

# パワー サプライ デザイン セミナー

従来型の昇圧コントローラを活用した  
一次側レギュレーション(PSR)フライバック  
コンバータの設計

明石 涼

日本テキサス・インスツルメンツ  
営業技術本部 フィールドアプリケーションエンジニア



# 目次

- フライバックコンバータ
  - 基本動作について
  - 2次側レギュレーション(SSR)と1次側レギュレーション(PSR)の比較
- PSR(Primary Side Regulation)の詳細
  - 補助巻線波形の詳細
  - 特徴が異なる3種類のPSR
  - 昇圧コントローラでPSRフライバックを設計する際の課題
- LM5156-Q1 昇圧コントローラを使った設計例
  - 要求仕様の定義とフィジビリティチェックの概要
  - フィードバック回路の解決
  - その他の最適化 (ダミー負荷、電流センシング、スナバ)
- まとめと追加の資料

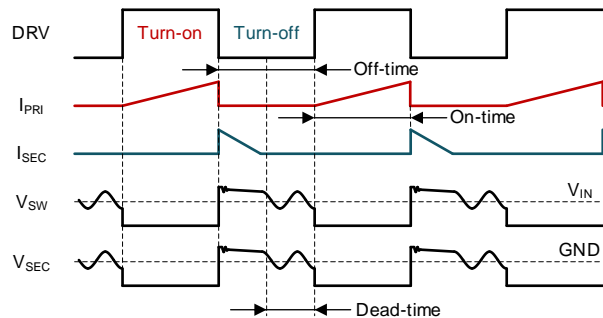
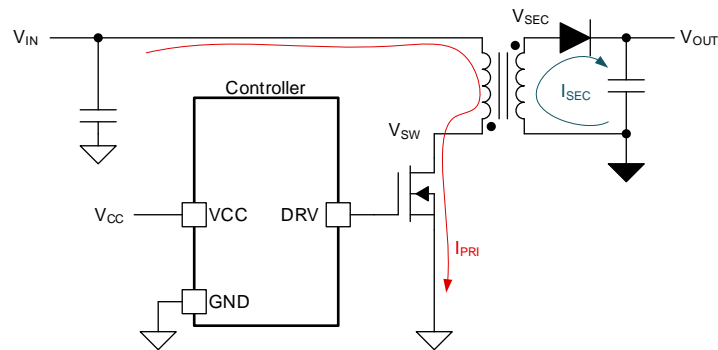
# フライバックコンバータ

## ターンオン

- スwitchの導通: 1次側電流( $I_{PRI}$ )がトランスにエネルギーを蓄積
- 2次側ダイオードは逆極性 (2次側電圧  $V_{SEC} < 0$ )

## ターンオフ

- スwitchが開く: トランスの極性が変化( $V_{SEC} > 0$ )
- 2次側電流 ( $I_{SEC}$ ) が 2次側巻線経由で流れ、負荷へエネルギーを供給



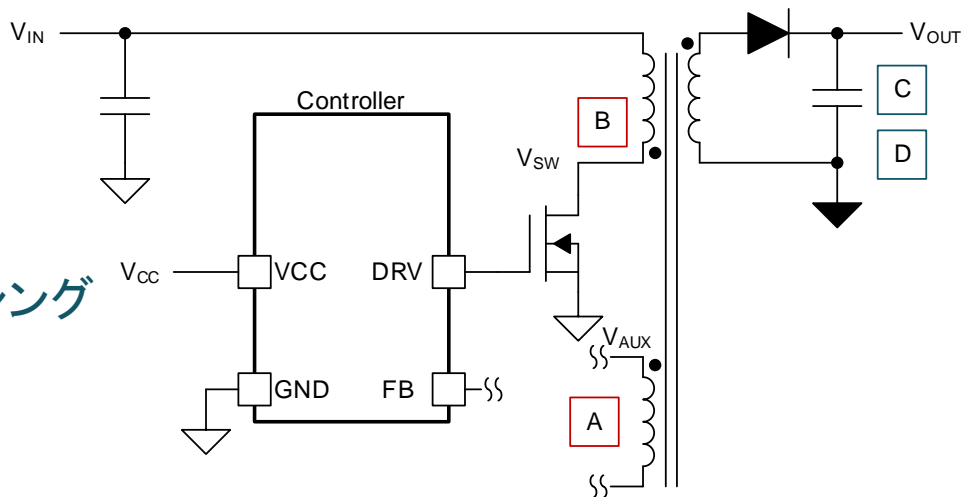
# フライバックコンバータ フィードバック

## PSR(Primary Side Regulation)センシング

- 補助巻線全体にわたるセンシング (A)
- スイッチ ノードのフライバック電圧のセンシング (B)

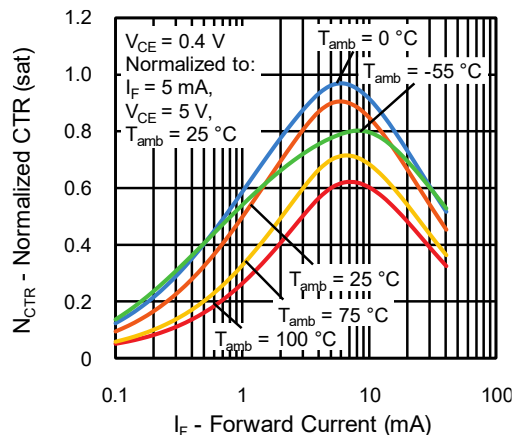
## SSR(Secondary Side Regulation)センシング

- 抵抗デバイダの使用 (C)  
(非絶縁型トポロジの場合)
- フォトカプラの使用 (D)

