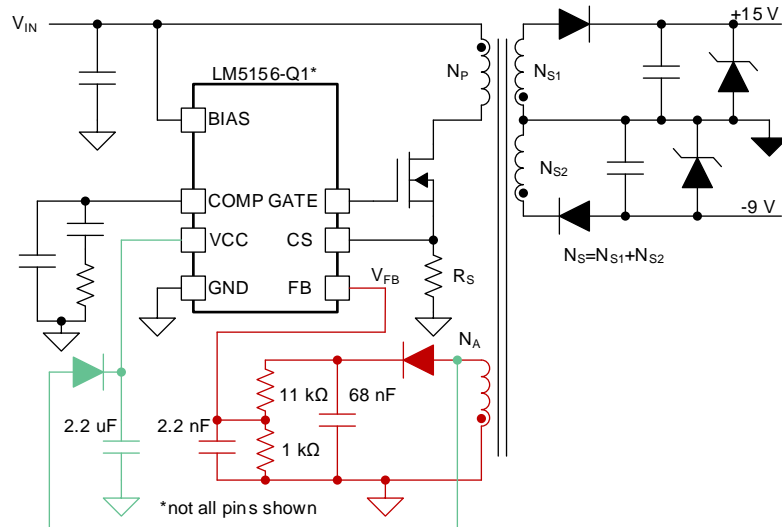
V_{OUT} 暫態回應， I_{OUT} 為 45 mA 至 135 mA



V_{AUX} 暫態回應， I_{OUT} 為 45 mA 至 135 mA

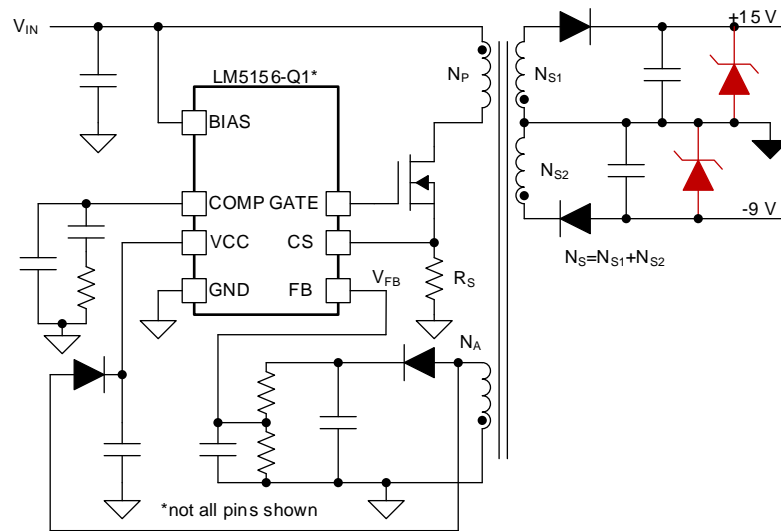
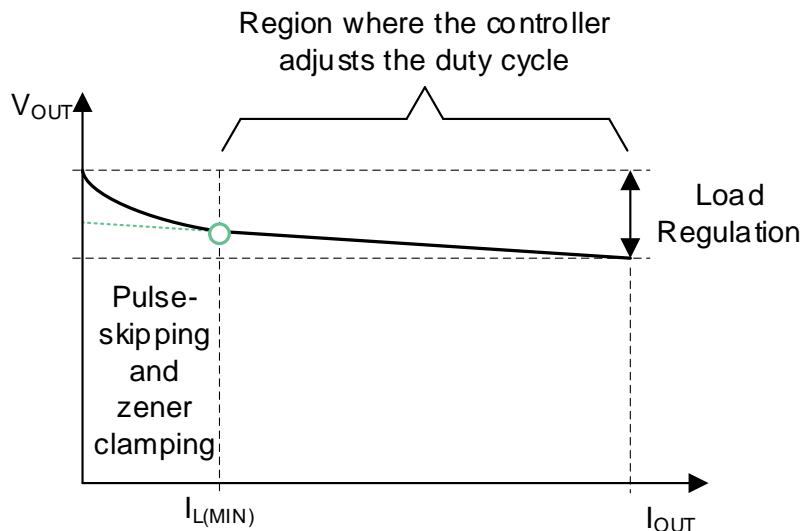
改善輕負載效率的偏壓機制

- 回饋與自供電有不同要求
- 來自輔助繞組的自供電 (偏壓) 需要大量電容，維持電壓軌穩定
- 回饋通道需要快速暫態回應，快速追蹤 V_{OUT}
- 兩條獨立路徑提供最佳性能，無需妥協折衷