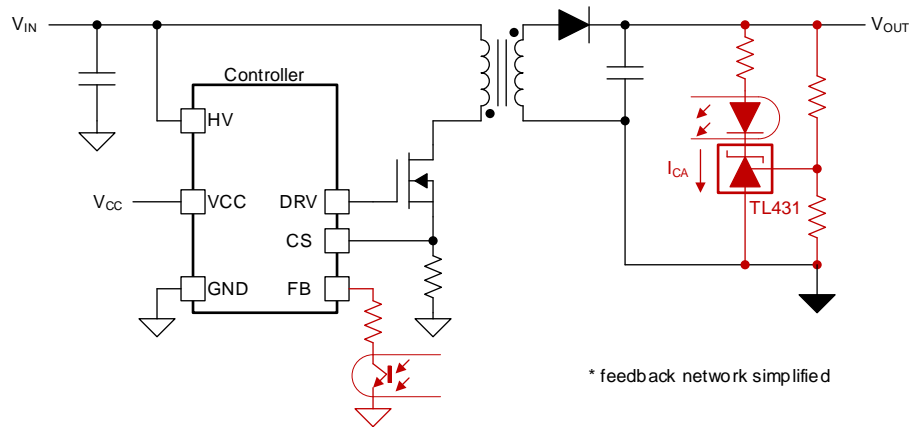


# SSRのフォードバックループ

- 431タイプのシャントレギュレータが出力電圧をセンスし、フォトカプラを通じて電流を調整



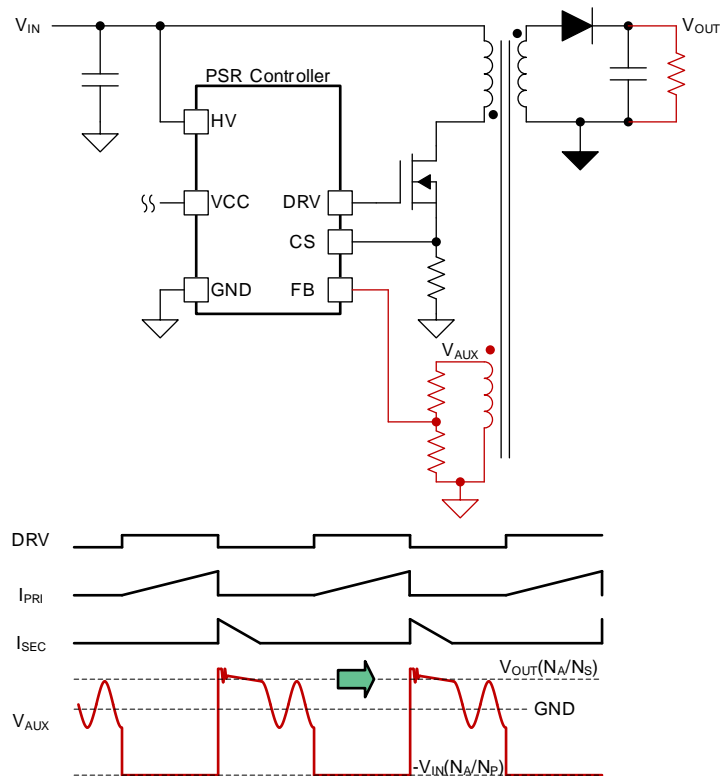
出典: Vishay、アプリケーション ノート 45



- フォトカプラの電流伝達率 (CTR) は以下の要因に基づいて変動します
  - 時間
  - 温度
  - 電流

# PSRのフィードバックループ

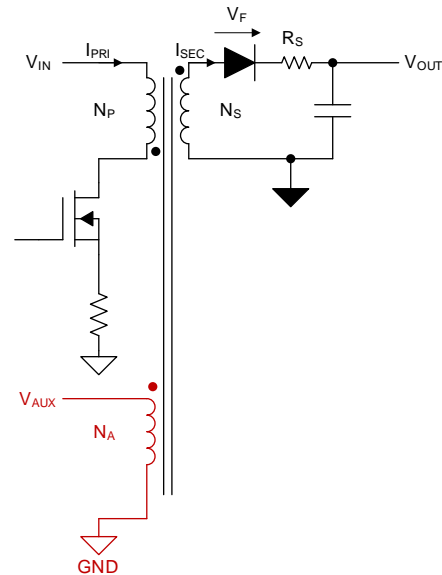
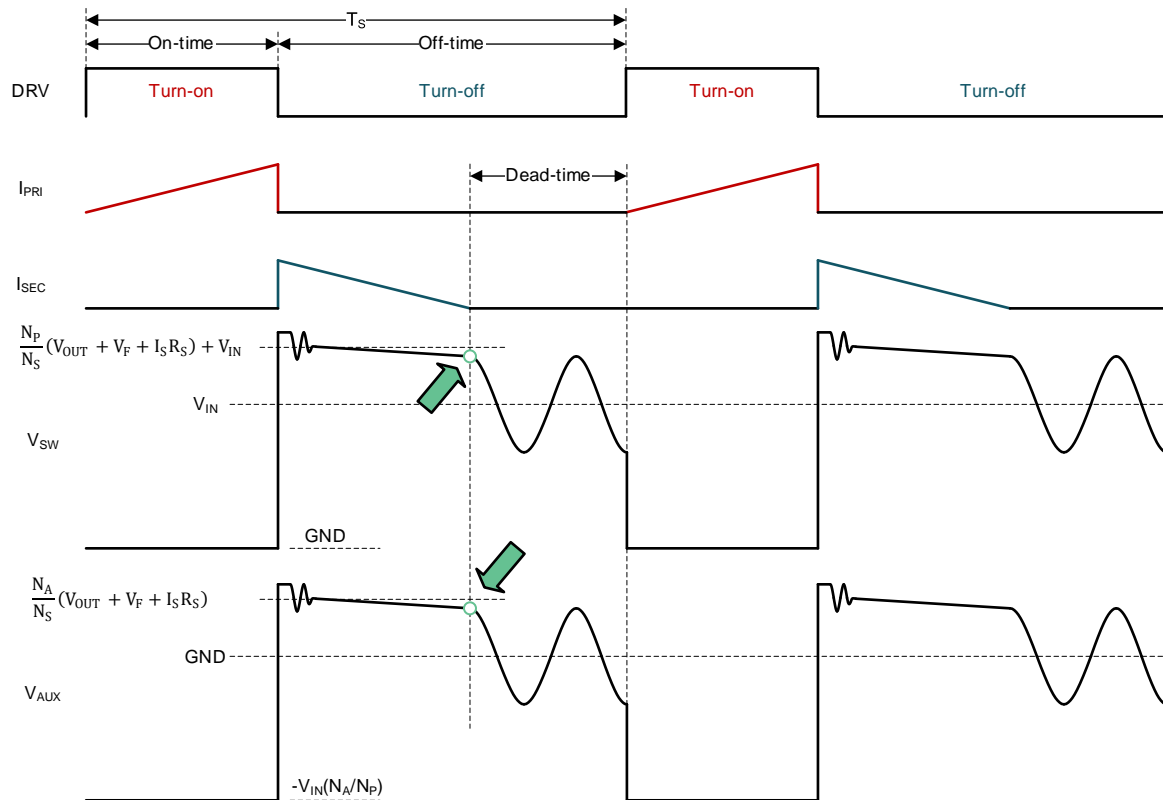
- 補助巻線は1次側と共通グラウンドをとっています
- 補助巻線電圧は2次側出力電圧を追従します
- コントローラは補助巻線全体にわたる電圧をセンシングします
- 補助巻線の電圧が出力電圧の情報を正確に表すことができるように、PSRフライバックのスイッチングを継続的に行うことが不可欠です



# SSR と PSR の比較

パラメータ	フォトカプラを実装した SSR	PSR
軽負荷動作	良好な軽負荷時のロードレギュレーション	最小負荷が必要
フィードバック	431 タイプのレギュレータとフォトカプラを使用した複雑な帰還回路	補助巻き線電圧もしくはフライバック電圧のセンシング
出力電圧精度	とても良い	平均的
負荷安定度	非常に良好なロードレギュレーション (<1%)	平均的なロードレギュレーション (>1%)
信頼性	フォトカプラの経年劣化因子は信頼性に影響を及ぼす	とても良い
過渡応答	フォトカプラの帯域幅に依存する	主にスイッチング周波数に依存する
コスト	平均的	フォトカプラ不要なためコスト削減可能
自己バイアス	補助巻線が必要	バイアスとフィードバックの両方に補助巻線を利用

# 補助巻線波形の詳細



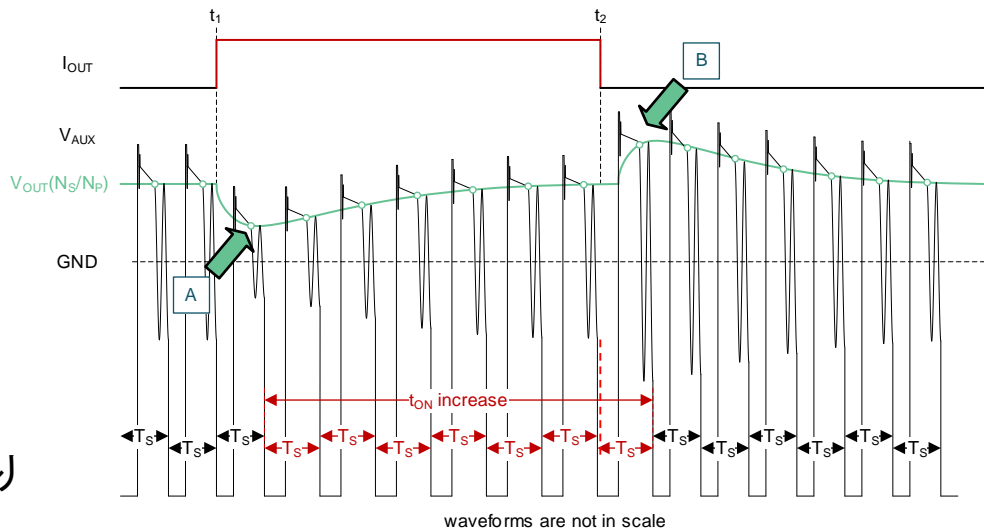
- $I_{SEC}$ がゼロまで低下したときが、理想的なサンプリングポイント



# 負荷応答時の補助巻線波形

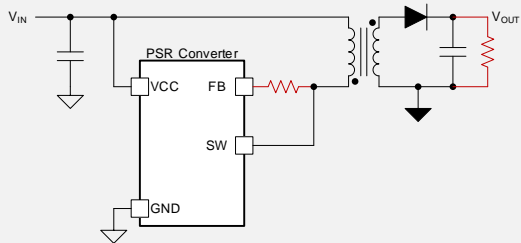
- 電流が増加する $t_1$  のタイミングで、出力電圧 ( $V_{OUT}$ ) が降下します
- 1 回のスイッチング サイクル ( $T_S$ ) の間に負荷電流の増加 (A) が検出されます
- コントローラによってオン時間が増加します ( $t_{ON}$ )
- スwitching 周波数 ( $f_{SW}$ ) が低下します
- 数サイクル後、 $V_{OUT}$  は設定された電圧レベルに戻ります
- 逆のプロセス(B) により、 $t_2$  でプロセスが繰り返されます

## 疑似共振 PSR コントローラの例

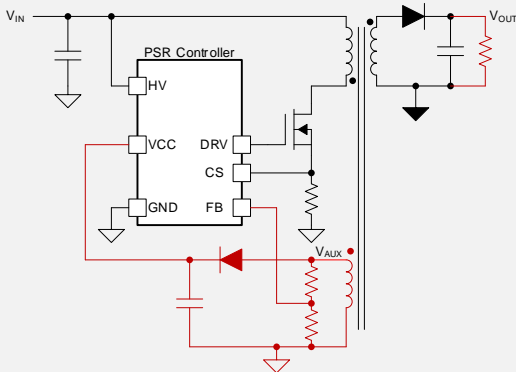


◦ Discriminator and sampler circuit sampling points (UCC28700-Q1)

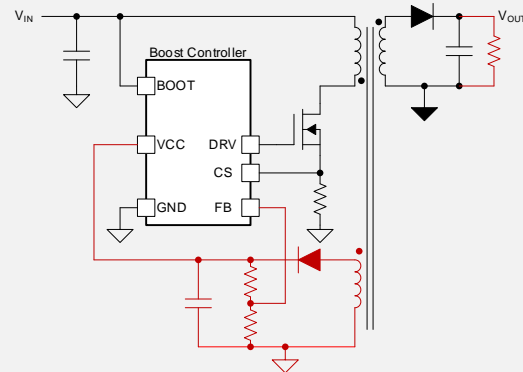
# 3種類のPSR



低電圧 (<100V) フライバックコンバータ (LM5180) では、メインの 1 次側巻線経由で  $V_{OUT}$  のフライバック電圧を直接センシング



高電圧 PSR フライバックコントローラ (UCC28700) は、「適切なタイミング」で補助巻線のサンプリングを行う特別なサンプリング回路を内蔵

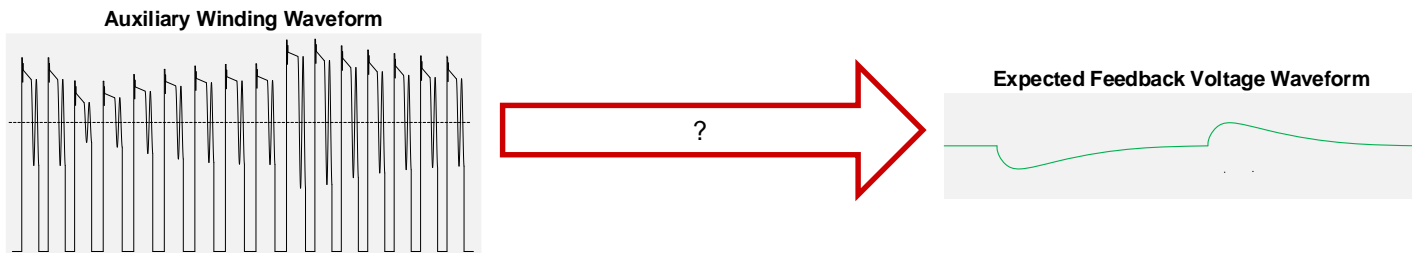


PWMコントローラまたは昇圧コントローラ (LM5156) は、追加のダイオードを使用して、フィルタリングされた補助巻線の電圧でレギュレーションを行う

# 昇圧コントローラでPSRフライバックを設計する際の課題

- $V_{AUX}$  は、多くの情報が含まれた合成波形です
- $V_{AUX}$  は  $I_{SE}$  がゼロまで低下した場合に、1 周期に 1 回だけ精度の高い  $V_{OUT}$  情報を提供します
- PSR専用のコンバータICのフィードバックにはサンプル / ホールドが使用されます
- 標準の昇圧コントローラは連続的なフィードバック電圧を想定しています