解決最小負載

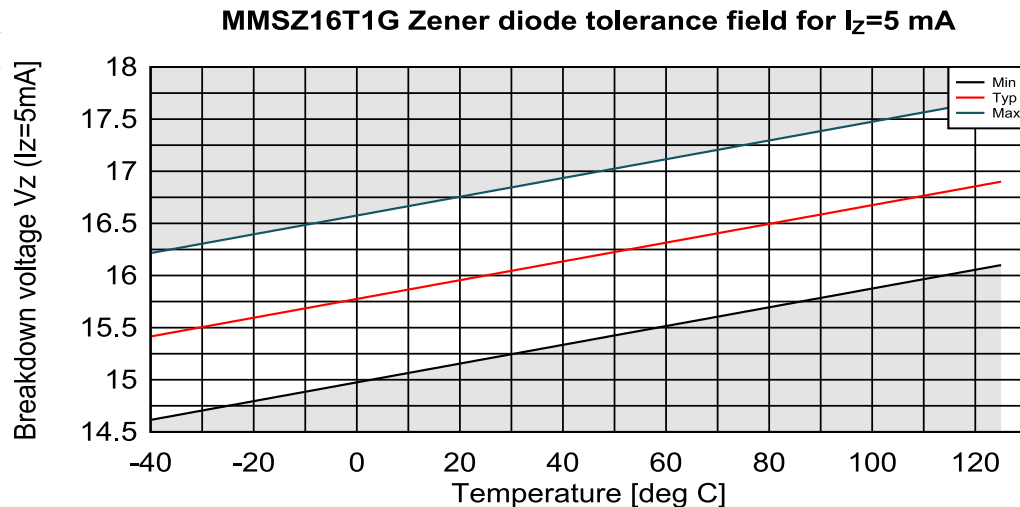
- 有兩個選項：
 - 作為假負載的電阻器
 - 稽納二極體



- 控制器無法進一步降低 t_{ON}
- V_{OUT} 增加，稽納二極體汲入電流
- 發生脈衝略過

稽納二極體與其準確度

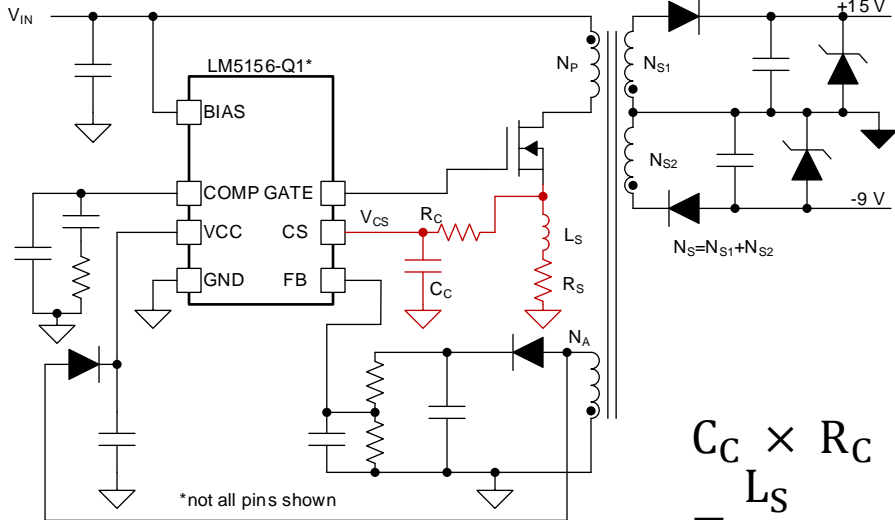
- 稽納二極體較為平價，但準確度不佳
- 二極體的：
 - $V_Z < 4.7\text{ V}$ 時具有負溫度係數
 - $V_Z > 4.7\text{ V}$ 時具有正溫度係數
- 立即使用的準確度各不相同



參數	MMSZ10T1G	MMSZ16T1G
	($V_Z=10\text{ V}$)	($V_Z=16\text{ V}$)
最低稽納電壓	8.9 V	14.6 V
最高稽納電壓	11.4 V	17.7