## 補助巻線波形の変換方法



# ステップバイステップの設計例

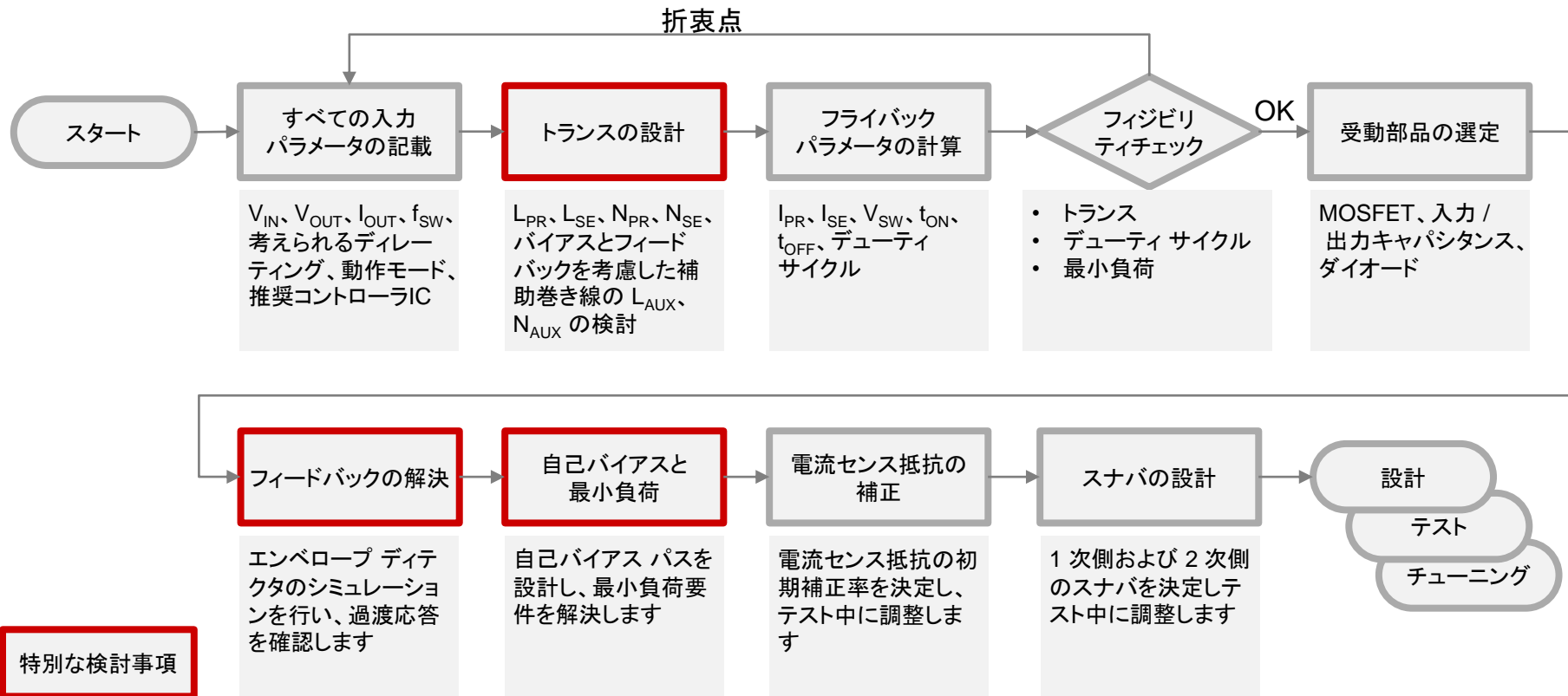
LM5156-Q1 昇圧フライバックコントローラ付きの絶縁型ゲートドライバ向けバイアス電源



17 x 44 x 14mm (幅 x 奥行き x 高さ)



# 推奨される PSR フライバック設計フロー



# PSRコンバータの要求仕様の定義

- 12V の自動車バッテリーで動作する絶縁型ゲートドライバ向けバイアス電源

パラメータ	仕様
入力電圧 ( $V_{IN}$ )	$6V_{DC} \sim 42V_{DC}$ (52V の過渡電圧)
出力電圧 ( $V_{OUT}$ )	+15V、-9V ( $V_{OUT} = 24V$ )
出力電流 ( $I_{OUT}$ )	180 mA
スイッチング周波数 ( $f_{SW}$ )	400 kHz
動作モード	不連続導通モード (DCM)
1 次側と 2 次側の間の絶縁	基礎絶縁、2.5kV
コントローラ	LM5156-Q1

# 例外的な状況の特定

- 周波数フォールドバックまたは境界導通モード (BCM) は使用できません。通常のコントローラは以下のいずれかの動作を行います
  - 一定の  $f_{SW}$  で動作する
  - $V_{OUT}$  が設定値を超えた場合に、パルススキッピングモードになる
- ワorstケース シナリオ – 極端なデューティ サイクル:
  - $V_{IN(MIN)}$  と  $I_{OUT(MAX)}$  により、デューティ サイクルが最大になります
  - $V_{IN(MAX)}$  と  $I_{OUT(MIN)}$  により、デューティ サイクルが最小になります
- Power Stage Designer™ ソフトウェアによる計算により、以下の値のトランスが推奨されます
- $L_{PRI} = 4\mu H$ 、 $L_{SEC} = 16\mu H$ 、巻線比  $N_P:N_S = 1:2$

# ワーストケース シナリオのフィジビリティチェック

Power Stage Designer ソフトウェアで、 $V_{IN} = 42V$  の最小負荷が検出されます

パラメータ	最小デューティ条件	最大デューティ条件	LM5156-Q1 データシートの仕様
オン時間 ( $t_{ON}$ )	0.13 $\mu$ s	1.57 $\mu$ s	最小 130ns (Figure 8-12)
オフ時間 ( $t_{OFF}$ )	0.43 $\mu$ s	0.76 $\mu$ s	
デューティサイクル	5.10%	62.86%	最大 92.8% (Figure 8-16)
デッドタイム	1.94 $\mu$ s	0.16 $\mu$ s	
最大 1 次側電流 ( $I_{PR}$ )	1.33 A	2.36 A	
最大 2 次側電流 ( $I_{SE}$ )	0.66 A	1.18 A	
必要な最小負荷 ( $I_{L(MIN)}$ )	<b>60 mA</b>		

別の方法として、コントローラをパルススキッピングモードにすることもできます



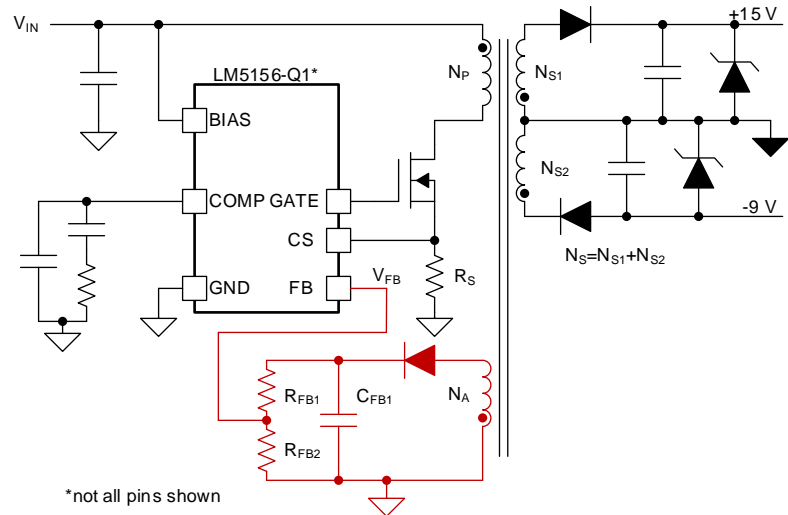
# 最初の設計レビュー

- トランス設計が妥当であることをトランスメーカー様と確認
- LM5156-Q1 が  $f_{SW} = 400\text{kHz}$  の条件下において、必要なデューティ サイクルに対応できることを確認
- スイッチング周波数  $f_{SW} = 400\text{kHz}$  に対して  $V_{IN} = 42\text{V}$  時に 約60mA が最小負荷として必要となりますが、軽負荷時には効率に悪影響を及ぼします ( $V_{IN} = 12\text{V}$  時に  $\approx 5\text{mA}$ )
- パルススキッピングモードでは以下のメリット デメリットが生じる
  - ダミー負荷を低減して効率を向上させる
  - 過渡応答特性が低減する

設計者の意思決定: このソリューションで期待事項を満たすことができるか

# フィードバック回路の解決

- 半波整流器 (ピーク検出器) としてダイオードを使用します
- 検出器 (フィルタ) で出力過渡を追跡する必要があります



- 整流された電圧で自己バイアスを利用できるように補助巻線比を設定します (例えば15V など)

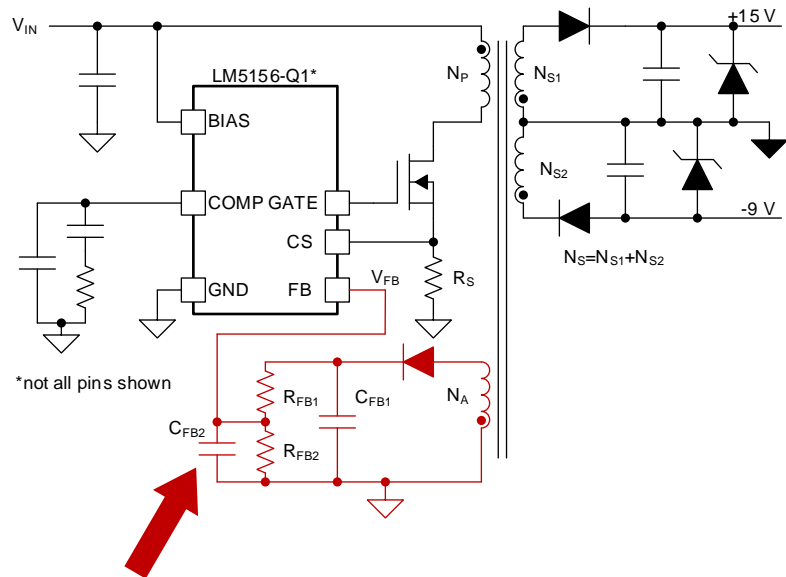
$$V_{VCC} \approx V_{OUT} \times \frac{N_A}{N_S}$$

- 抵抗デバイダで計算を行い、フィードバック電圧と一致させます ( $V_{FB}$ )

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

# フィードバック回路の解決

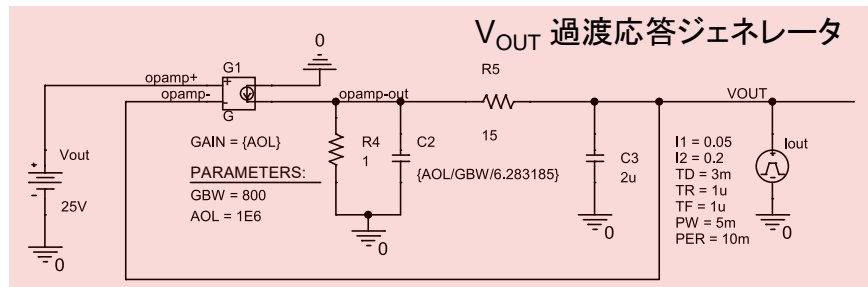
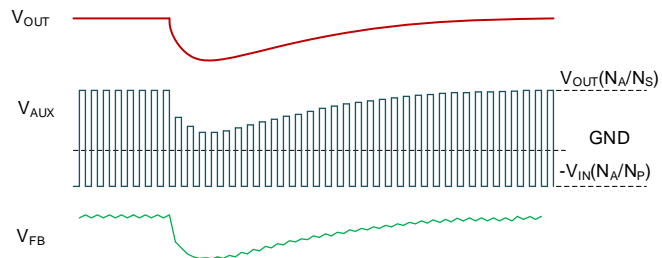
- $C_{FB2}$ を追加することにより2次のフィルタを形成します
- コンデンサ  $C_{FB1}$  および  $C_{FB2}$  により、フィルタの時定数 ( $\tau$ ) が定義されます
- シミュレーション ツールを使用して、最適な  $C_{FB1}$  および  $C_{FB2}$  の値を確認します



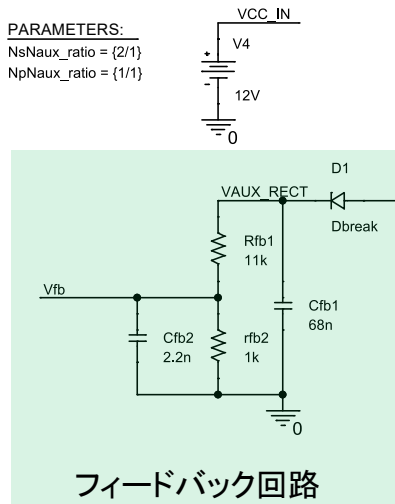
# フィードバック回路の解決: PSpice のシミュレーション

## 3つのステップ

1. 出力電圧  $V_{OUT}$  の過渡応答を生成します
2.  $V_{AUX}$  の近似値を求めます
3.  $C_{FB1}$ ,  $C_{FB2}$  を使用して、整流器フィルタの過渡応答を調整します