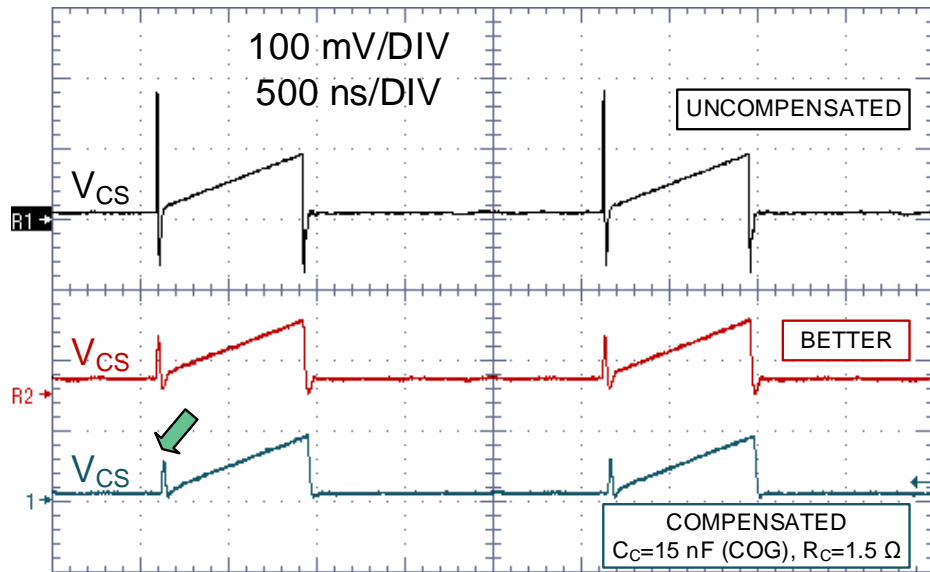
補償電流感測電阻器

- 電流感測電阻器上的振鈴可能導致錯誤過電流事件
- 需要補償網路



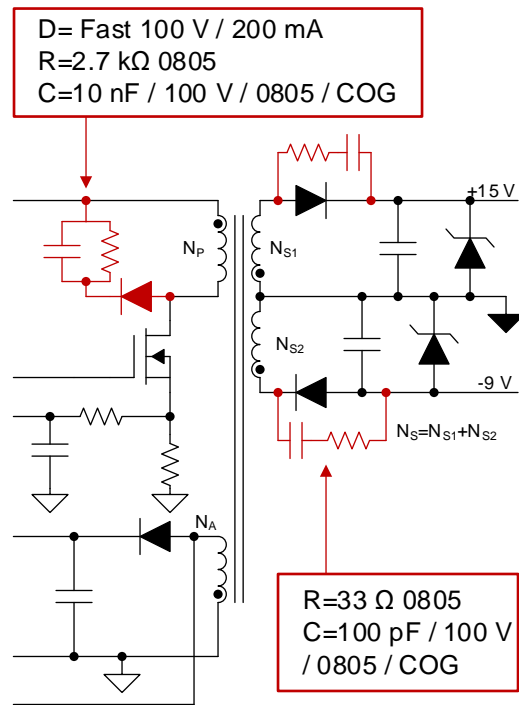
(範例使用 0.33Ω 0603 分流電阻器)

$$C_C \times R_C = \frac{L_S}{R_S}$$

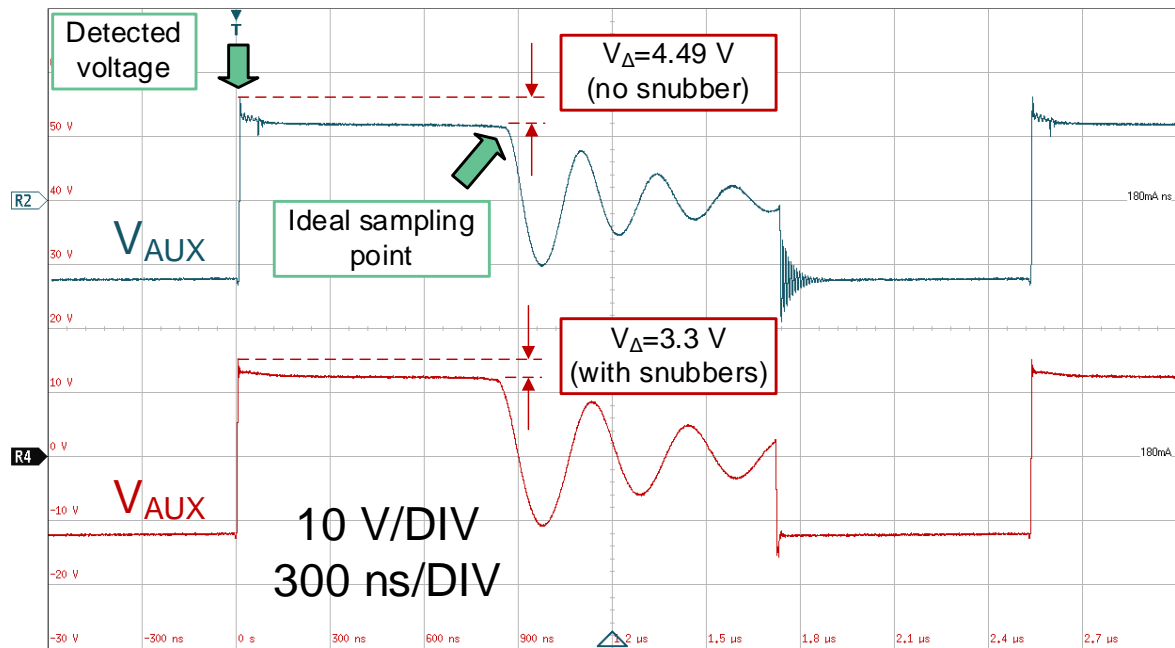


緩衝器電路

- 緩衝器電路減少以下振鈴：
 - 導致電磁干擾 (EMI)
 - 關閉暫態期間對功率電晶體施加應力
- 振鈴也對輔助波形產生負面影響，並影響回饋
- 振鈴與 I_{OUT} 成比例