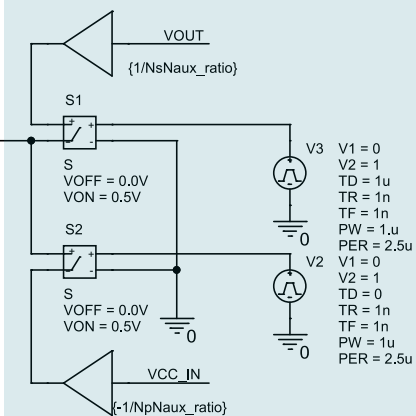


PARAMETERS:  
NsNaux\_ratio = {2/1}  
NpNaux\_ratio = {1/1}



フィードバック回路

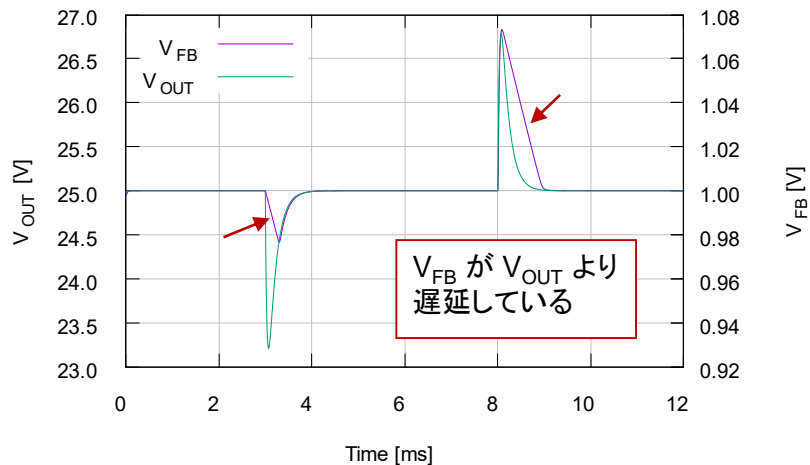
## 補助巻線近似値ジェネレータ



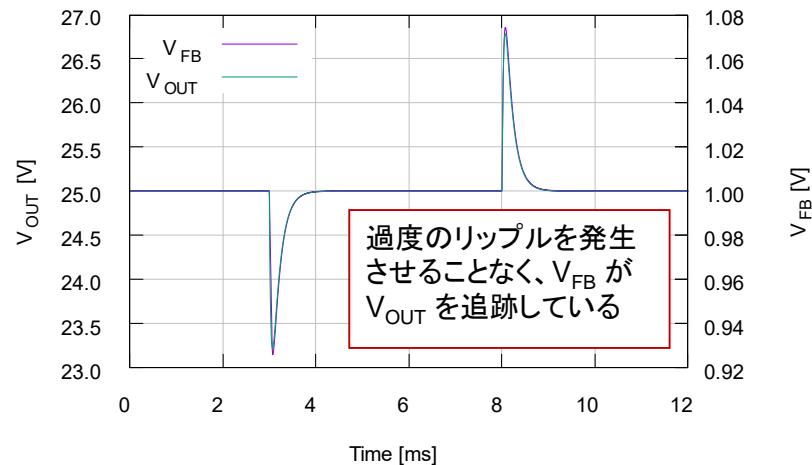
# シミュレーションによるフィルタ(ピーク検出器)応答

$V_{FB}$  が  $V_{OUT}$  を追跡できることを確認します

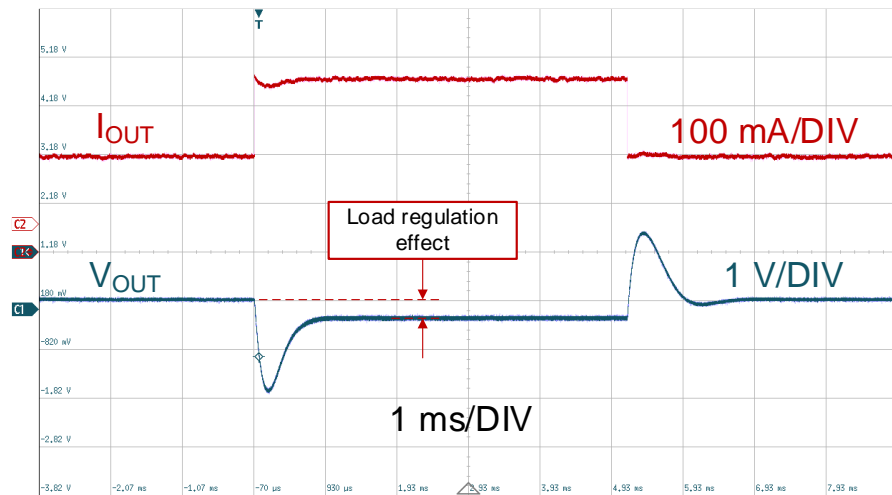
$\tau$  が長すぎる場合



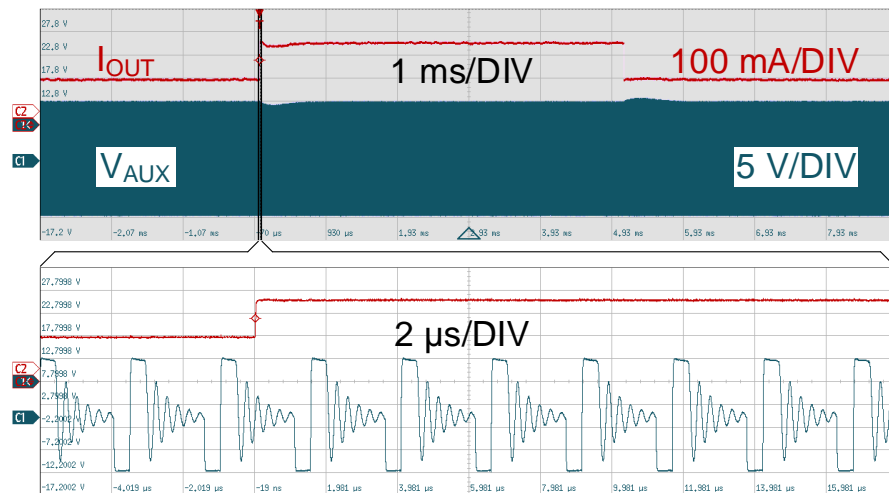
$\tau$  が最適の場合



# $V_{OUT}$ と $V_{AUX}$ の過渡応答



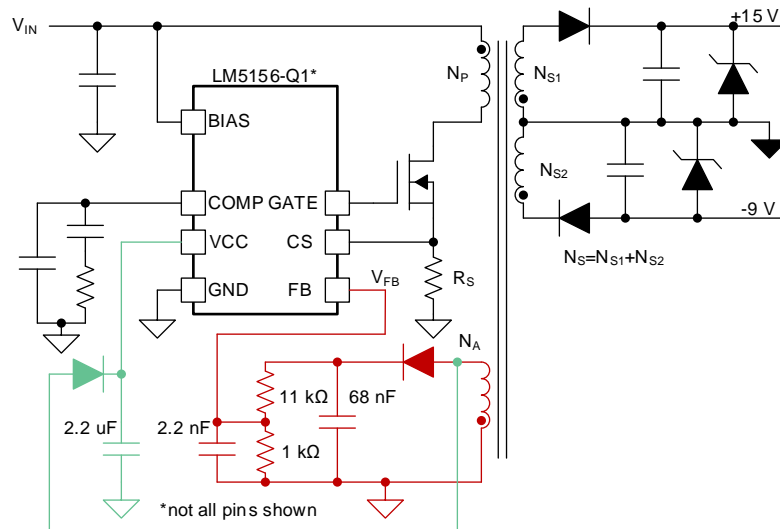
45mA ~ 135mA での  $I_{OUT}$  に対する  $V_{OUT}$  過渡応答



45mA ~ 135mA での  $I_{OUT}$  に対する  $V_{AUX}$  過渡応答

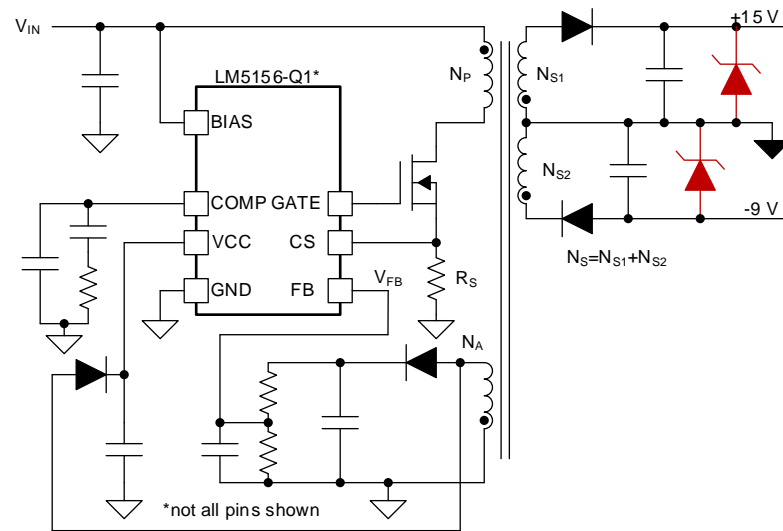
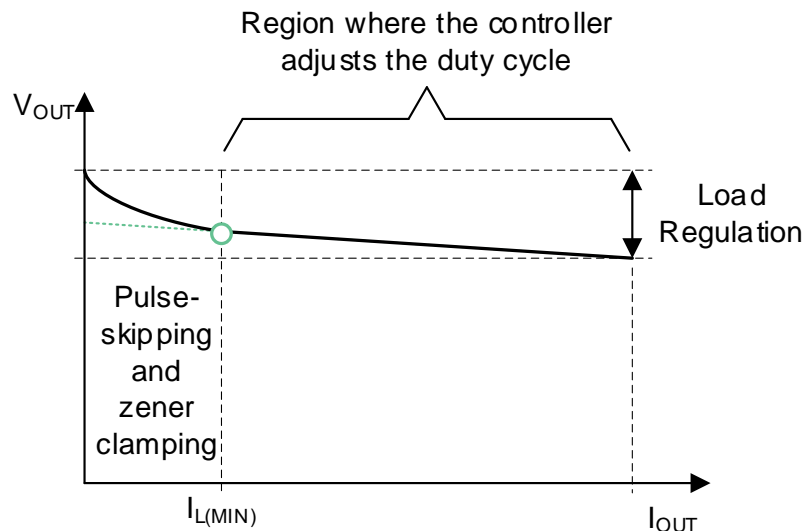
# 軽負荷効率を改善するためのバイアス印加方法

- フィードバックと自己給電に対する要件は異なります
- 補助巻線から自己給電 (バイアス) を行うには、電圧レールの安定性を保つための大容量のバルクコンデンサが必要です
- **フィードバックパス**には、 $V_{OUT}$  を迅速に追跡するための高速過渡応答が必要です
- 個別の2つのパスを用意することで、何も犠牲にすることなく性能を最大限に発揮できます



# 最小負荷要件の解決

- 2つの選択肢があります：
  - 抵抗をダミー負荷として使用する
  - ツェナー ダイオードを使用する



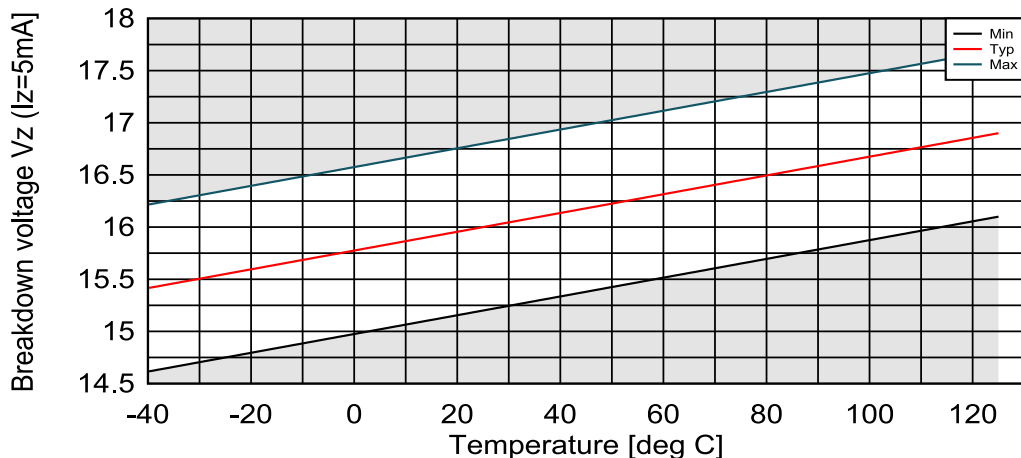
- コントローラで  $t_{ON}$  をさらに低減することはできません
- $V_{OUT}$  が増加すると、ツェナー ダイオードが電流をシンクします



# ツェナー ダイオードと精度について

- ツェナー ダイオードは低コストではありますが、精度はそれほど高くありません
- ツェナー ダイオードのおおよその出力とその影響：
  - $V_Z < 4.7V$  の場合、温度係数は負になります
  - $V_Z > 4.7V$  の場合、温度係数は正になります

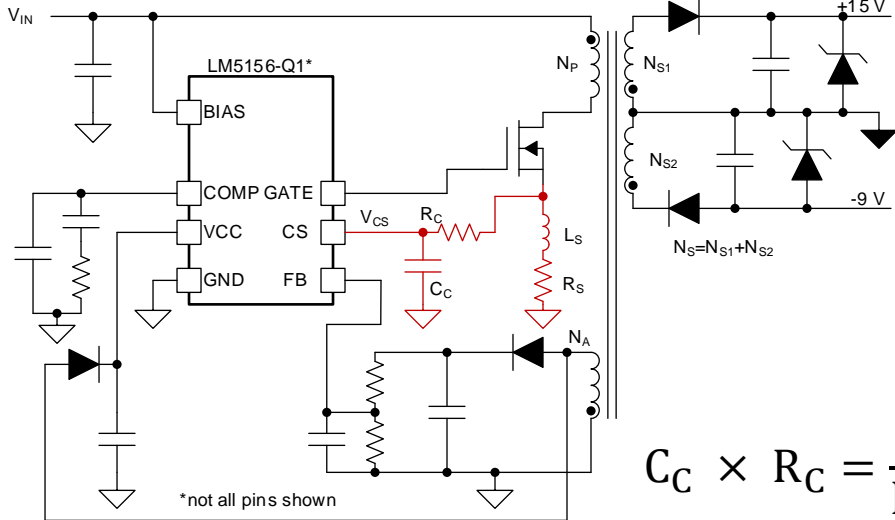
MMSZ16T1G Zener diode tolerance field for  $I_Z=5\text{ mA}$



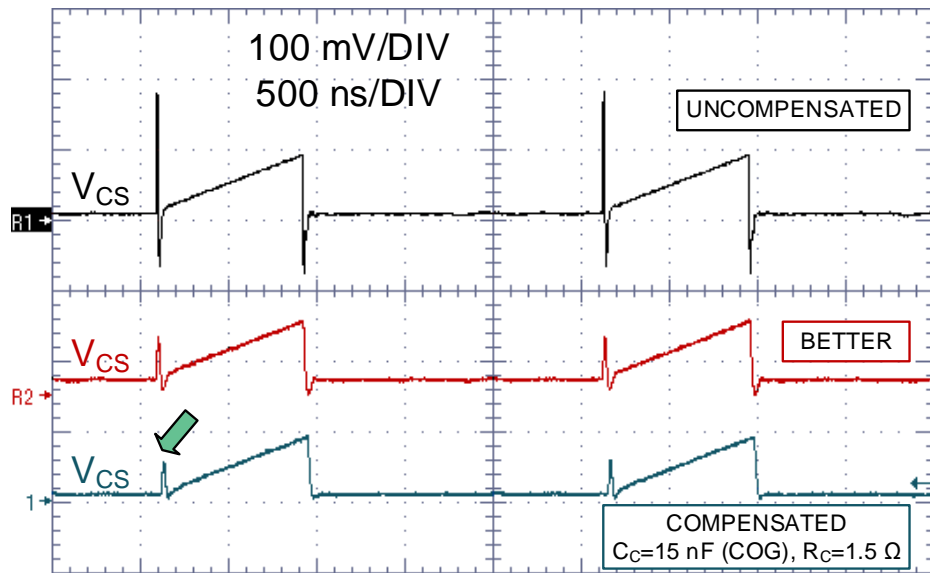
パラメータ	MMSZ10T1G ( $V_Z = 10V$ )	MMSZ16T1G ( $V_Z = 16V$ )
最小ツェナー電圧	8.9 V	14.6 V
最大ツェナー電圧	11.4 V	17.7