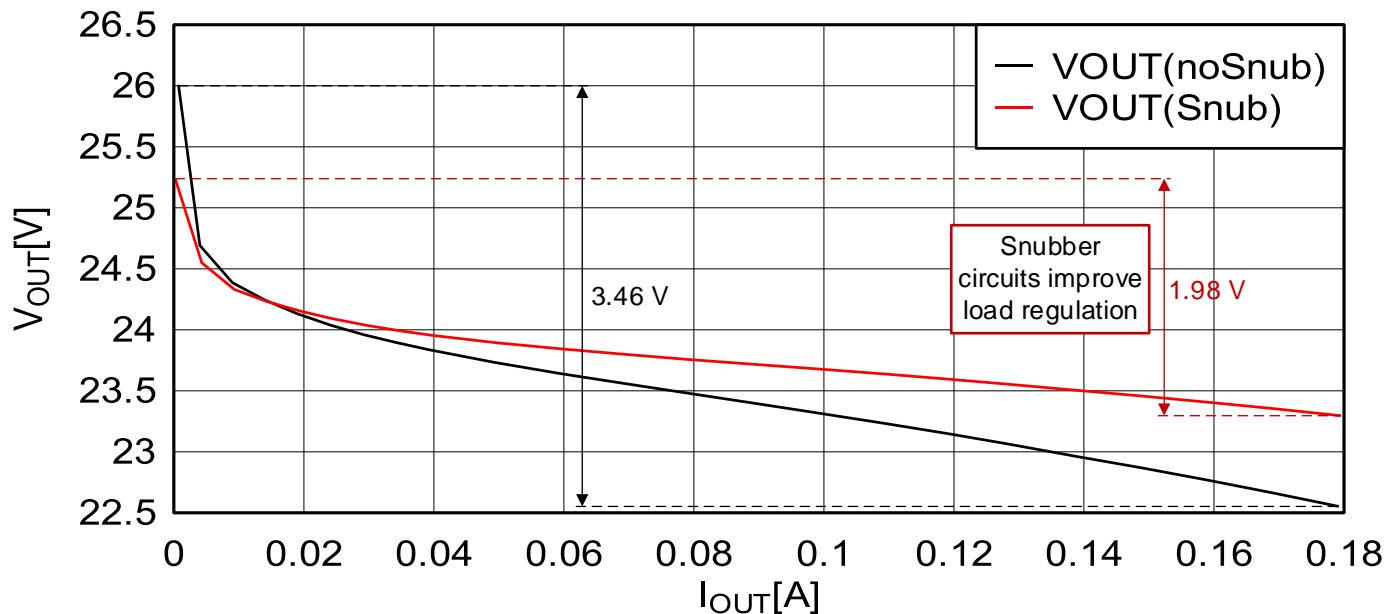


具備及不具備緩衝器電路的 V_{AUX} 波型



V_{AUX} 波型， $I_{OUT} = 180 \text{ mA}$

緩衝器電路對負載調整的影響



結論

- PSR 返馳在低成本隔離式 DC/DC 轉換器中十分普及
- 使用傳統升壓控制器的 PSR 返馳需要針對回饋進行以下考量：
 - 識別給定操作條件的最小與最大工作週期
 - 設計 V_{AUX} 封裝偵測器 (濾波器), 使其追蹤 V_{OUT}
 - 使用緩衝器將振鈴最小化
 - 將自偏壓與回饋通道分離, 實現快速暫態回應
 - 增加補償網路至電流感測電阻器
 - 設計補償時應考量封裝偵測器, 考慮採用較高的相位裕度
 - 驗證最小、最大與標稱輸入電壓的暫態回應

資源與更多閱讀資料

UCC28700-Q1 資料表，章節 7.4.1

- 鑑別器與取樣電路如何運作

LM5180-Q1 資料表，章節 7.3.2

- 頻率倒退、BCM 與 PSR 如何運作

Power Stage Designer 軟體

- 初步元件選擇基本工具

使用返馳 SMPS 罩設計(SLUP261)

- 返馳式轉換器詳細說明

TI 驅動器 (存取碼 rn4N8w;r)

- 本發表的設計資源

PSPICE-FOR-TI

- PSpice® for TI 設計與模擬工具

存取碼 rn4N8w;r





© 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