# 電流センス抵抗の補正

- 電流センス抵抗でリングングが発生すると過電流を誤検出する可能性があります  
→補正回路が必要です



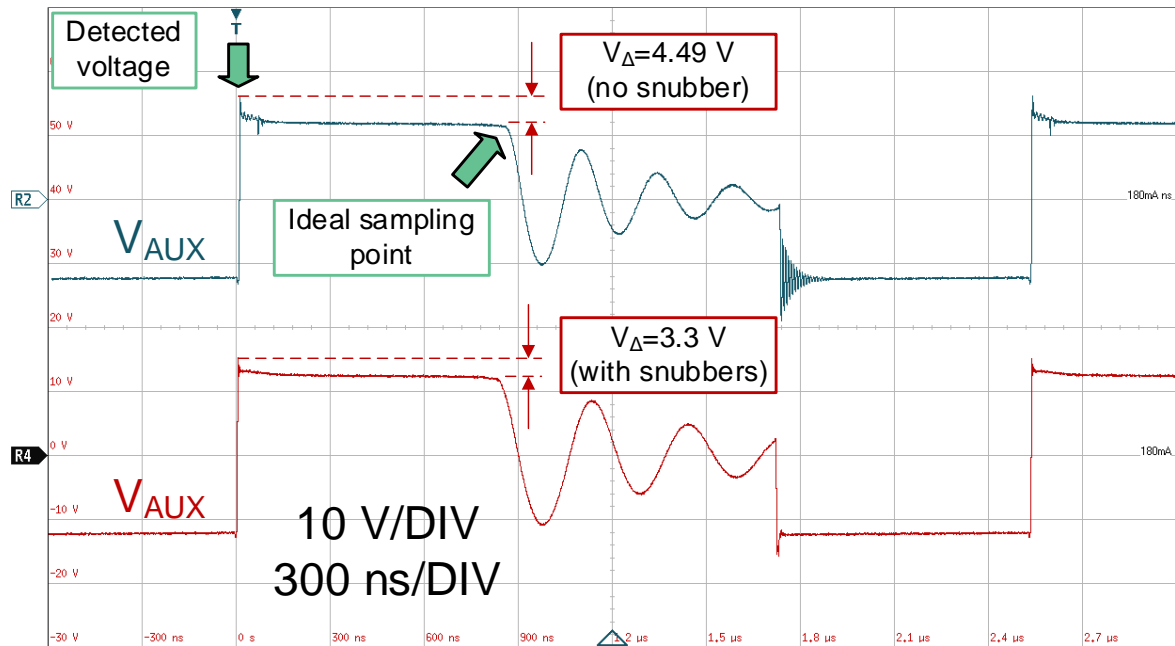
$$C_C \times R_C = \frac{L_S}{R_S}$$



(この例では 0.33Ω 0603 ショント抵抗を使用)

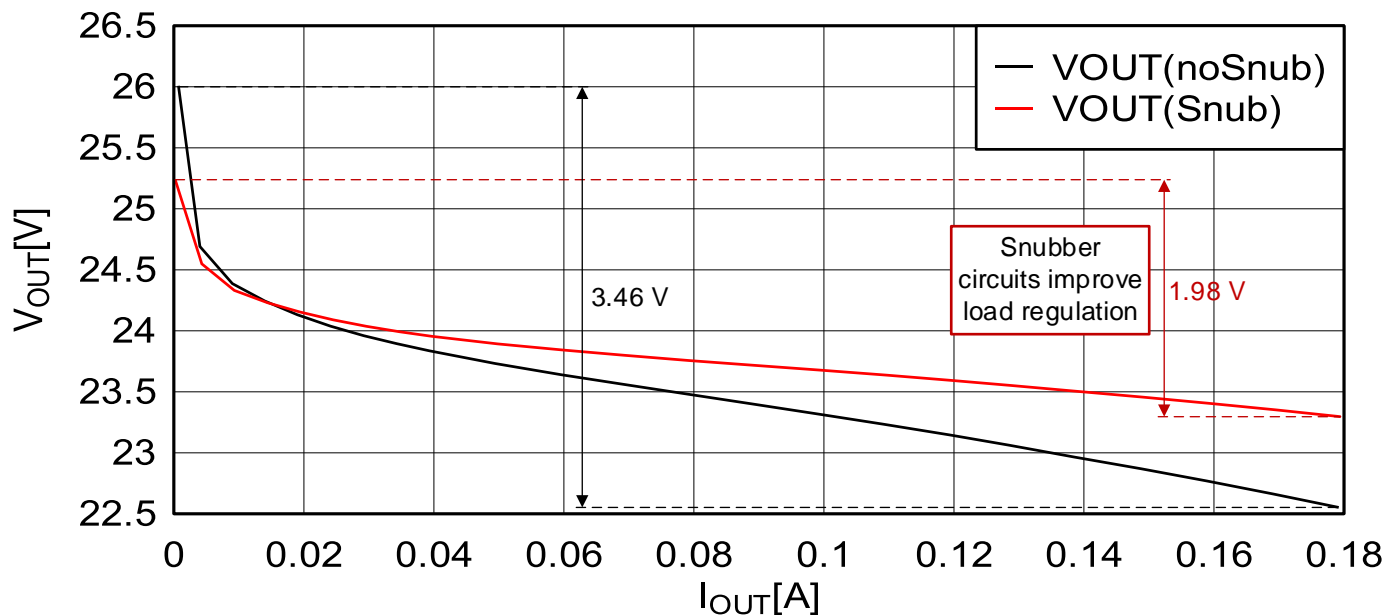


# $V_{AUX}$ 波形に対するスナバ回路の効果



$I_{OUT} = 180\text{mA}$  の  $V_{AUX}$  波形

# ロードレギュレーションに対するスナバ回路の効果



# まとめ

- PSR フライバックは、低コストの絶縁型 DC/DC コンバータにおいて一般的になっています
- 従来型の昇圧コントローラを使った PSR フライバックには、フィードバックに関する以下の検討事項があります
  - 特定の動作条件における最小デューティ サイクルおよび最大デューティ サイクルを特定する
  - 出力電圧  $V_{OUT}$  を追従するように  $V_{AUX}$  エンベロープ ディテクタ(フィルタ) を設計する
  - スナバを使用してリングングを最小限に抑える
  - 自己バイアス パスとフィードバック パスを分け、高速過渡応答を可能にする
  - 電流センシング抵抗に補正回路を追加する
  - エンベロープ ディテクタで大きな位相マージンに対応できるようにすることを考慮に入れながら補正を設計する
  - 過渡応答の最小入力電圧、最大入力電圧、および公称入力電圧を確認する

# Resources and more reading

## [UCC28700-Q1 Datasheet, chapter 7.4.1](#)

- How the discriminator and sampler circuit works

## [LM5180-Q1 Datasheet, chapter 7.3.2](#)

- How the frequency fallback, BCM and PSR work

## [Power Stage Designer software](#)

- Essential tool for initial component selection

## [Under the Hood of Flyback SMPS Designs](#) (SLUP261)

- In-detail description of flyback converters

## [Simulation tool download link](#)

- Design resources for this presentation

## [PSPICE-FOR-TI](#)

- PSpice® for TI design and simulation tool



© 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)



## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated