

高速負荷応答COT（コンスタントオンタイム）制御と MPSの新しいヒステリシス制御トポロジ ZDP™（Zero Delay PWM）

蜷川 顕二
シニアFAE
MPSジャパン

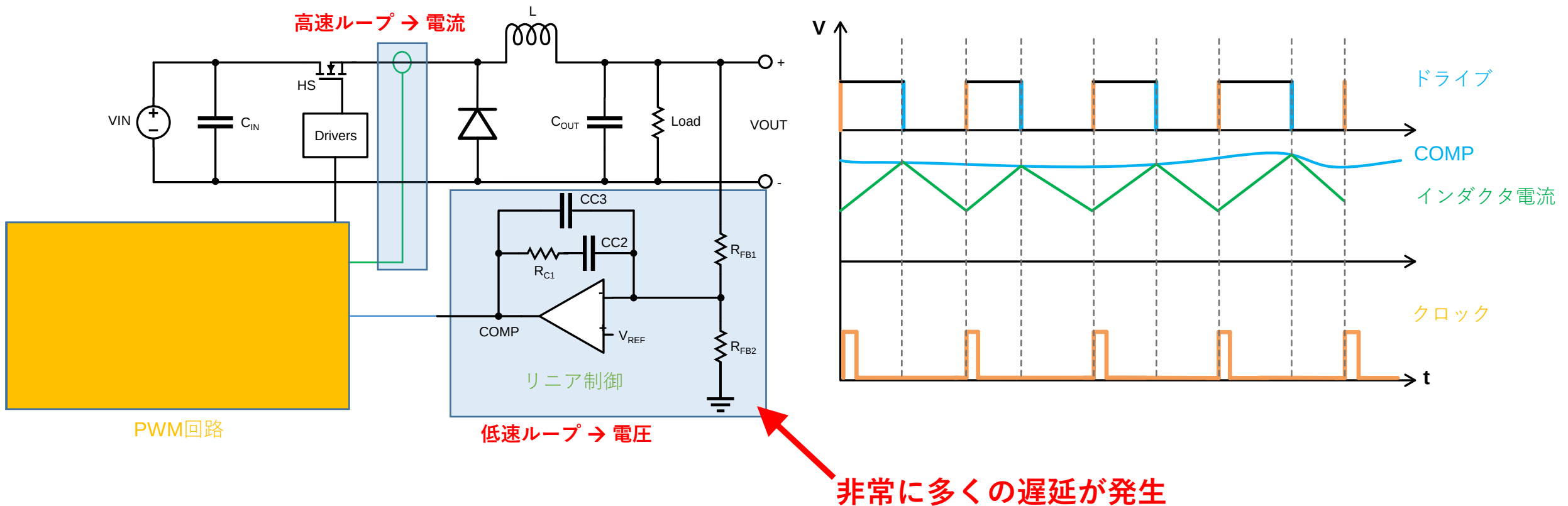
2024年12月

MPS

トピック

1. ピーク電流モード制御の基礎
2. コンスタントオンタイム (COT) 制御
3. COTの利点と課題
4. MPSのアダプティブCOT制御
5. MPSのFPGA用COT電源モジュール
6. ハードウェア設計をシンプルにするために電源モジュールを使用する

ピーク電流モードの基礎



エラーアンプ出力 (COMP) が次のサイクルでのピーク電流値 (I_{PK}) を決める:

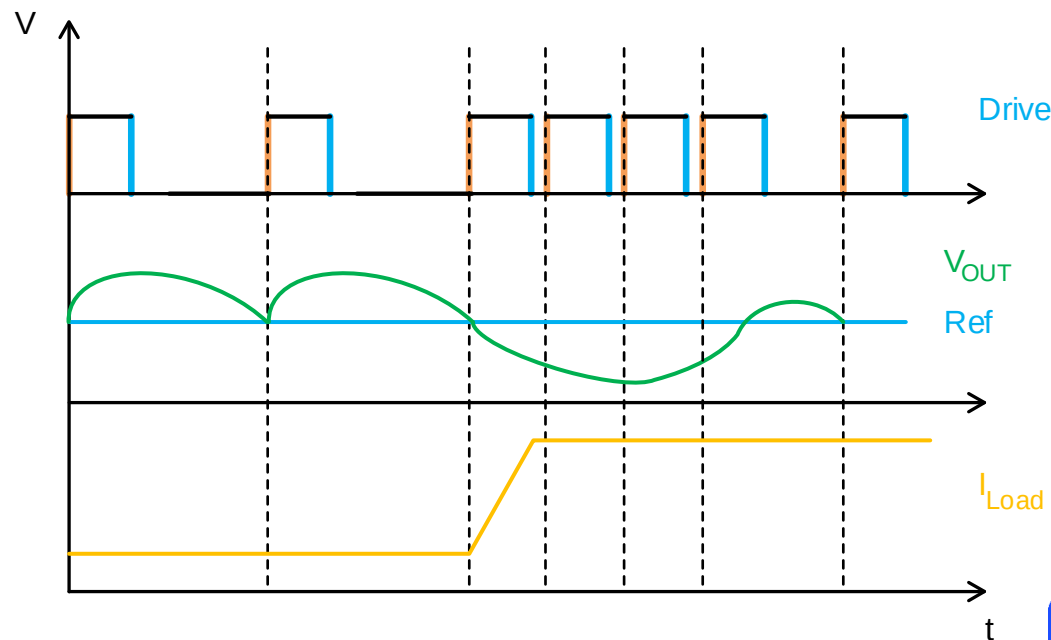
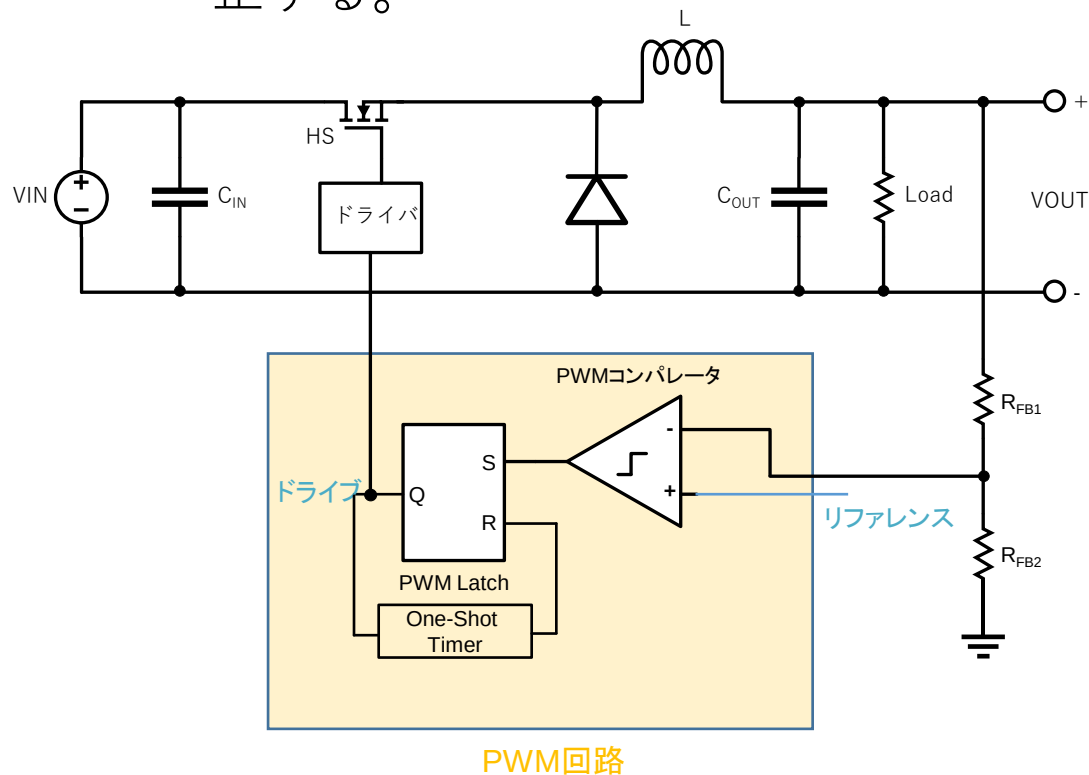
- 補償電圧 (V_{COMP}) が上昇すると、 I_{PK} と ON デューティが増加する。
- 入力電圧 (V_{IN}) が低下すると、 I_{PK} に達するまで ON デューティが増加し、出力電圧 (V_{OUT}) が維持される。

コンスタントオンタイム (COT) 制御

高速過渡応答が必要なアプリケーションでは、電流モードによる制御は十分ではない。

- **ゴール:** より高速な過渡応答

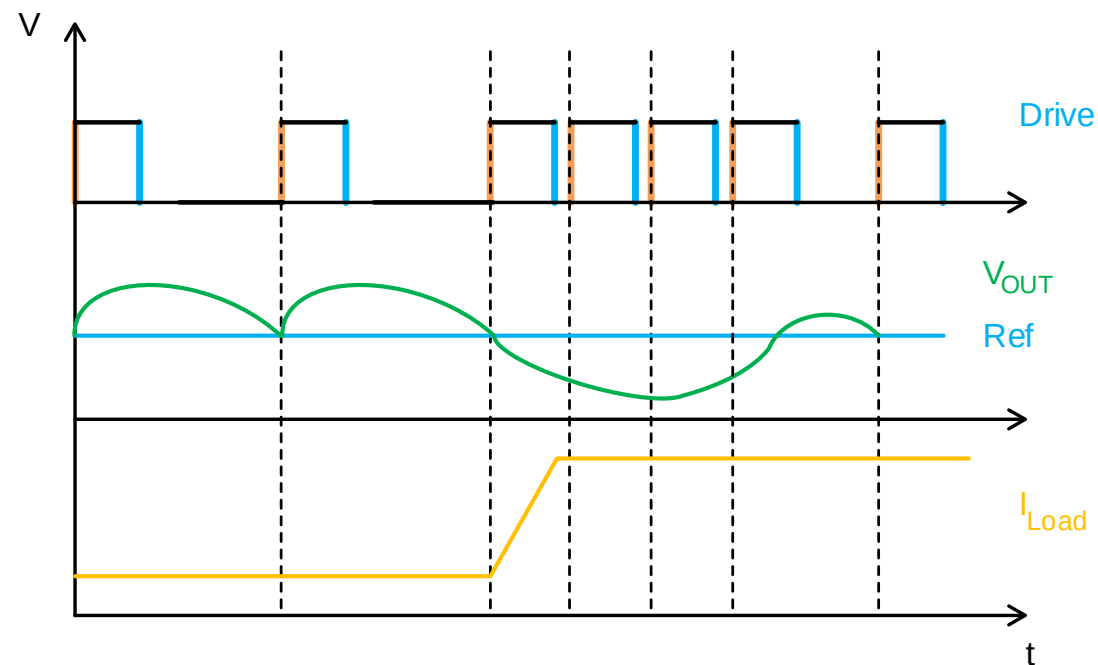
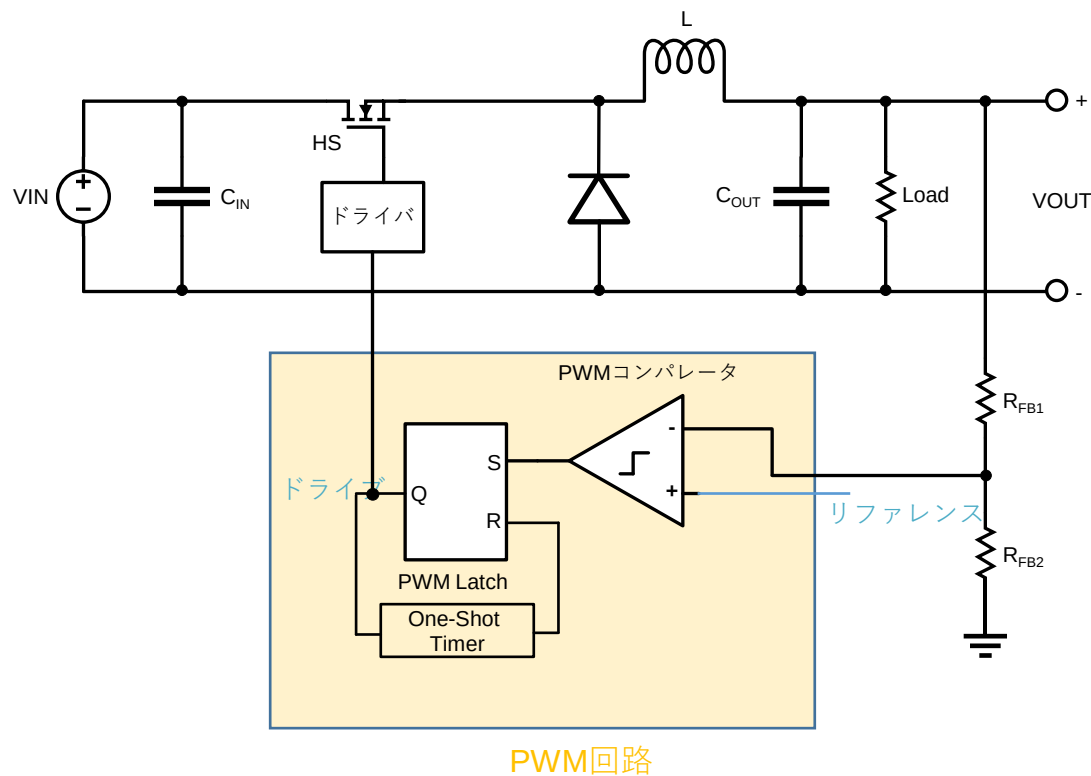
- クロックタイミグを待たないことで過渡応答を改善できる。
- COT (コンスタントオンタイム) 制御を使用して、周波数を変化させながらオン時間を修正する。



コンスタントオンタイム (COT) 制御

COT制御ではクロックは使用しない:

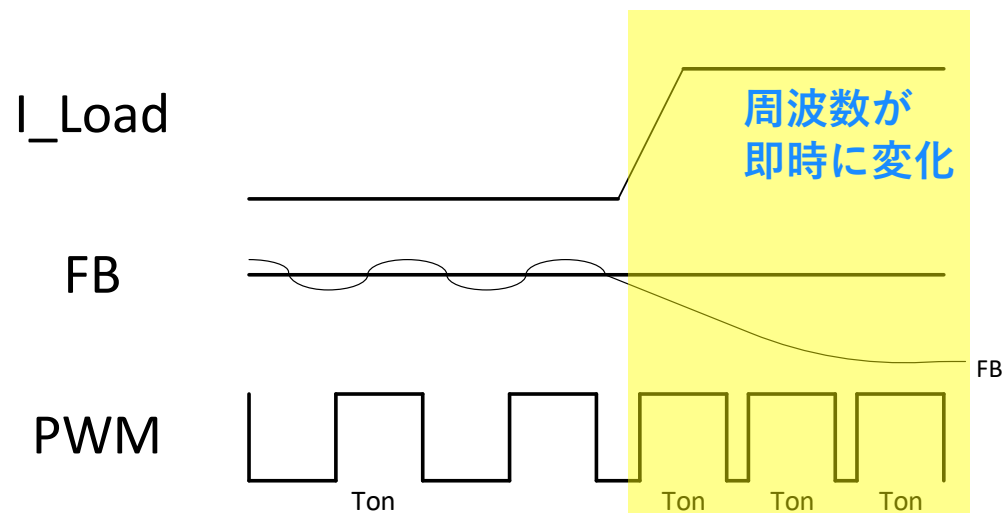
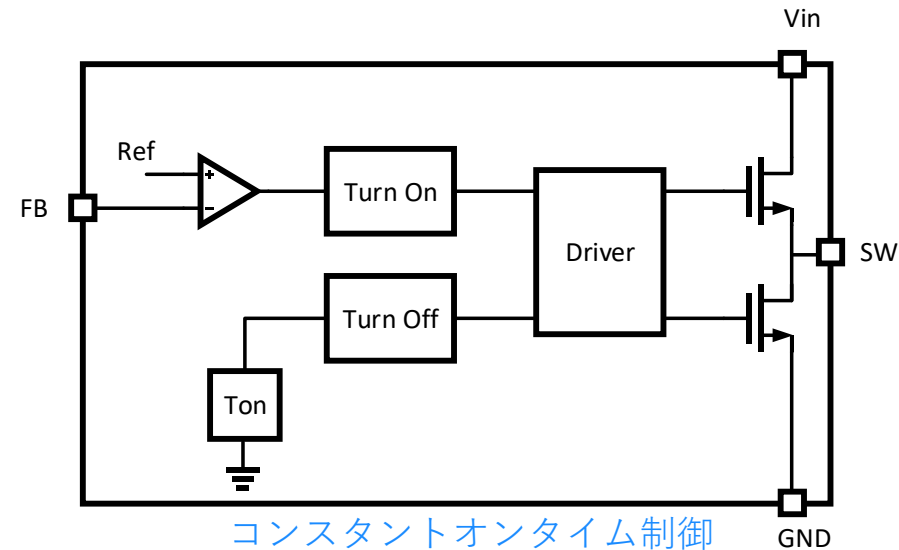
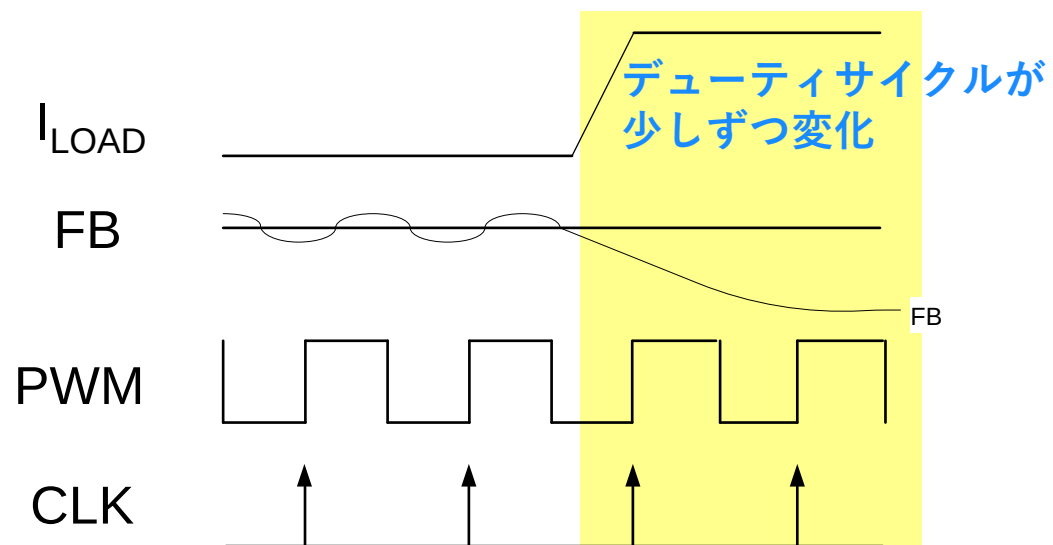
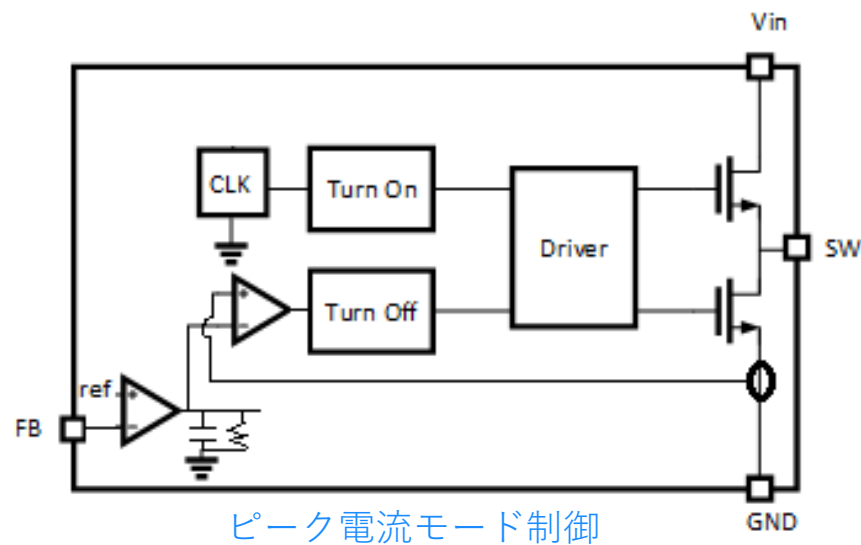
- V_{OUT} が基準電圧 (V_{REF}) を下回ると、ハイサイドMOSFETがオンする。
- オン時間は一定・固定で、ワンショットタイマーによって決定され、オフ時間は可変。



コンスタントオンタイム (COT) 制御

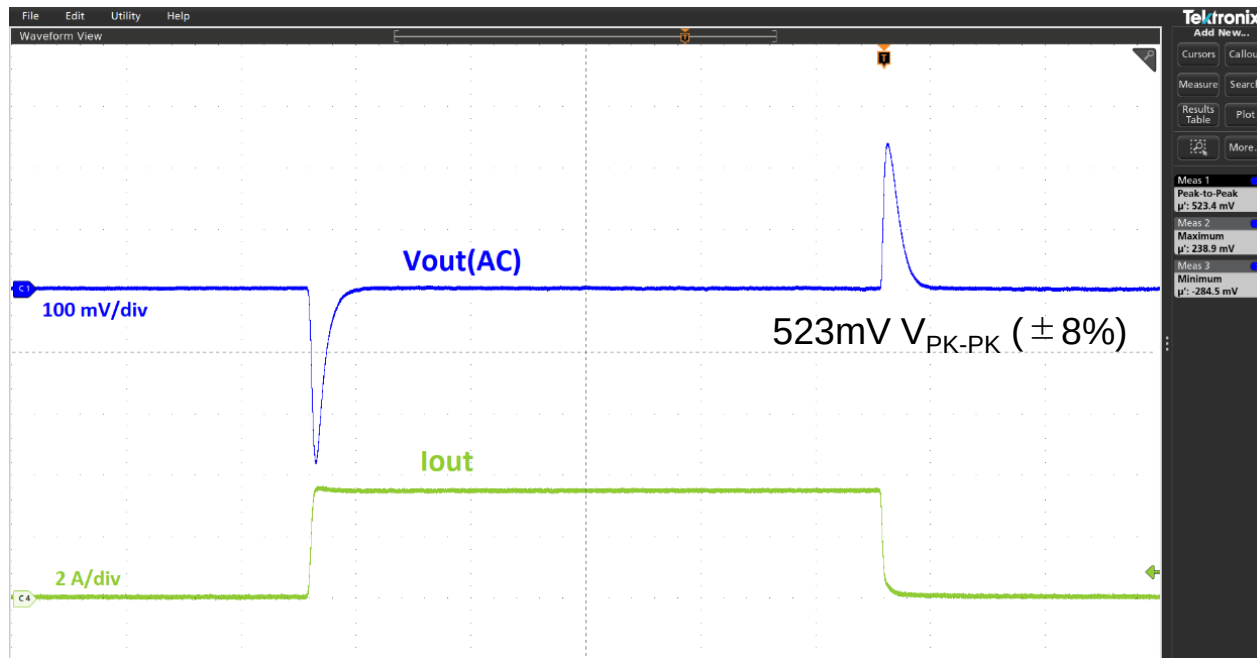
長所	短所
- 優れた負荷応答性能: - 固定周波数電流モードの約3~4倍の速さ - シンプルなアーキテクチャで補償の必要なし - 軽負荷から重負荷へのシームレスな移行 - 内部発振器 (Clock) 不要	- FB上に何らかのスロープ (ランプ・傾き) を生成する必要がある (Co ESRで生成するなど) - オフ時間が変動するので、スイッチング周波数 (f_{sw}) が一定とはならない - 内部クロックが無いので、外部クロックに同期できない - SW周波数が変動するので、出力フィルタの設計が難しくなり、センサ・アナログ回路等の高感度システムでは好まれない場合が多い

COTの利点: 高速過渡応答

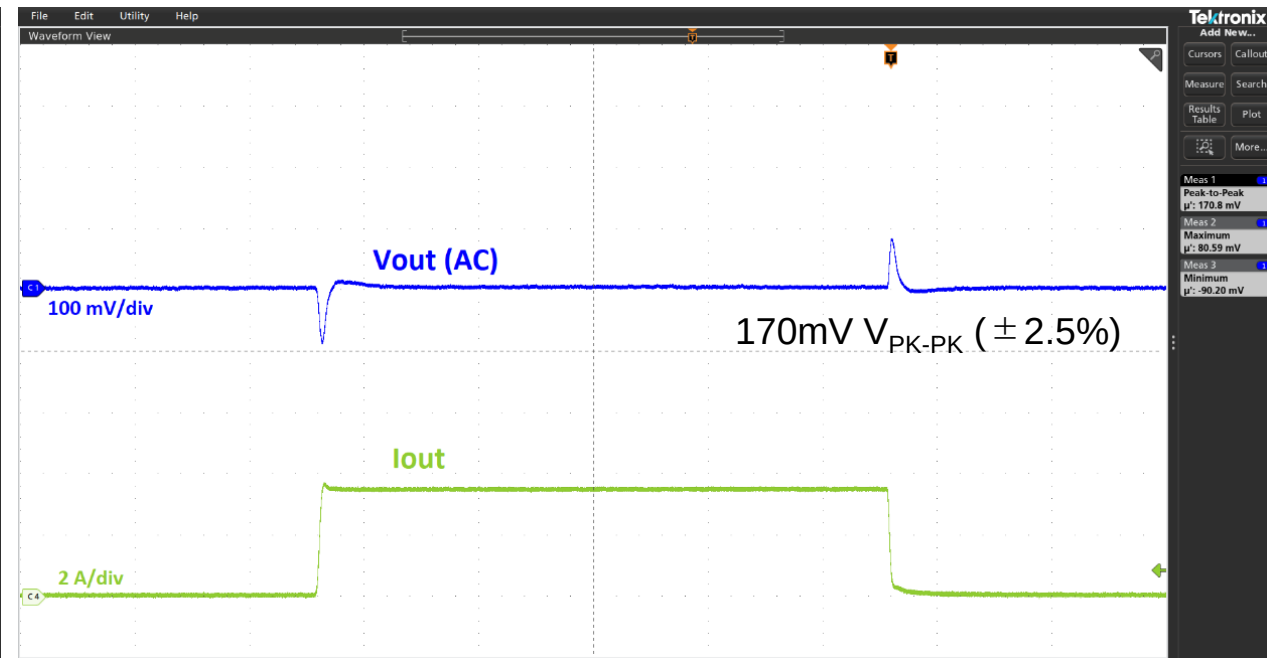


COTの利点: 高速過渡応答

ピーク電流モード



コンスタントオンタイム



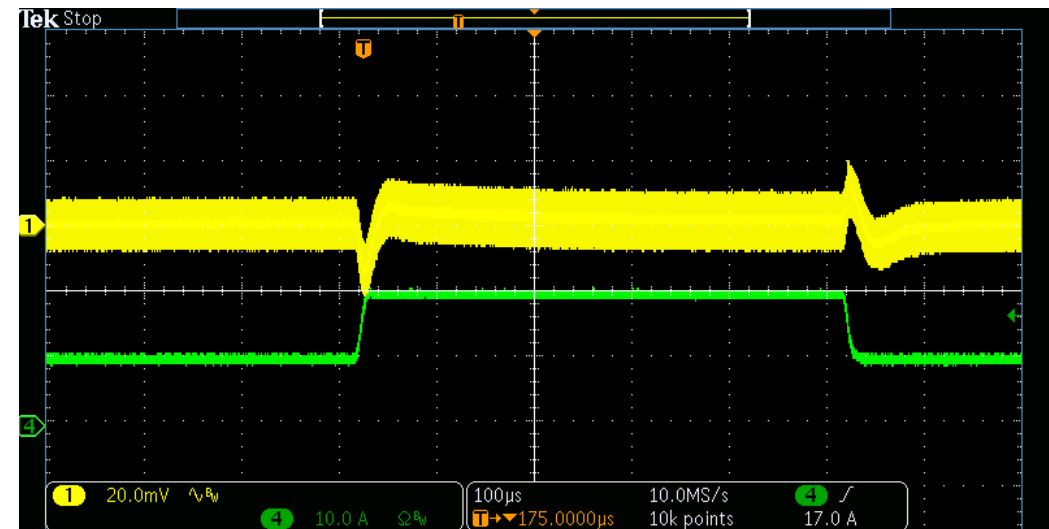
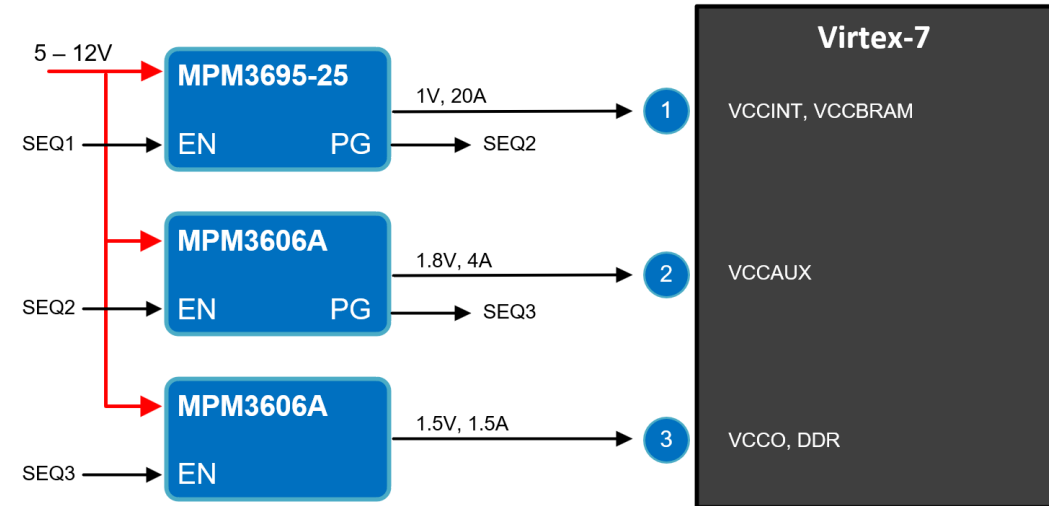
- 同じ入出力仕様と部品でピーク電流モードの3倍速い過渡応答を実現:
 - 12V入力、3.3V出力、0A~3.5Aの負荷ステップ
 - $1\mu\text{H}$ L_{OUT} 、 $2 \times 22\mu\text{F}$ C_{OUT}

例: Virtex-7

VCCINT安定性要件: 3% (30mV)

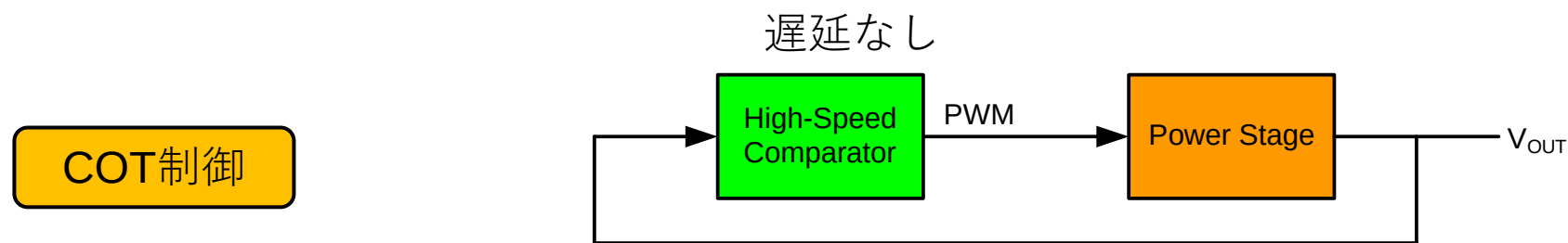
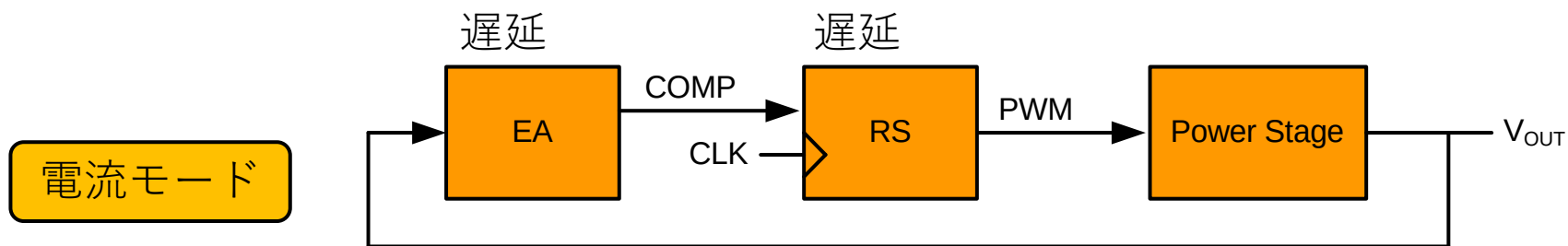
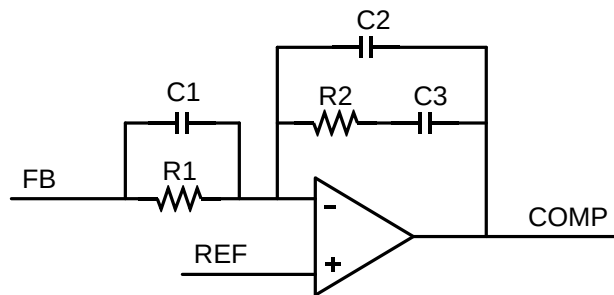
MPM3695-25

- 3V~16Vの V_{IN} 範囲
- 最大20Aの連続出力電流 (I_{OUT})
- モニタリングおよび制御のためPMBus / I²Cに対応
- 高速過渡応答のためのCOT制御
- 0°C~70°Cの温度範囲で1%の基準電圧
- V_{OUT} リモート検知
- 最大50Aの並列動作に対応
- QFN-19パッケージ (10mm x 12mm x 4mm)



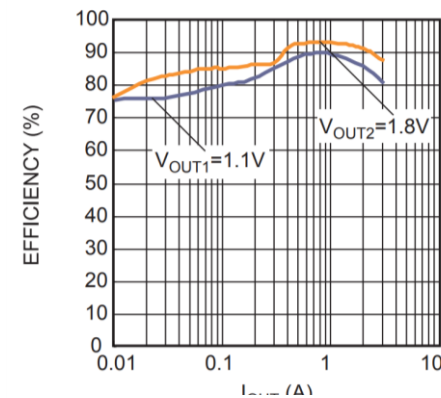
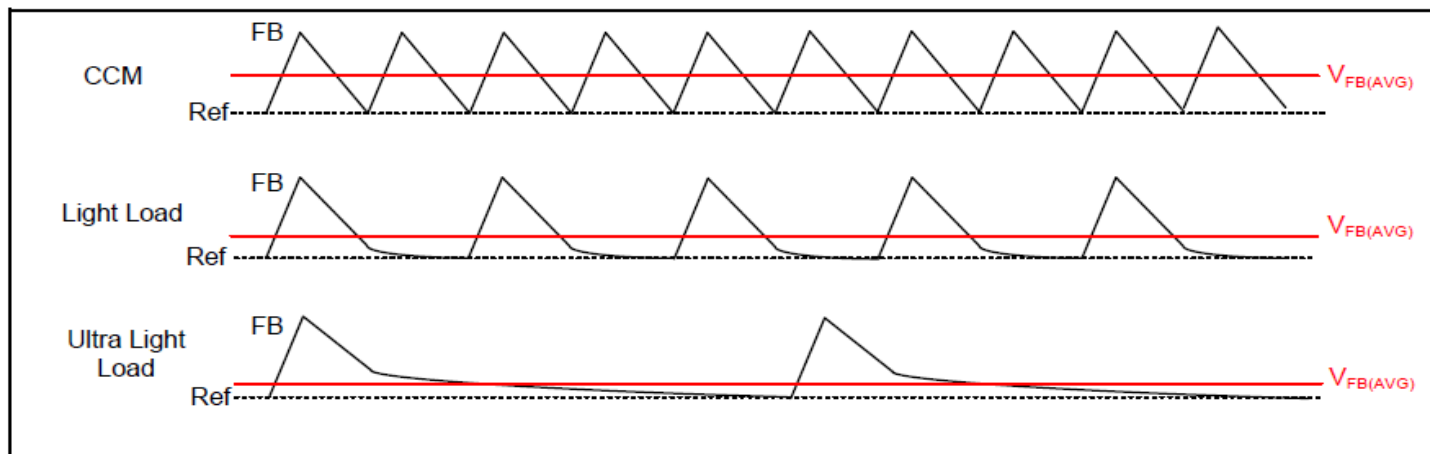
COTの利点: シンプルな構造

COT制御は補償器を必要としないため、補償器のパラメータの調整に時間を費やす必要がない。

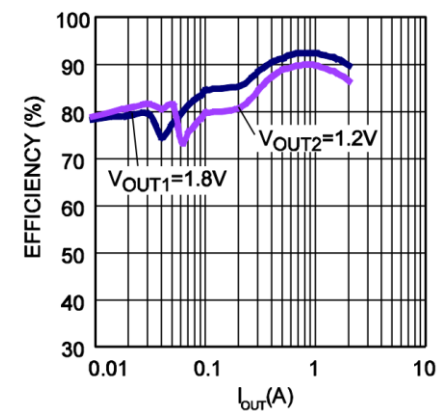


COTの利点: 軽負荷から重負荷へのシームレスな移行

周波数が可変であるため、COT制御は本質的なパルス・スキップ機能を提供し、軽負荷運転と連続導通モード (CCM) 間のリニアな移行を可能にする。

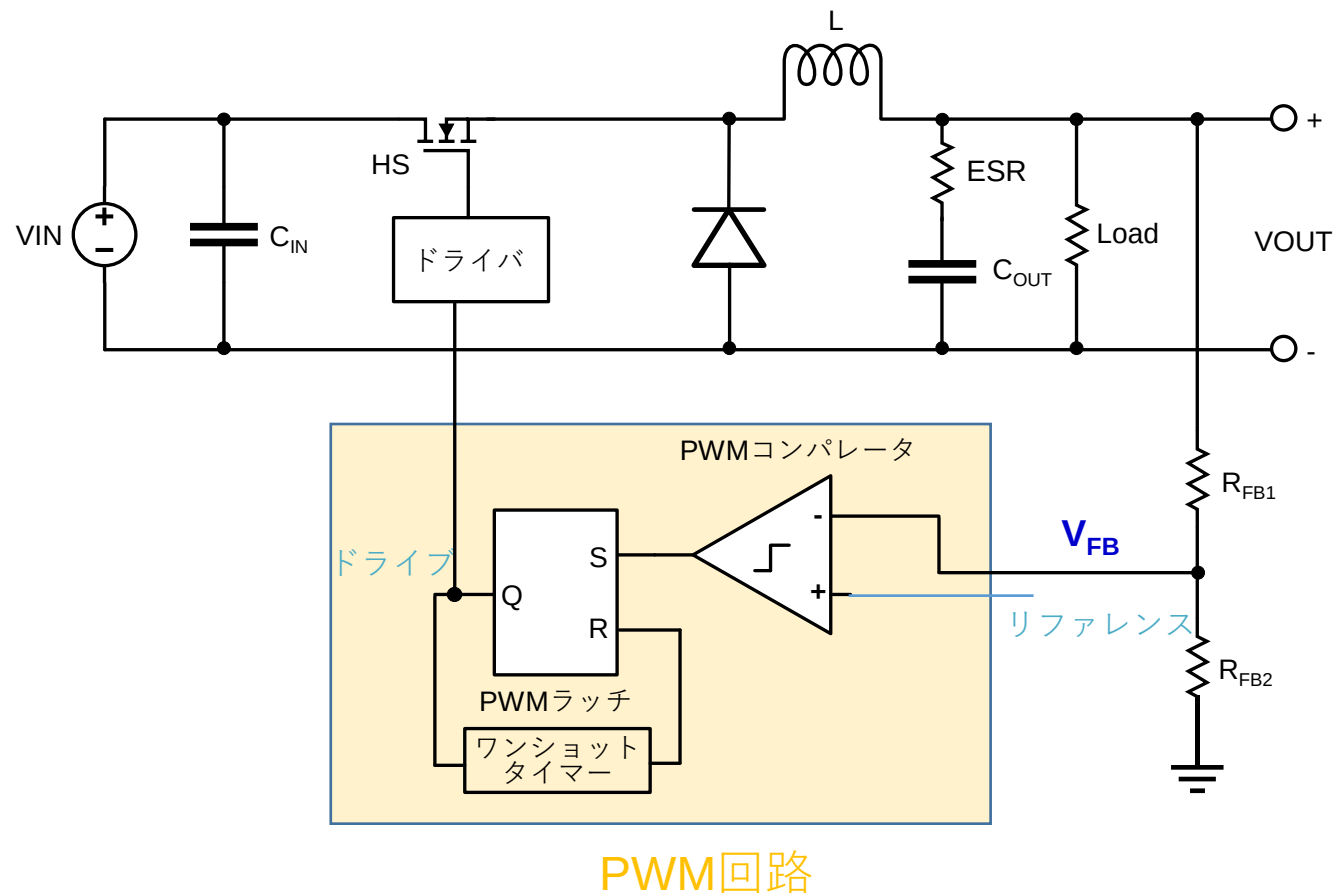


COT制御



電流モード

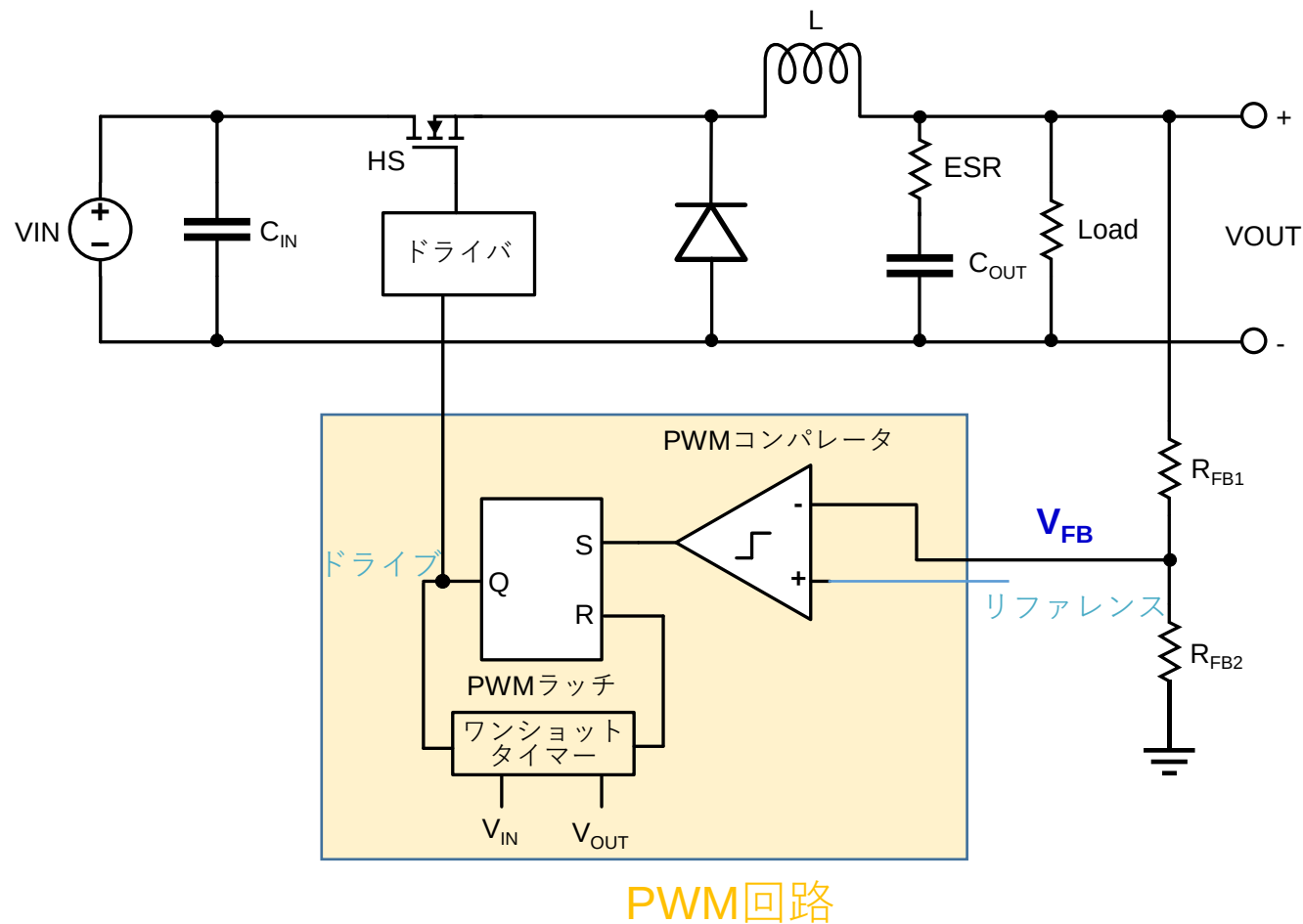
COTの課題: 定常状態でもSW周波数が変動



クロックがないため、COTコンバータの f_{SW} は V_{IN} 、 V_{OUT} および I_{LOAD} に大きく依存する。

定常状態 (I_{LOAD} 一定) であっても、 V_{IN} が変動すると、 f_{SW} が安定することはまず無く、特定のアプリケーションで問題となりやすい。

MPSのソリューション: アダプティブCOT制御



アダプティブCOT制御は、デューティ比 (V_{OUT}/V_{IN}) からオン時間 (t_{ON}) を決め、ワンショットタイマー出力 (t_{ON}) を調整する。

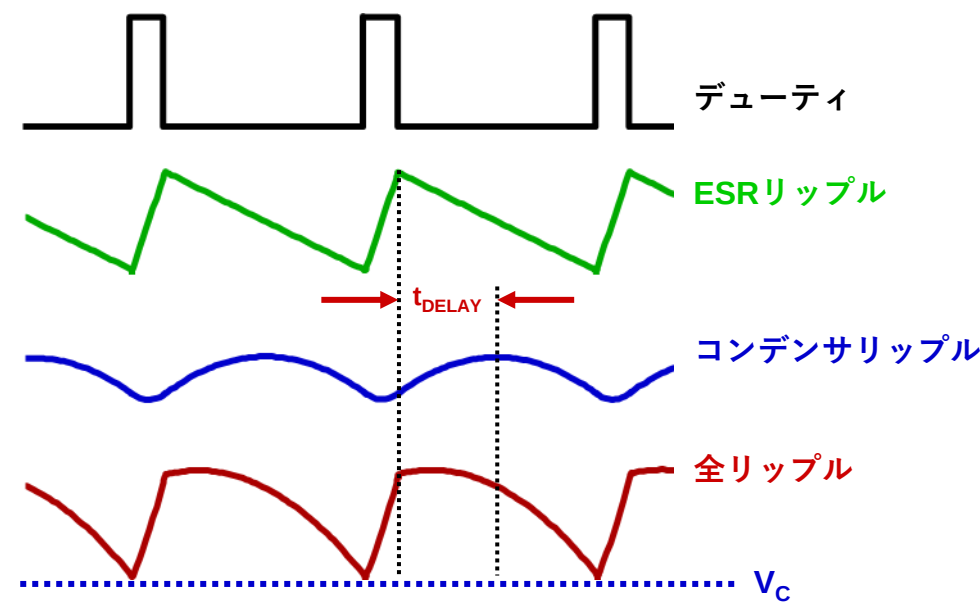
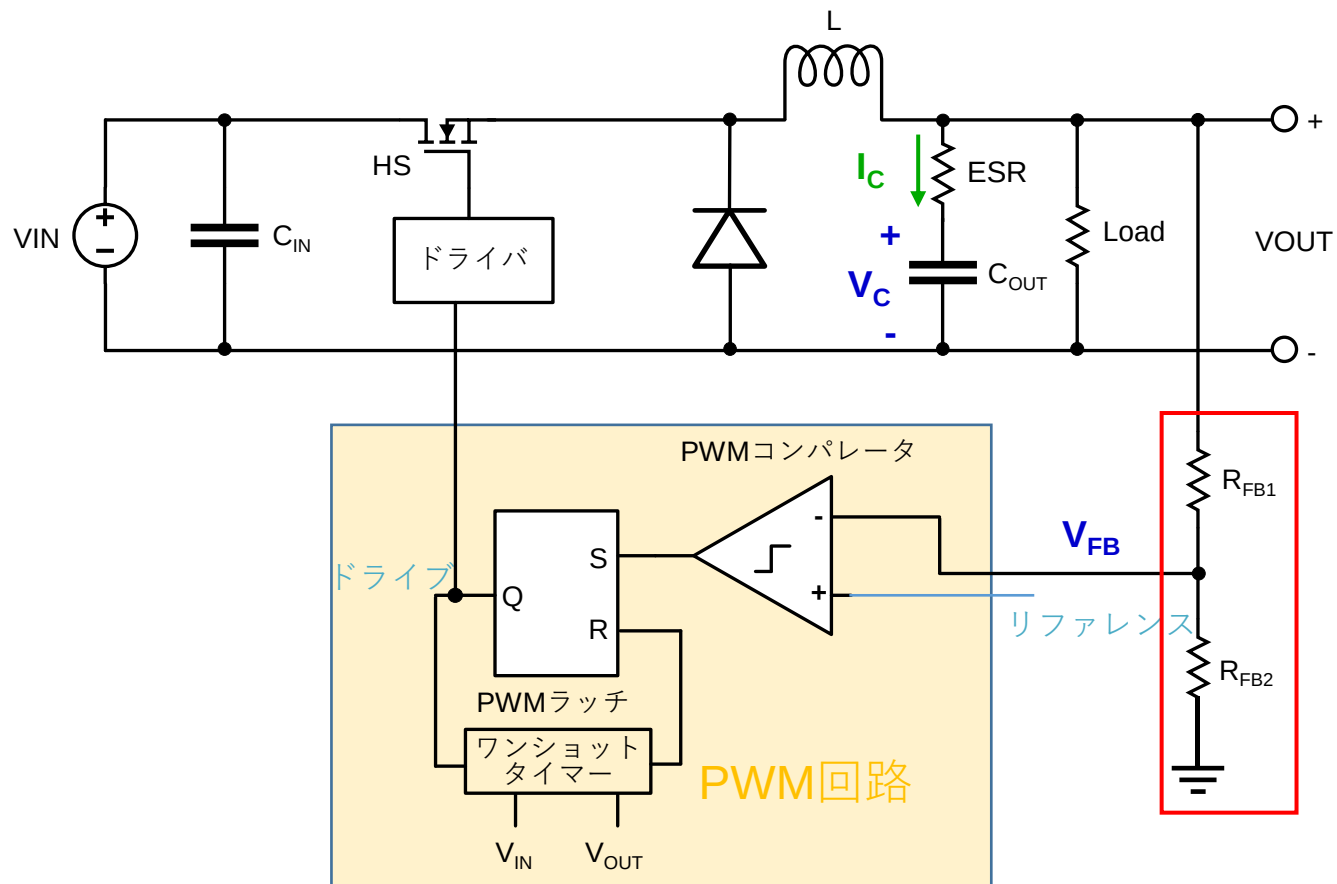
これにより、負荷変動時に周波数を即座に変えて応答できるという能力を犠牲にすること無く、定常状態で f_{SW} を安定・固定させることが可能となる。

COTの課題: 系の安定性がESRに依存している

COT制御は、フィードバック電圧を設定された基準電圧と比較する。

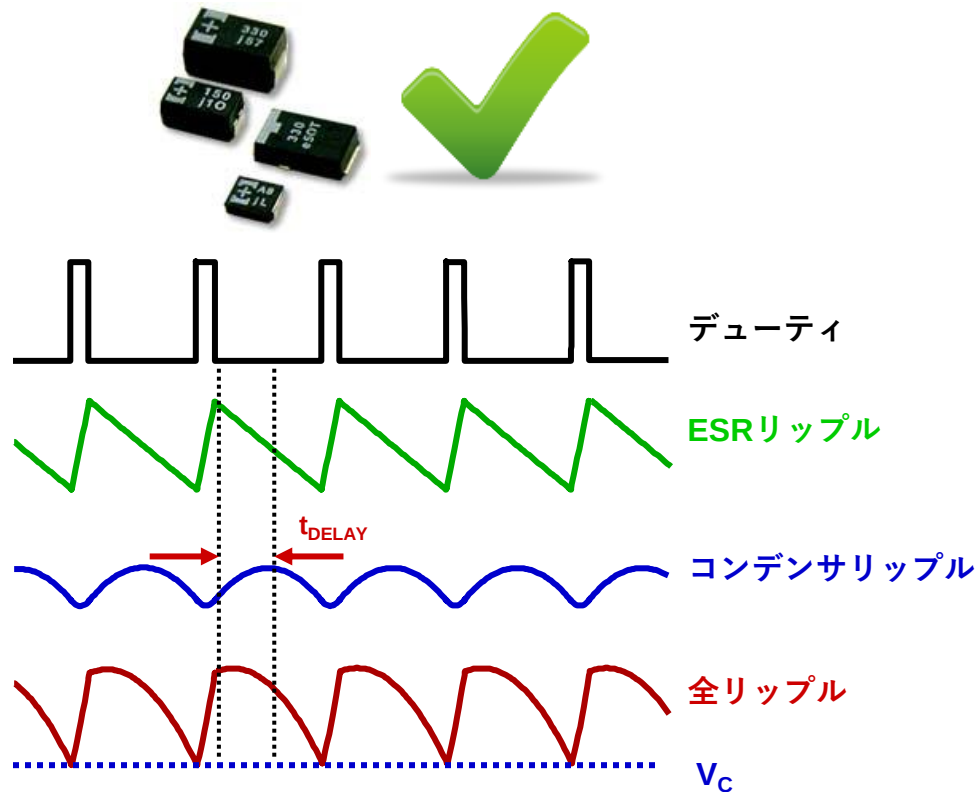
フィードバック電圧リップルには2つの主な部分がある。

1. ESRリップル: インダクタ電流 (I_L) に正比例、遅延 / 位相差なし
2. V_{CAP} リップル: 出力コンデンサの充放電により発生し、 I_L に対して遅延する

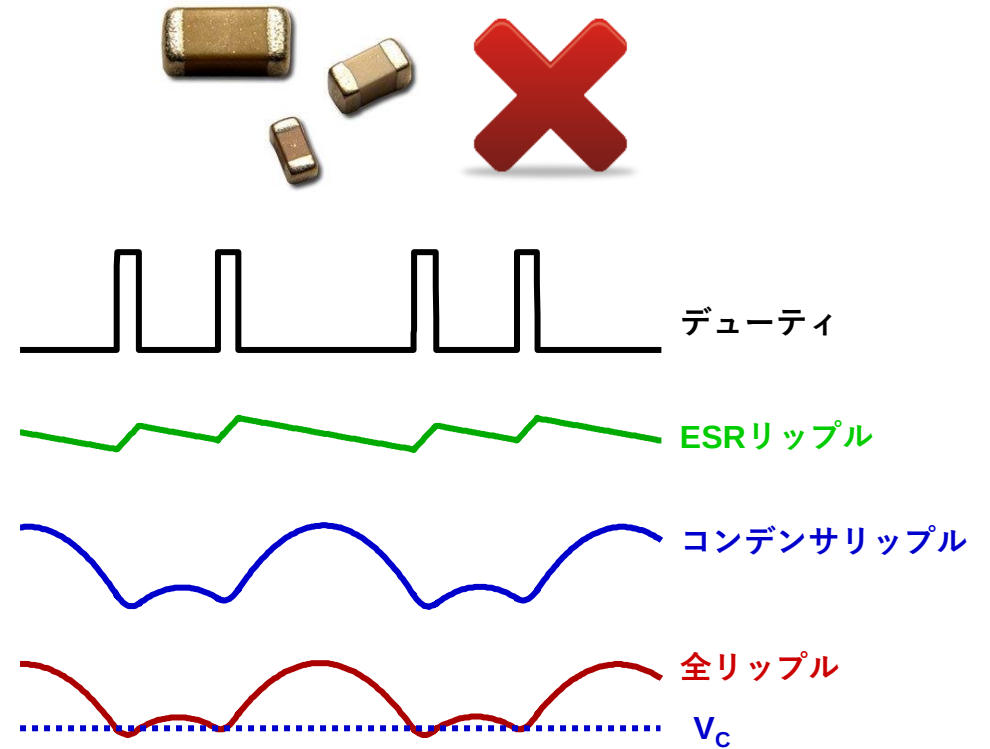


COTの課題: 系の安定性がESRに依存している

ESRリップルが支配的な場合、 V_{OUT} リップルは I_L と同位相となり、回路は正しく動作する。



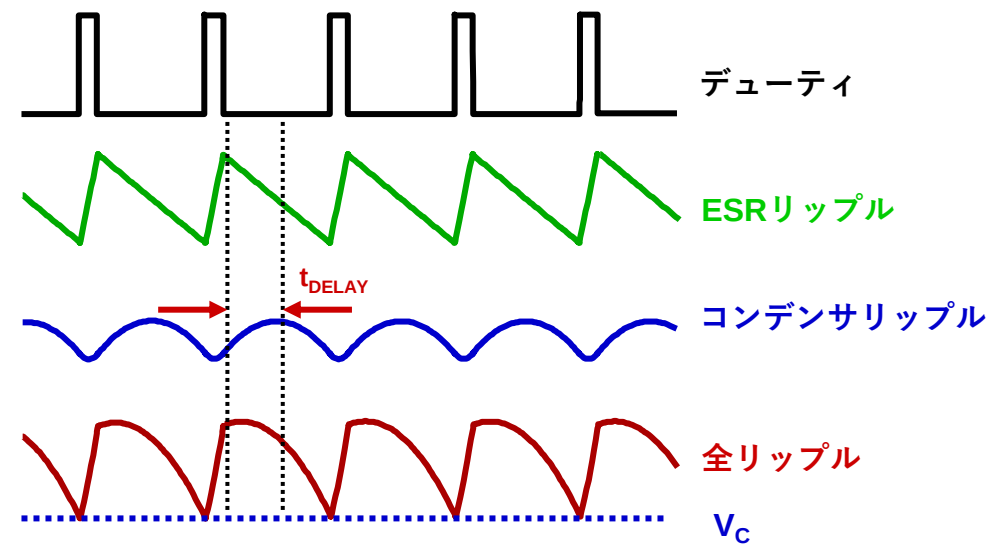
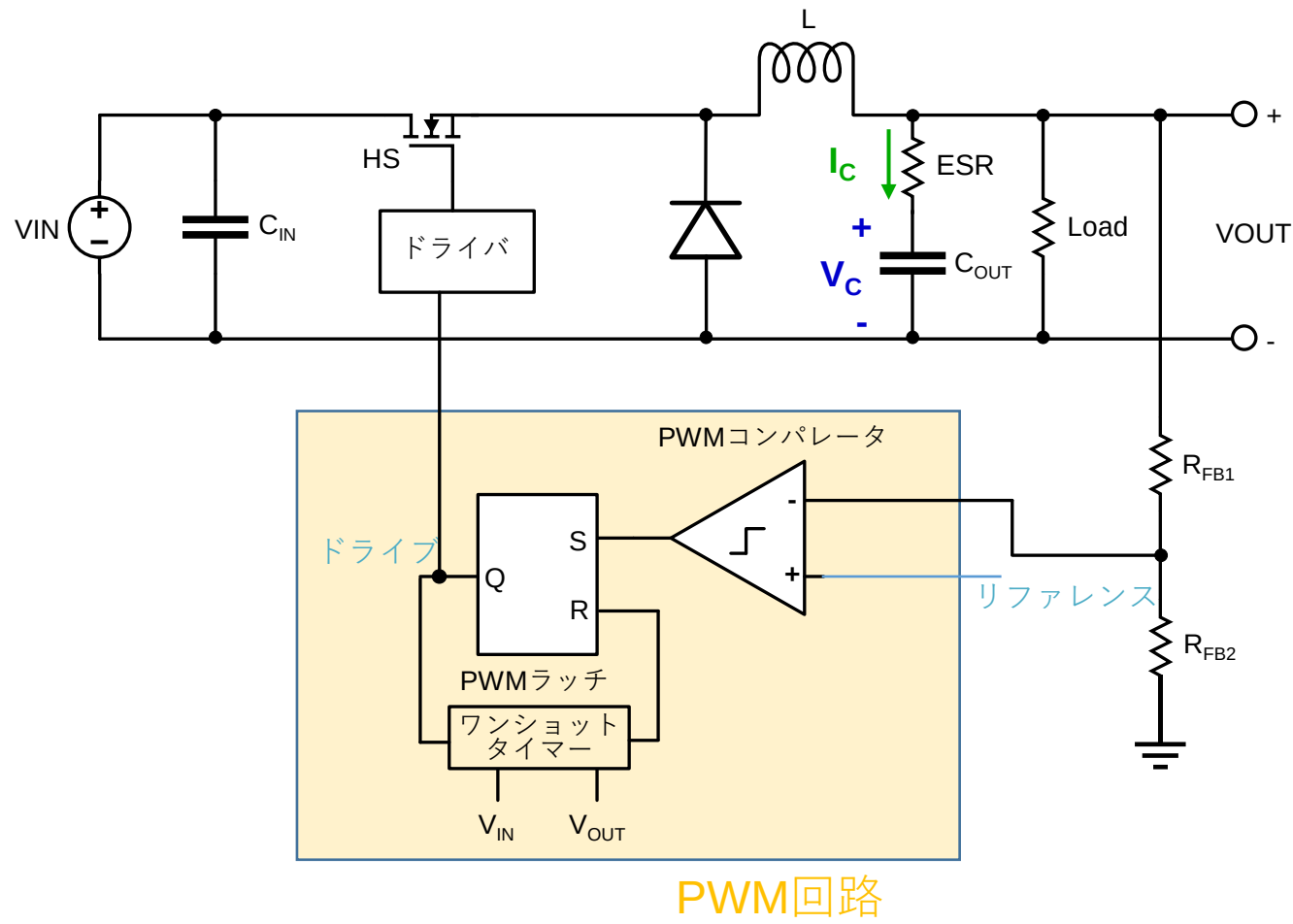
V_{CAP} リップルが支配的な場合、 V_{OUT} リップルは I_L と位相がずれており、回路はサブハーモニック発振に入る可能性がある。



COTは安定性のためにESRの大きな出力コンデンサ (C_{OUT}) を必要とする。
低ESRのコンデンサ (MLCCなど) を使用すると、回路が不安定になることがある。

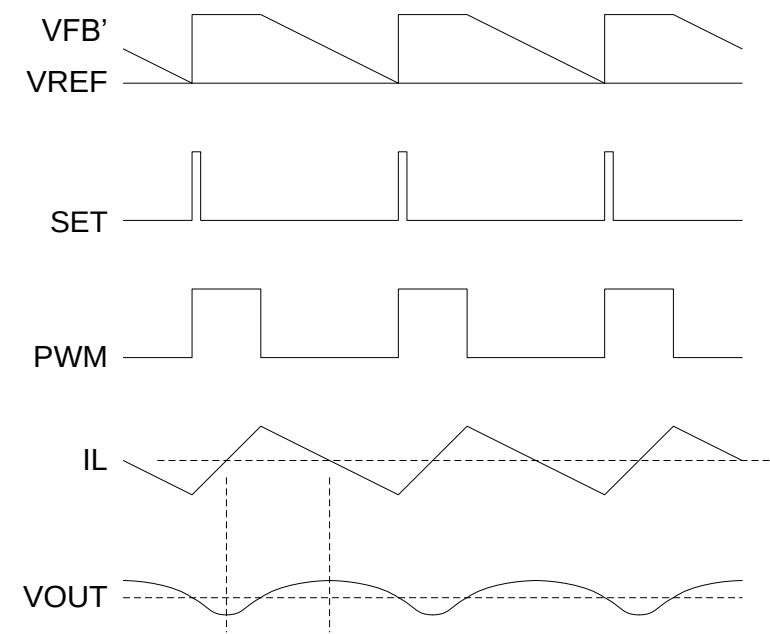
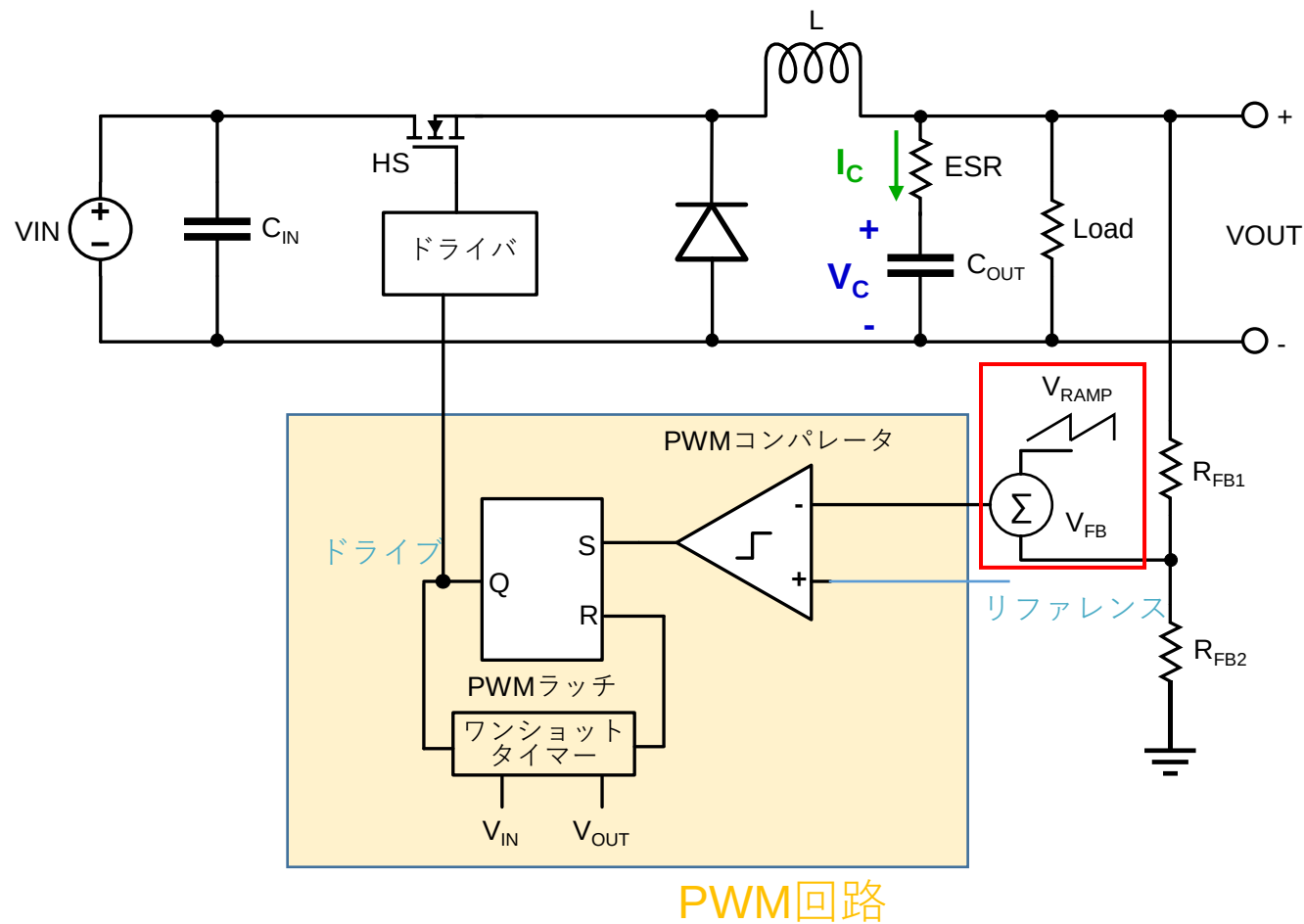
MPSのソリューション: 電流リップルインジェクション

オプション1: 十分なESRのあるC_{OUT}を使用する



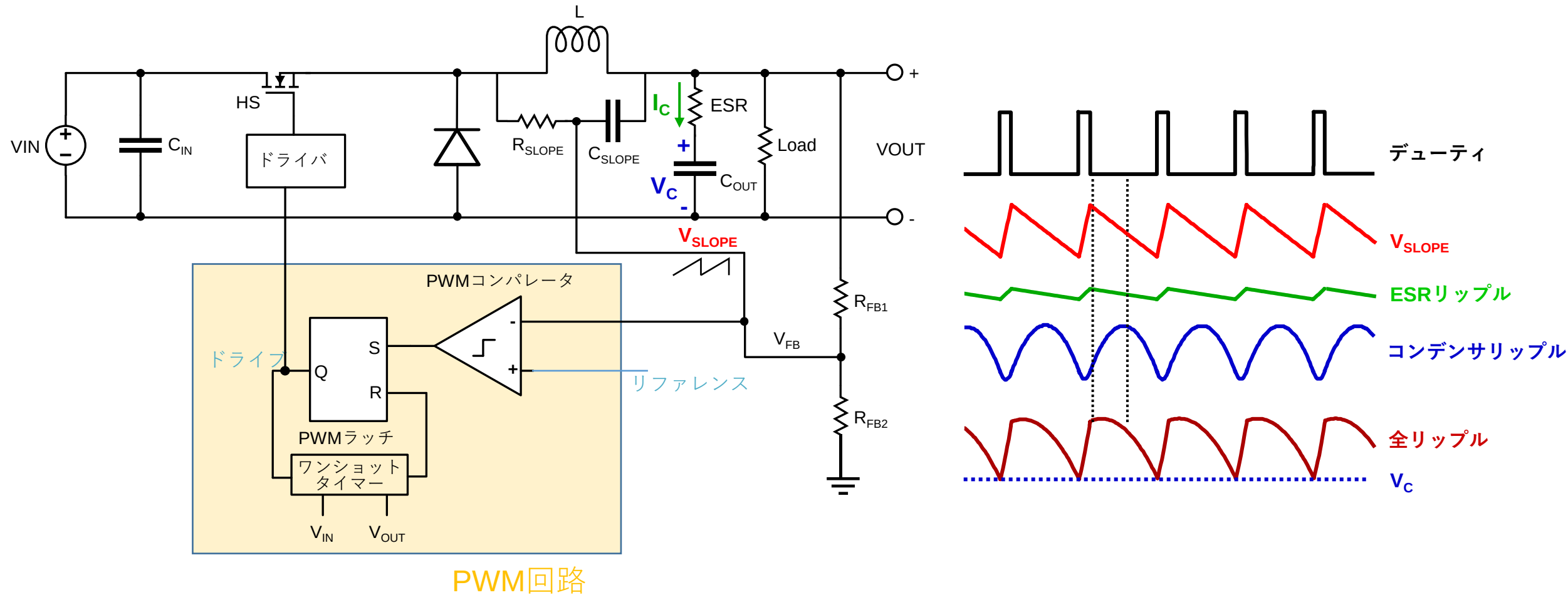
MPSのソリューション: 電流リップルインジェクション

オプション2: 外部ランプを追加する

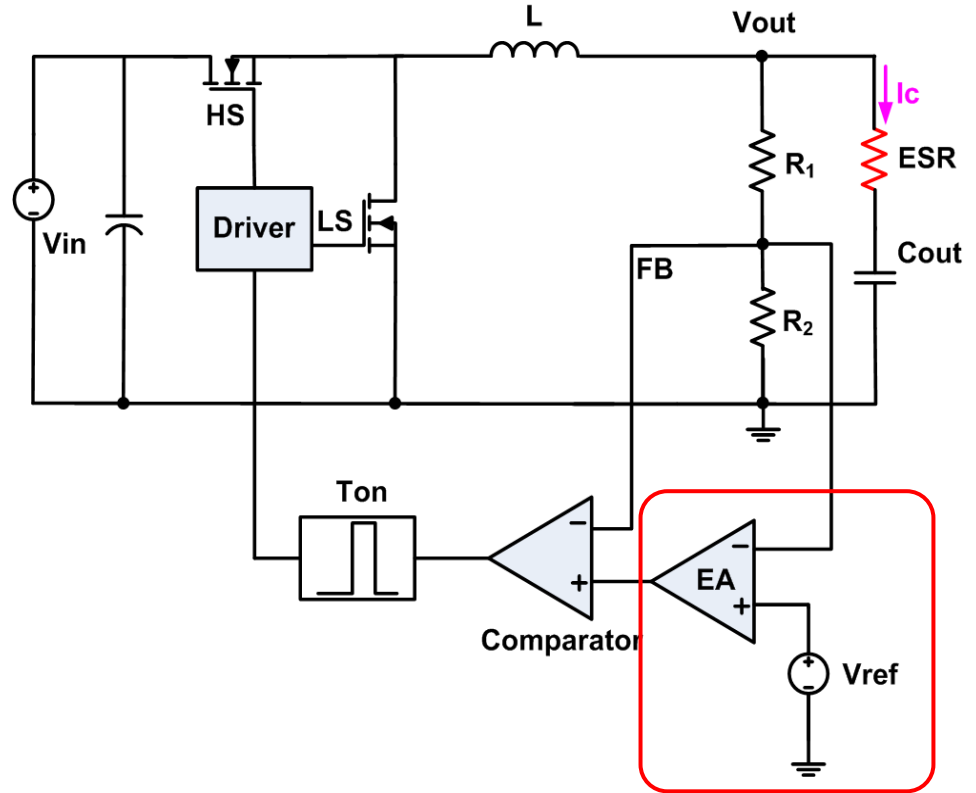
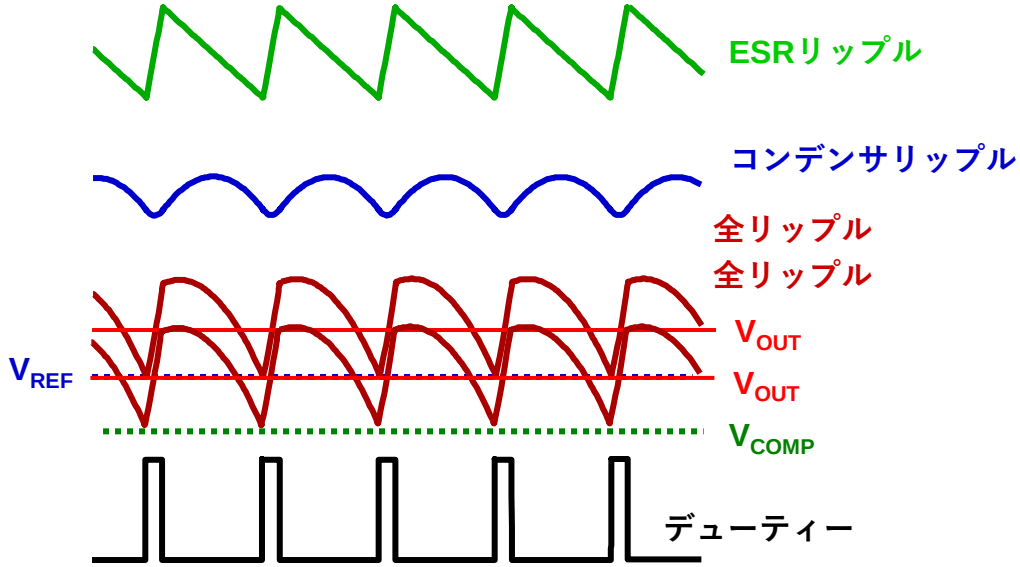


MPSのソリューション: 電流リップル・インジェクション

オプション3: RC回路を使用してスロープ電圧を生成し、FBリップルが I_L の位相にあることを確認する。



COTの課題: DCのオフセットエラー



- $\frac{1}{2}$ (V_{OUT} リップル) の影響を補正するために積分器を追加する。
- 電圧ループは低速ループで、DCレギュレーションのみに使用される。
- 過渡応答速度に影響を与えない

MPSのアダプティブCOT制御

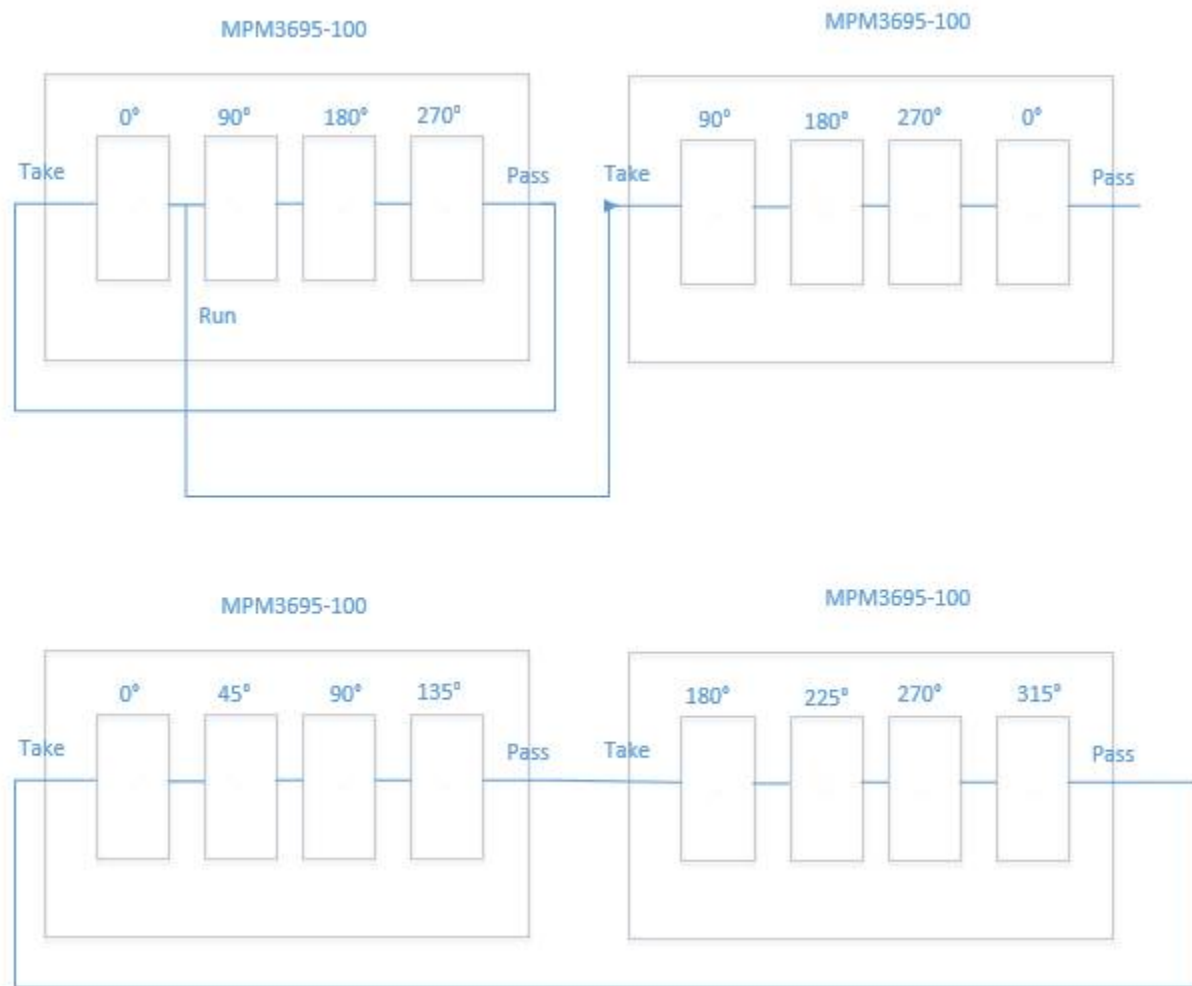
長所

- すぐれた負荷応答性能:
 - 固定周波数電流モードの約3~4倍速い
- シンプルなアーキテクチャで補償が必要ない
- 軽負荷から重負荷へのシームレスな移行
- 内部発振器（クロック）を必要としない
- 低ESRでもコンバータの安定性を保つスロープジェネレータ内蔵
- 負荷電流安定時は疑似固定周波数動作
- オートインタリーブにより、大電流化が容易

短所

- FB上に何らかのスロープ（ランプ・傾き）を生成する必要がある (Co ESRで生成するなど)
- オフ時間が変動するので、スイッチング周波数 (f_{sw}) が一定とはならない
- 内部クロックが無いので、外部クロックに同期できない
- 多くのノイズセンシティブなシステムにおいて、出力フィルタの設計が難しく、次善案

オートインタリーブCOT



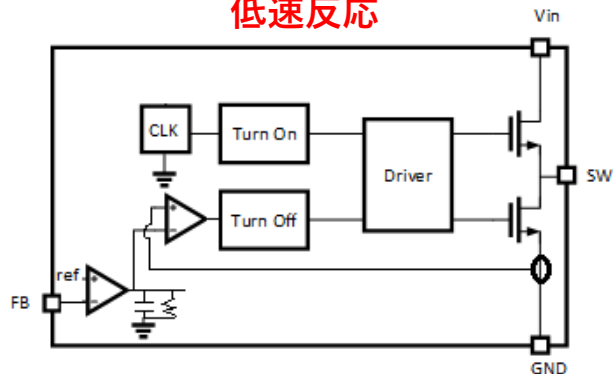
- MPSのスケラブルな電源モジュールで最大8相駆動が可能
- アクティブ電流バランスングにより、全出力に均等な電流を供給
- TAKEピンを介した自動マスター / スレーブ検出と位相カウント

ZDP™ Zero Delay PWM

次世代の電力制御アルゴリズム: ZDP™

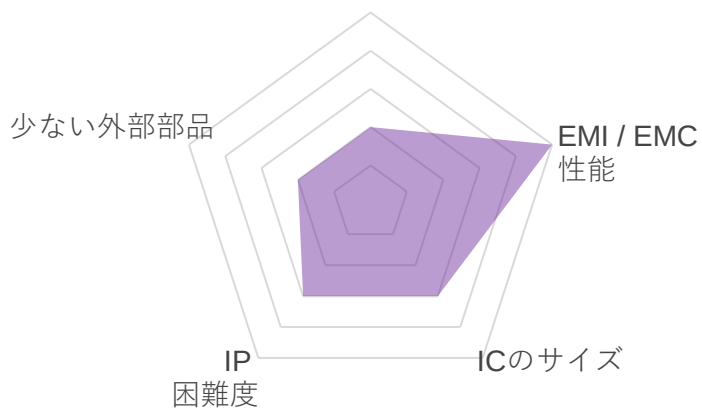
ピーク電流制御

固定周波数
低速反応



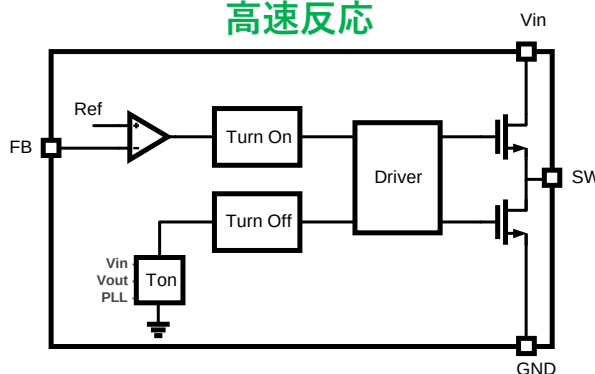
ONデューティ変化が遅い

反応速度



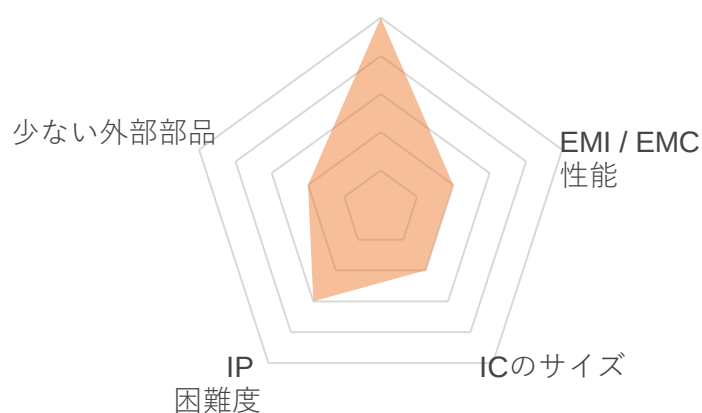
アダプティブCOT

固定周波数 定常状態時
高速反応



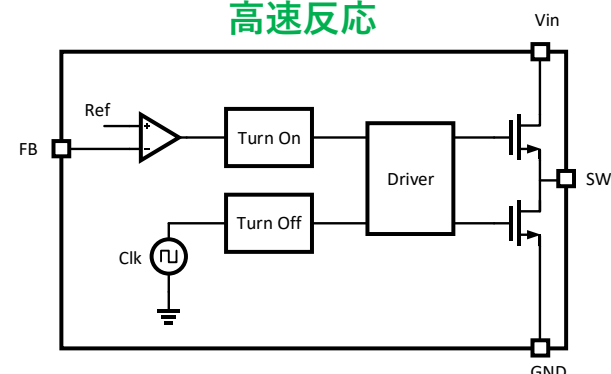
Fswが即座に変化

反応速度



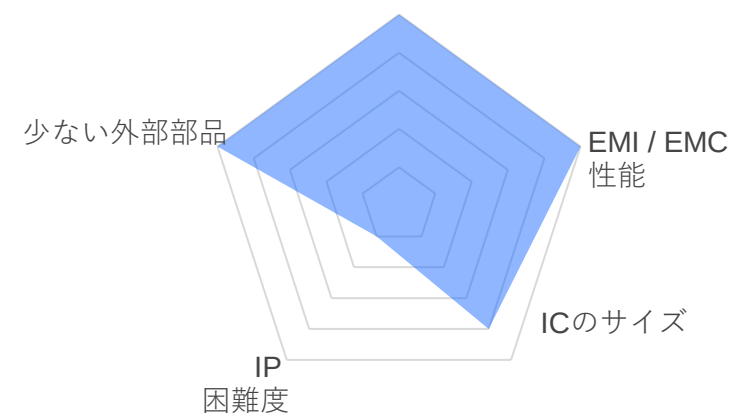
Zero-Delay PWM (ZDP™)

固定周波数
高速反応



ONデューティが即座に変化

反応速度

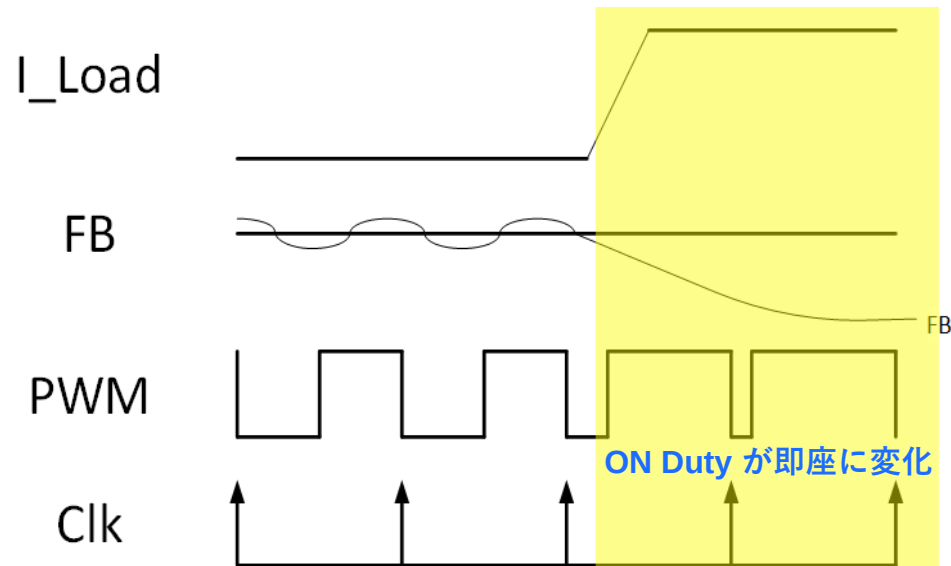
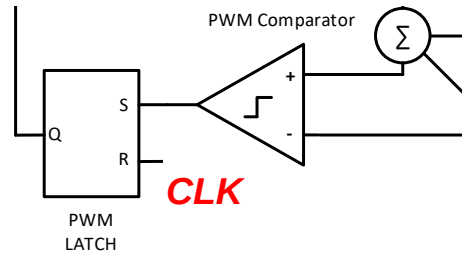


スパイダーチャート: 外方ほど良い

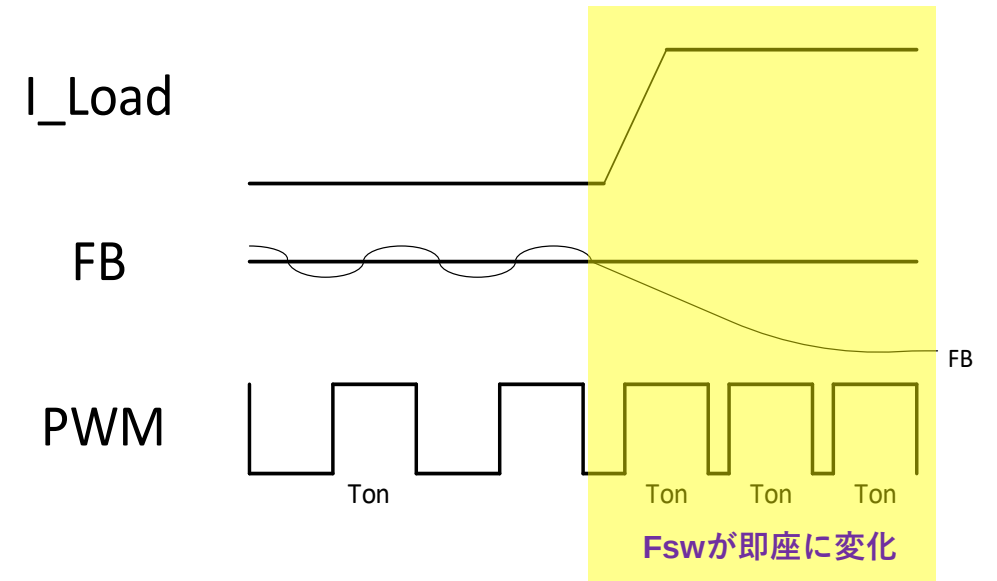
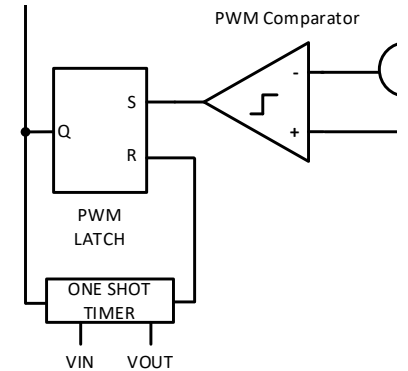


ZDP™ (Zero Delay PWM) vs COT

ZDP制御



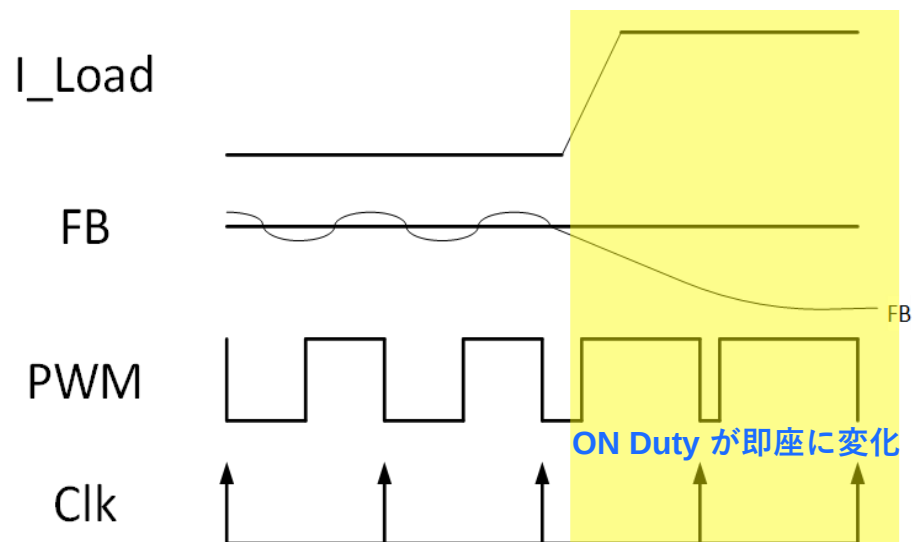
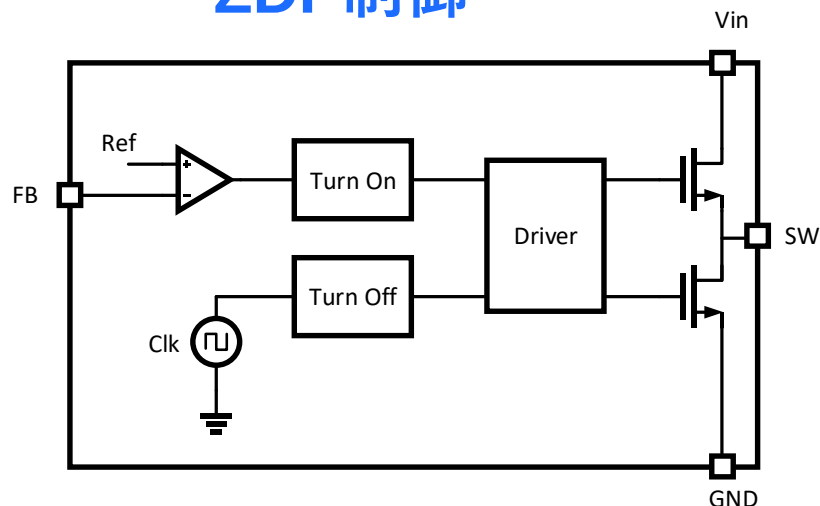
COT制御



- COT: SR ラッチはワンショットタイマーによってリセットされます
- ZDP: SR ラッチはクロックによってリセットされます
- どちらのトポロジーも、FB は PWM コンパレータに直接接続されています

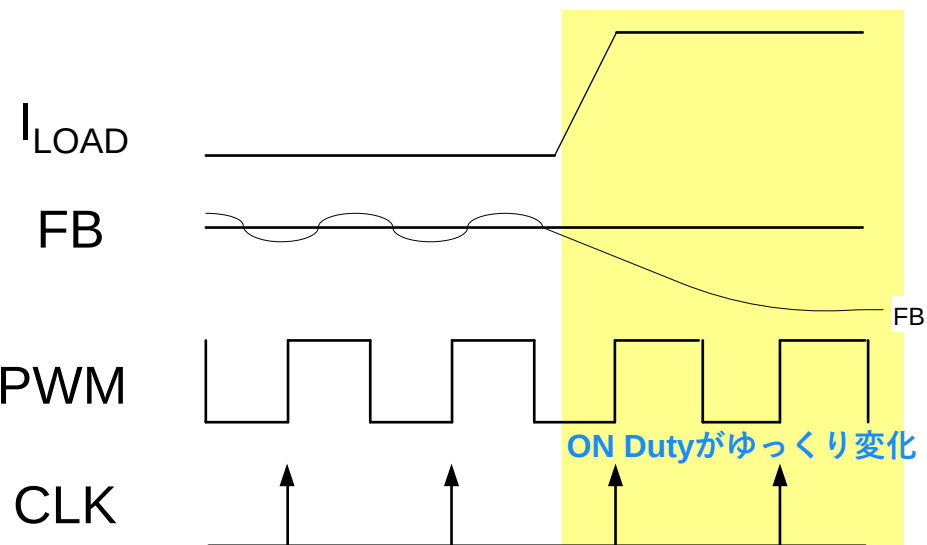
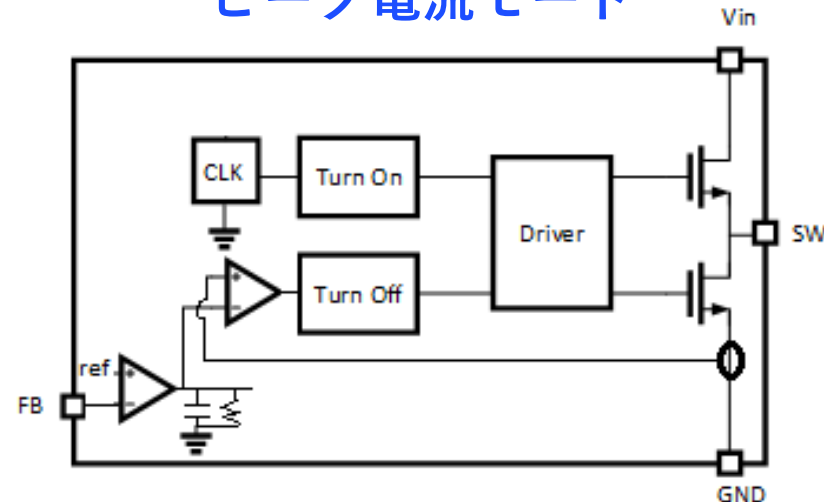
ZDP™ (Zero Delay PWM) vs ピーク電流モード

ZDP制御



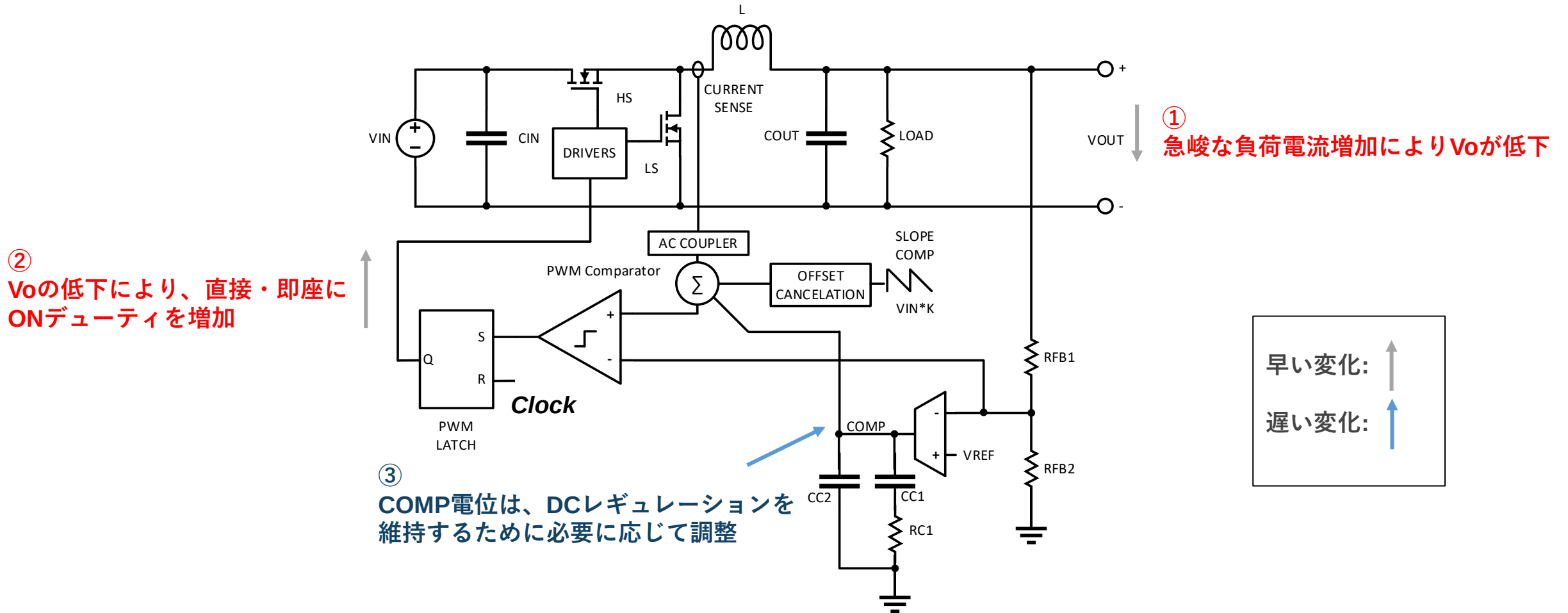
ZDP: CLKは ONパルスのOFFタイミングを決めている

ピーク電流モード



ピーク電流モード:
CLKは ONパルスのONタイミングを決めている

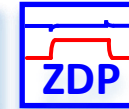
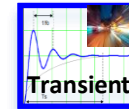
Zero-Delay PWM (ZDP™)



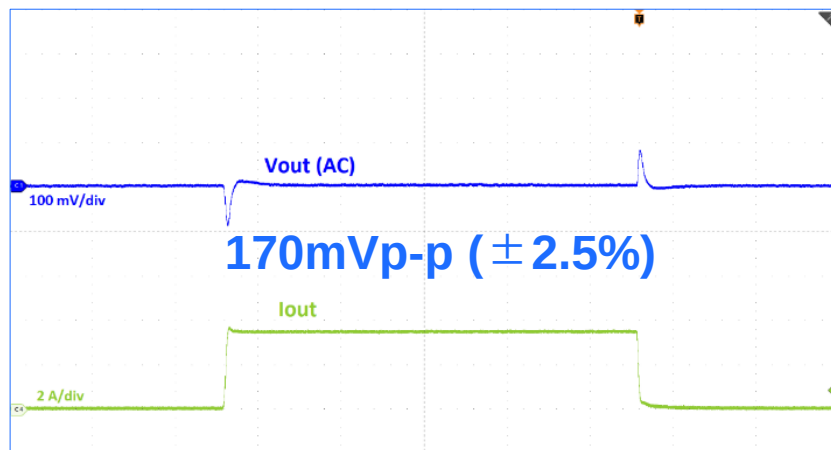
Zero Delay PWM (ZDP™) - [ZDP™ アプリケーションノートへリンク](#)

- 内部クロックによる固定SW周波数電源制御
- 一般的な固定SW周波数制御方式 (電圧モードやピーク電流モードなど) と比較して過渡応答が大きく向上

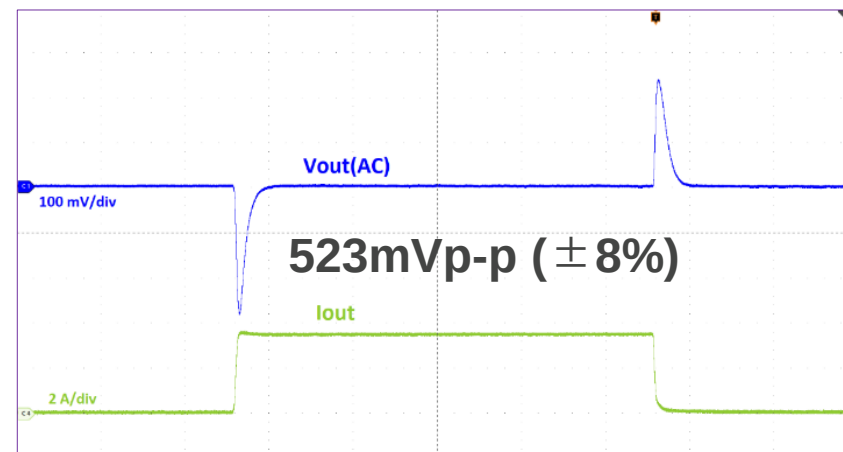
Zero-Delay PWM (ZDP™) – 負荷過渡応答における利点



Zero-Delay PWM (ZDP™) MPQ4340



ピーク電流モード MPQ4430



$I_{OUT} = 0A \sim 3.5A$ の負荷ステップ、12V入力、3.3V出力
 $F_{sw} = 2.2MHz$ 、 $1\mu H$ Lout、 $2 \times 22\mu F$ Cout

Zero-Delay PWM (ZDP™) 制御: 3倍以上速い負荷応答特性!

1A~17Aステップ; $V_{in}=12V$ 、 $V_{out}=1V$

COT負荷ステップ

オン・パルスの密度が増加、~4MHz

MPQ8633B



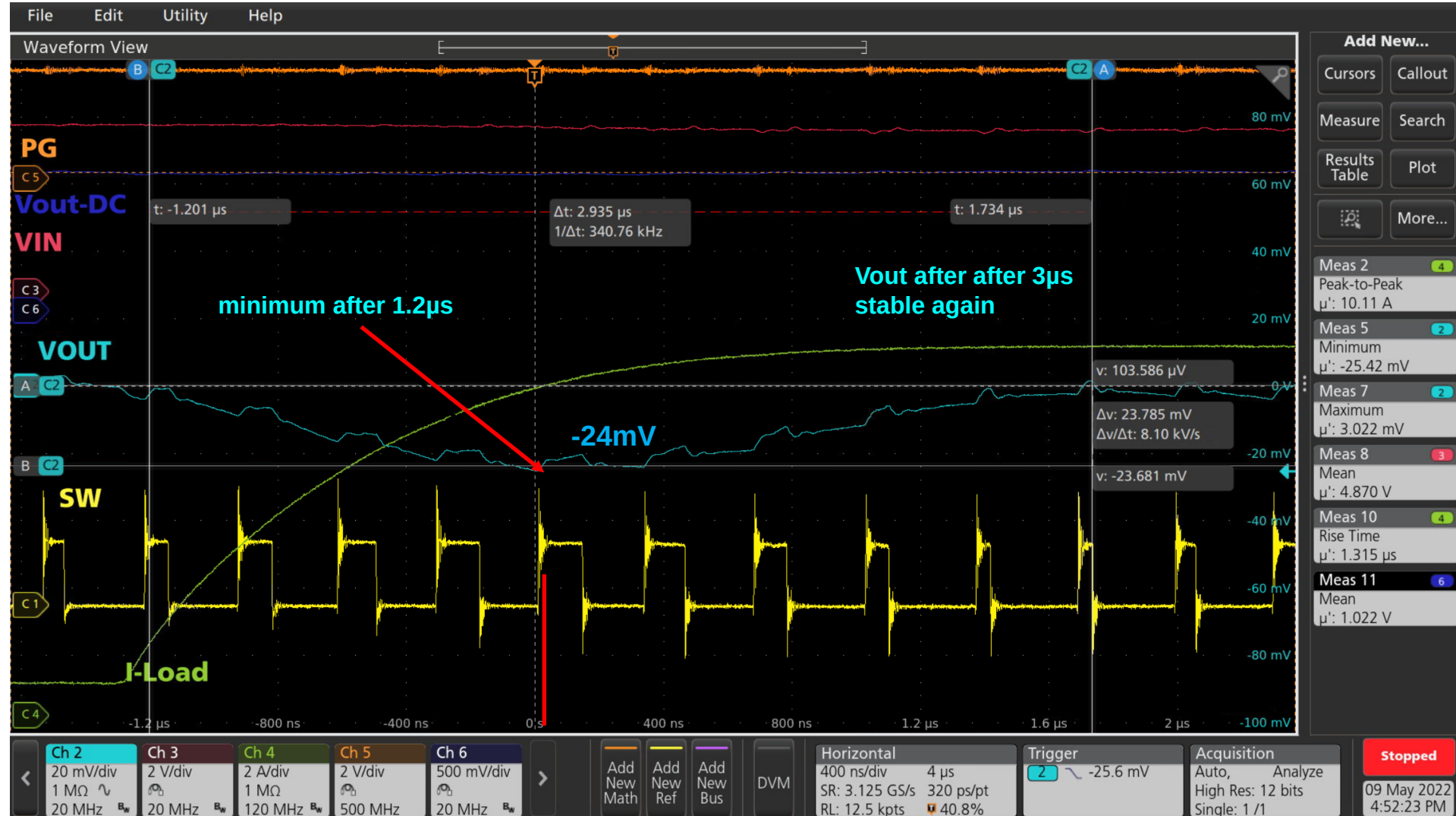
1A~11Aの詳細 - 実際

MPQ2286

Vout=1.028V

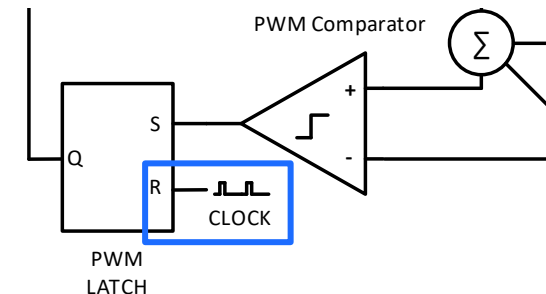
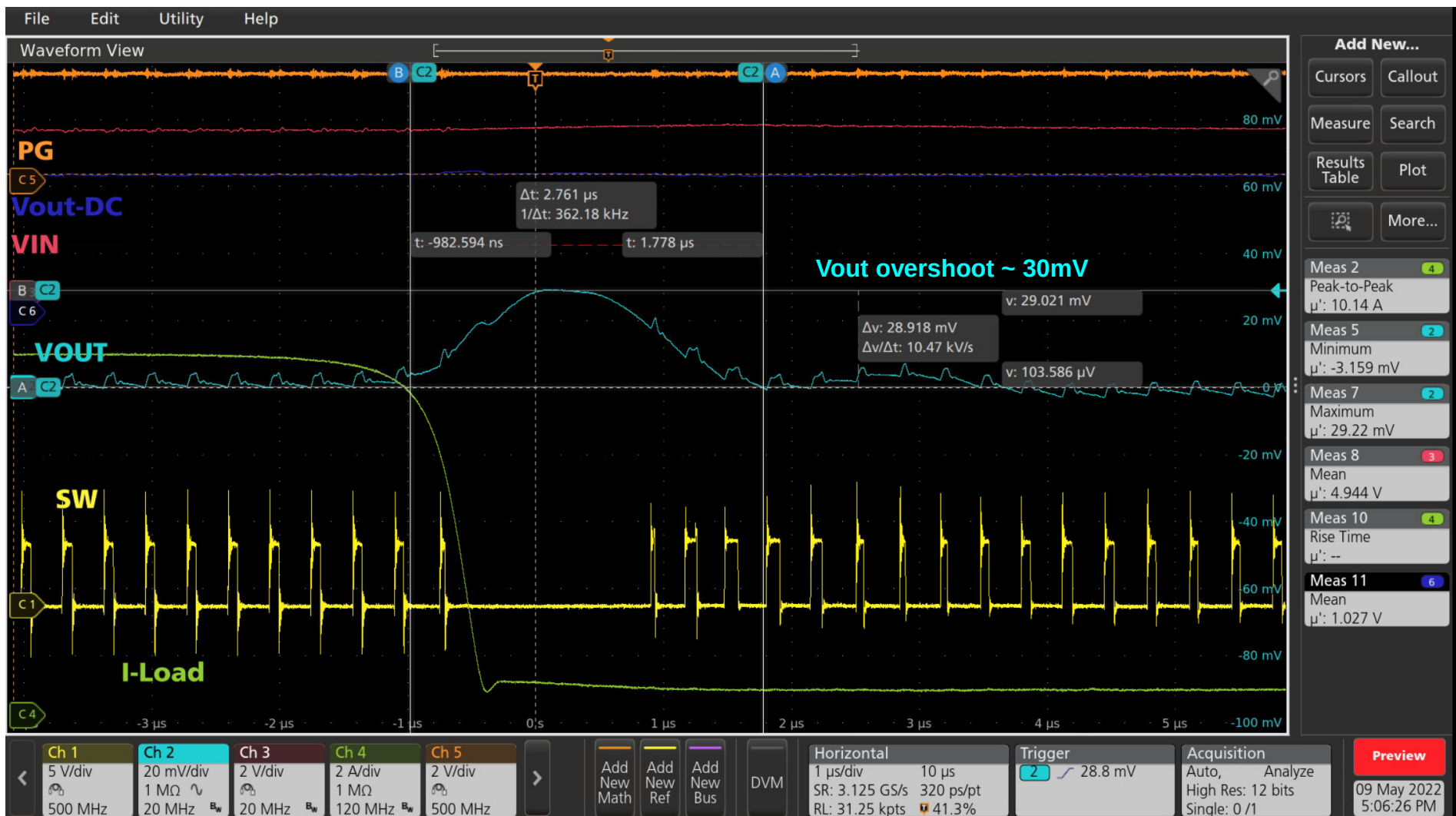
L=100nH 3MHz

Cout = 4 x 47μF 1210



負荷リリース: 11A~1A - 実際

Fsw=3MHz; L=100nH
Cout=4x 47μF 1210



クロックはリセットタイミ
ングを制御し、ONパルスのス
キップします (HS-FETのONを
スキップして、LS-FETだけが
ON状態を維持します)。
結果、Voオーバーシュートが
最小化されます。

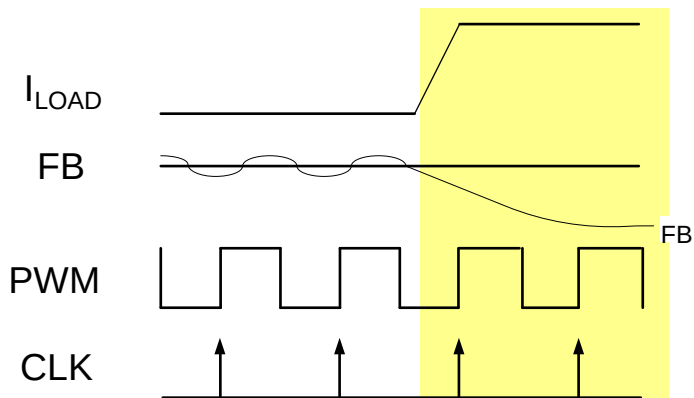
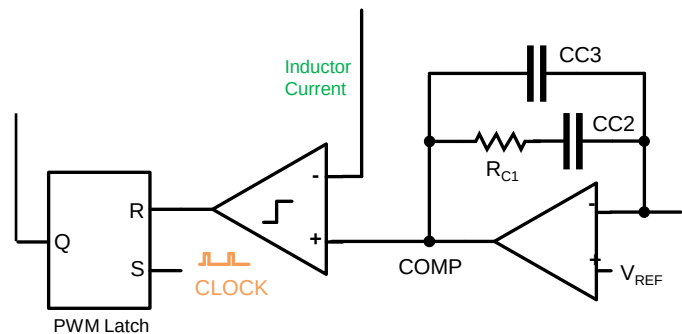
MPS ZDP™ Zero Delay PWM制御

電流モードの固定周波数スイッチングというメリット と COTの高速負荷応答というメリット のイイところ取り

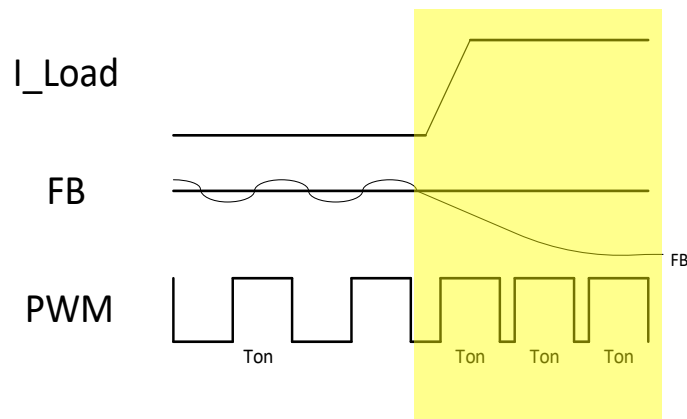
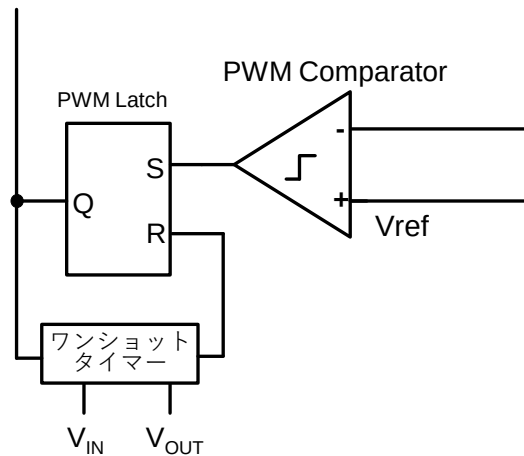
長所	短所
- 内部発振器 (クロック) によるスイッチング - すぐれた負荷応答性能: - 固定周波数電流モードの約3~4倍速い - COTと同等の応答特性 - 補償が必要ない - 軽負荷から重負荷へのシームレスな移行 - 外部クロックに同期可能 - 低ESRでもコンバータの安定性を保つスローブジェネレータ内蔵	

補足

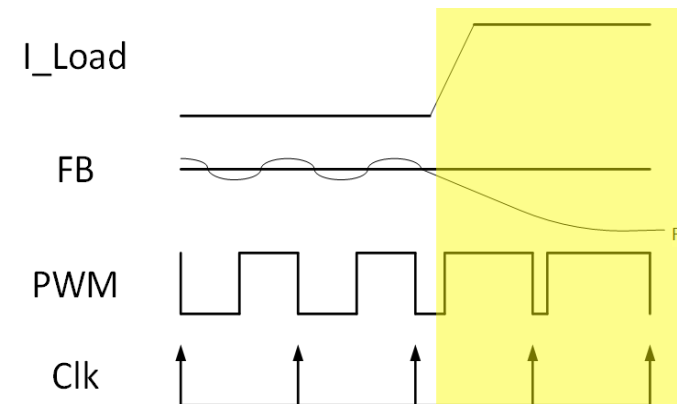
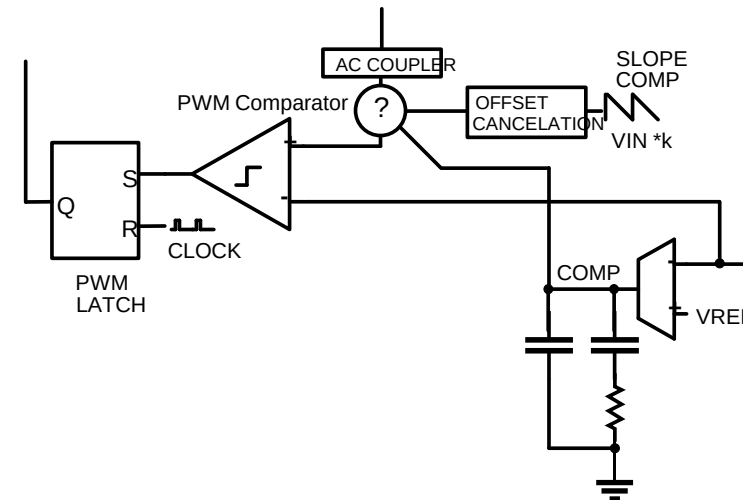
電流モード vs COT vs ZDP™ (Zero Delay PWM)



ピーク電流モード

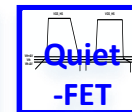
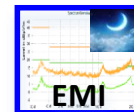


COT制御

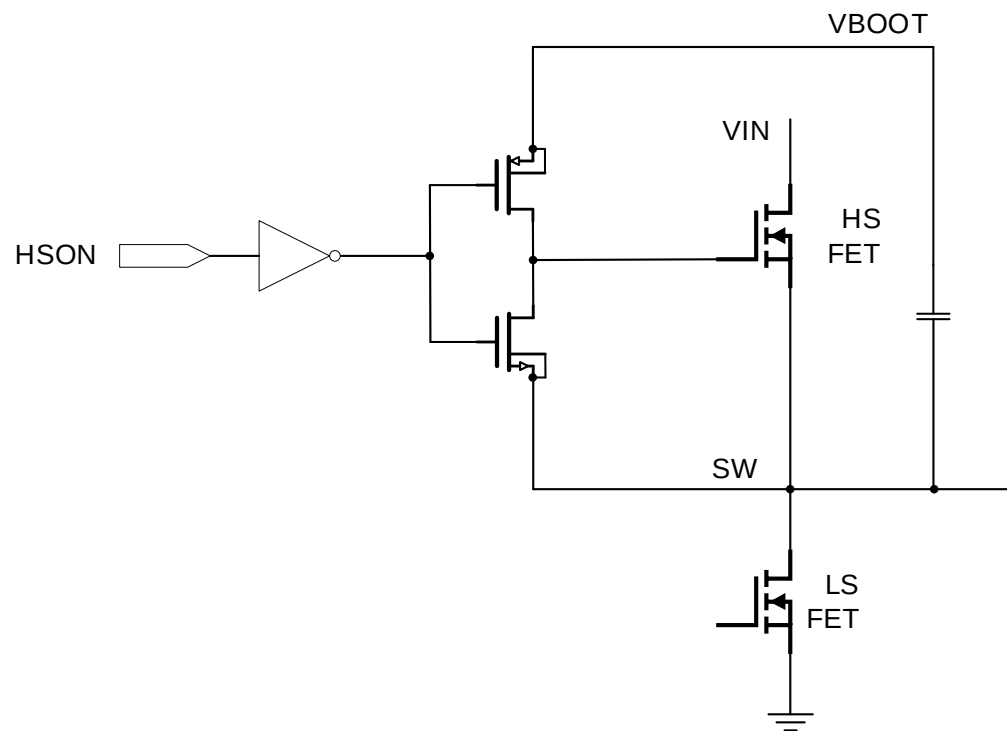


ZDP制御

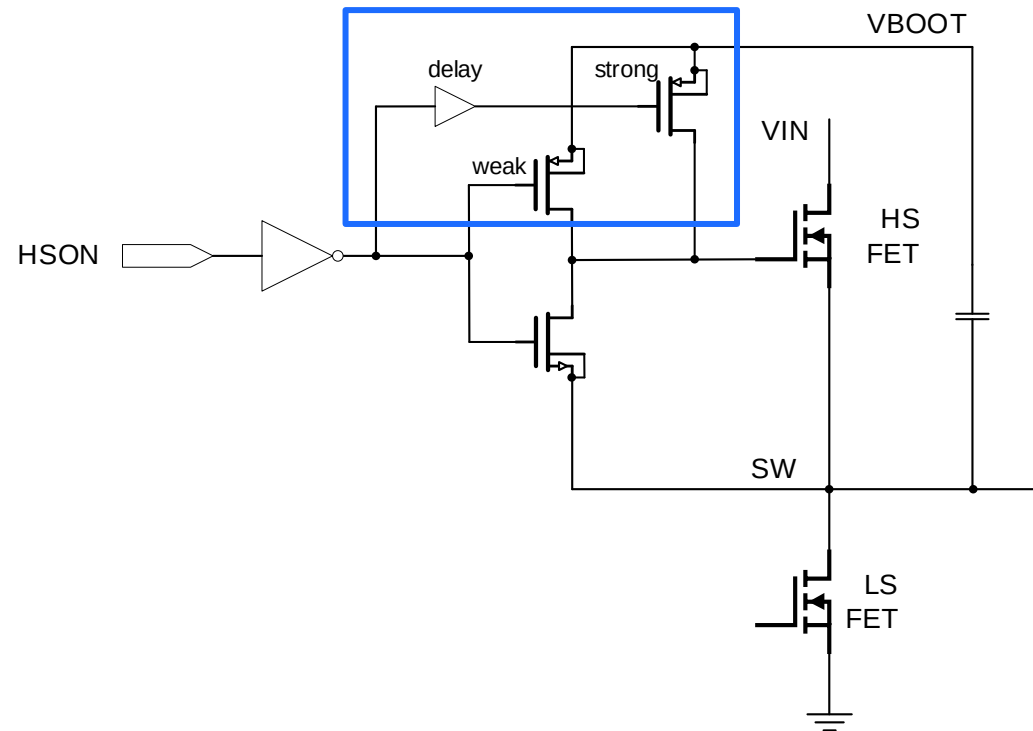
Quiet-FET™ 制御テクノロジー



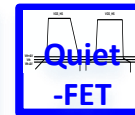
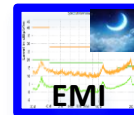
従来のFET駆動



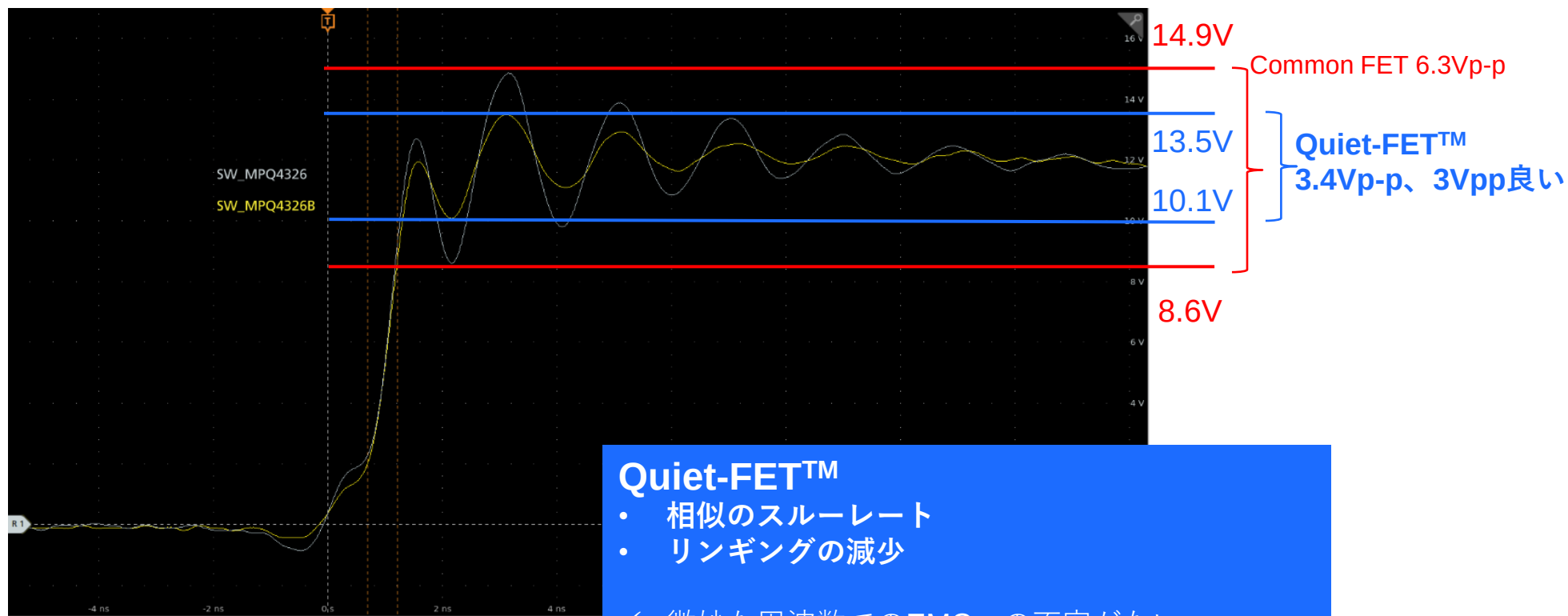
Quiet-FET™ 駆動
(2ステップまたは複数ステップ)



Quiet-FET™ 制御テクノロジー



- MPSの先進的なMPSFET制御技術としてのFET制御方法論
- シャープな起動の代わりとなる、2または3ステップのソフトなMOSFET起動
- より少ないスイッチングノイズとリップルで、優れたEMI性能に寄与

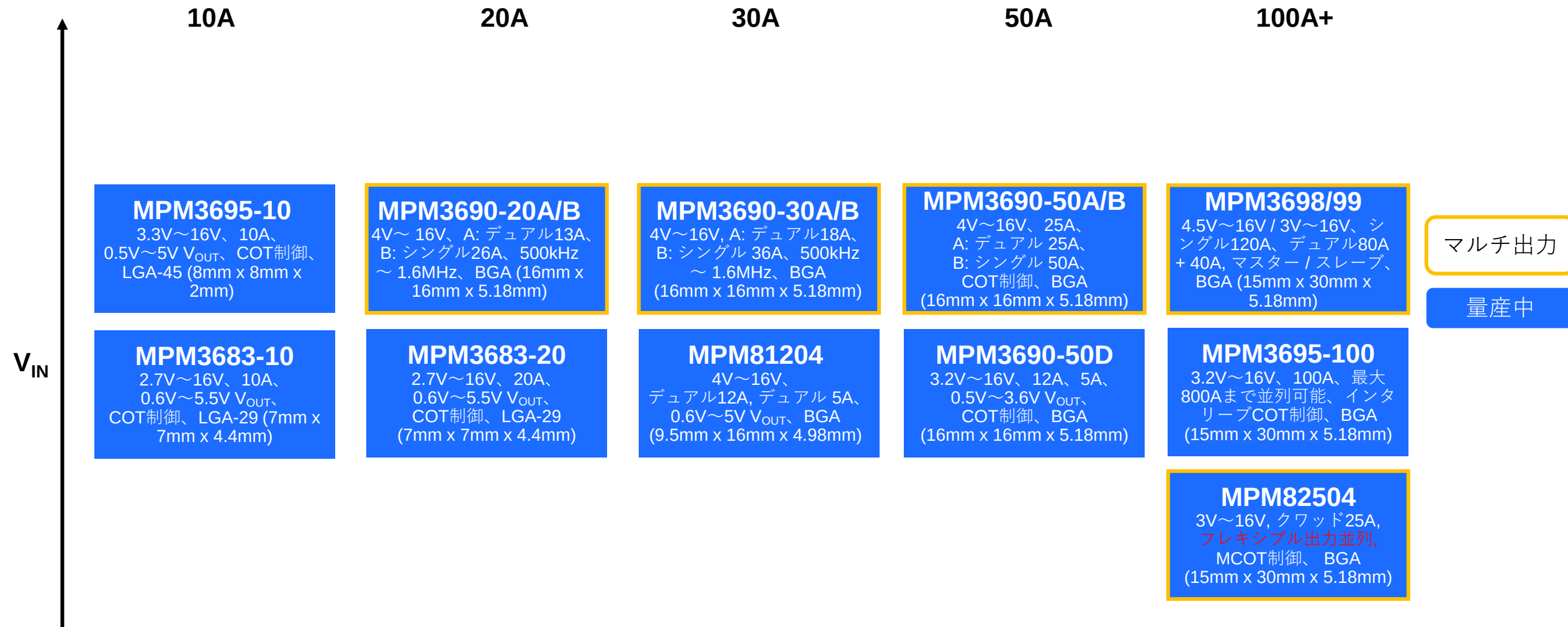


Quiet-FET™

- 相似のスループレート
- リンギングの減少

- ✓ 微妙な周波数でのEMCへの不安がない
- ✓ 優れた効率
- ✓ 高い V_{IN} 信頼性

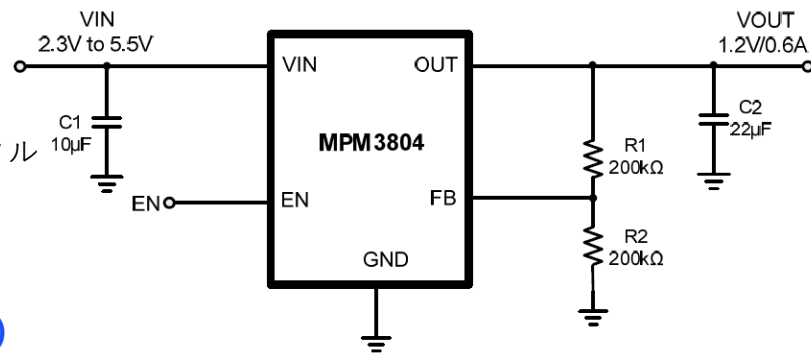
MPSのFPGA用COT電源モジュール



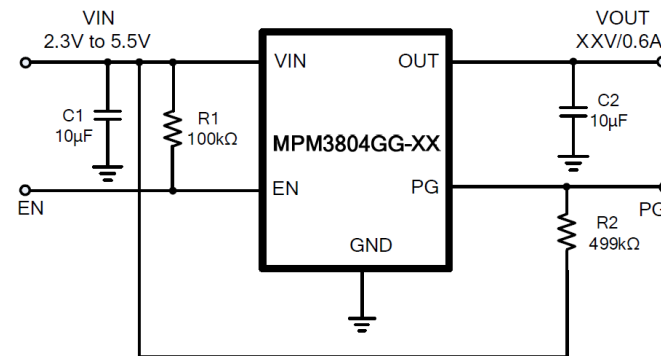
低電圧シリーズ: MPM3804、MPM3814C、MPM3824C、MPM3834C

MPM3804

- 2.3V~5.5Vの V_{IN} 範囲
- 0.6Vから調整可能な出力
- ドロップアウト時100%デューティサイクル
- 2.4MHz スイッチング周波数 (f_{SW})
- 低プロファイル: 0.9mm
- QFN-10パッケージ (2mm x 2mm x 0.9mm)
- クラス最高効率
- シーケンス用イネーブルとパワーグッド
- COT制御



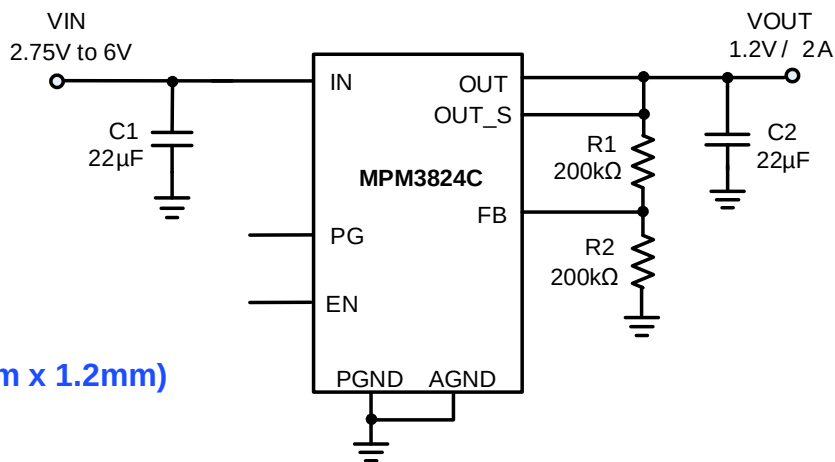
全ソリューションサイズ: 3.7mm x 3.7mm



1.2V、1.8V、2.5V、3.3V 固定出力バージョンも利用可能

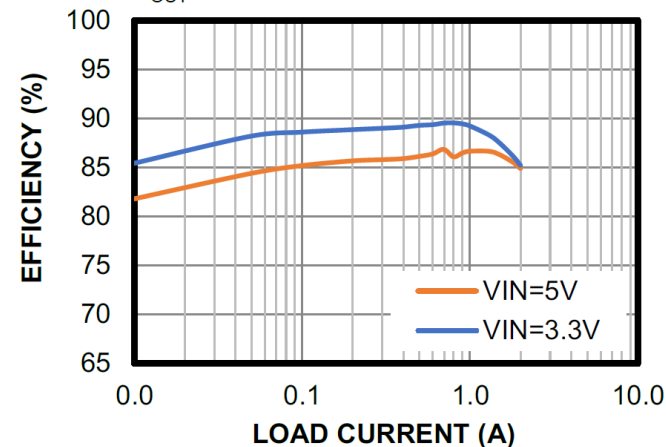
MPM3814C / 24C / 34C

- 1A/2A/3A ピン互換
- 2.75V~6Vの V_{IN} 範囲
- 0.6Vから調整可能な出力
- FCCMとDCMが利用可能
- 低プロファイル: 1.2mm
- ECLGA-14 パッケージ (2.5mm x 2.5mm x 1.2mm)
- クラス最高効率
- COT制御
- ドロップアウトで100%のデューティサイクル



Efficiency vs. Load Current

$V_{OUT} = 1.2V$



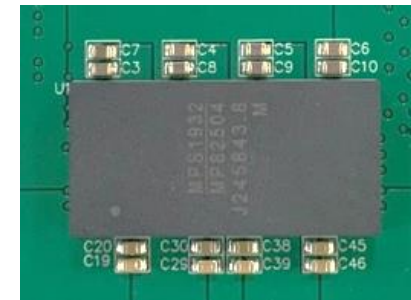
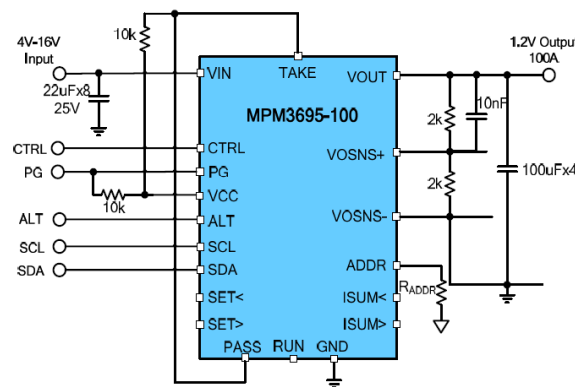
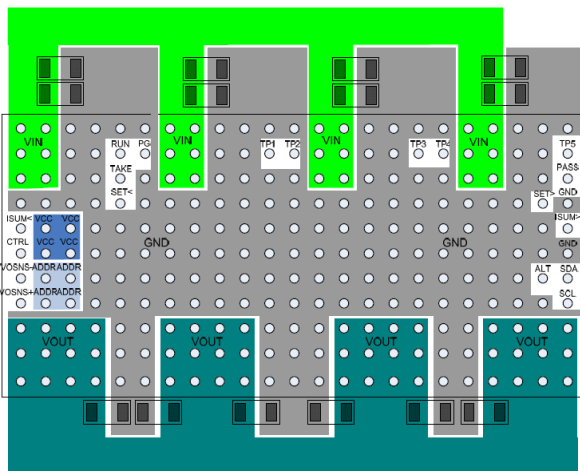
MPM3695-100: 100A 電源モジュール

主な利点:

- 3V~6Vの V_{IN} 範囲
- 0.5V~3.3Vの V_{OUT} 範囲
- **100A連続電流 (3.3V V_{OUT} で60A)**
- **最大800Aまで並列可能**

小型で使いやすい

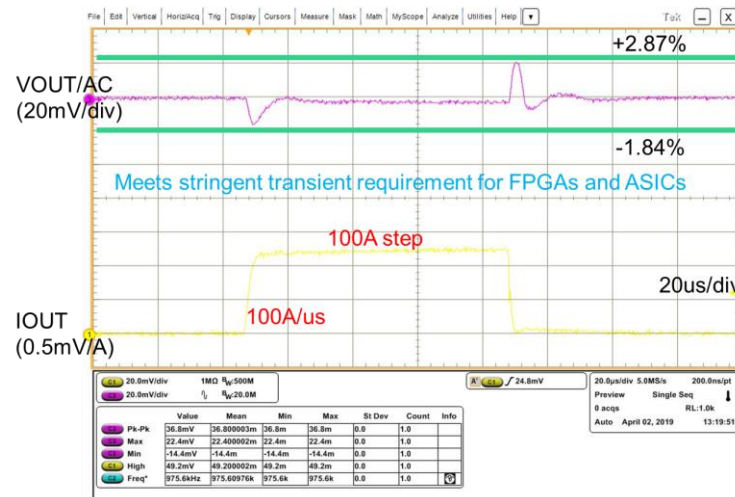
- とてもシンプルな100A+ソリューション
- 外付け部品は最小限
- レイアウトに必要なのはたった3層
- 基板スペースを削減:高速トレースが可能



BGAパッケージ (15mm x 30mm x 5.18mm) で提供

高速過渡応答とMin C_{OUT}

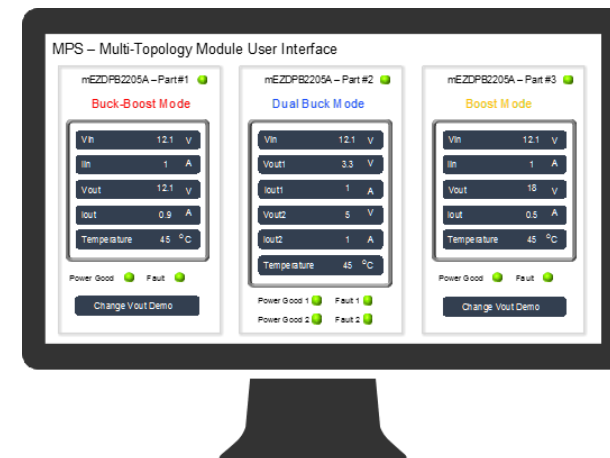
- 内部でインターリーブされた4つの位相
- 高速過渡応答のためのマルチフェーズCOT (MCOT)
- 他社モジュールと比較して最大50%の C_{OUT} を削減



モジュール2個、100Aステップ、
ピーク・ツー・ピーク ±3%, 2500μF C_{OUT}

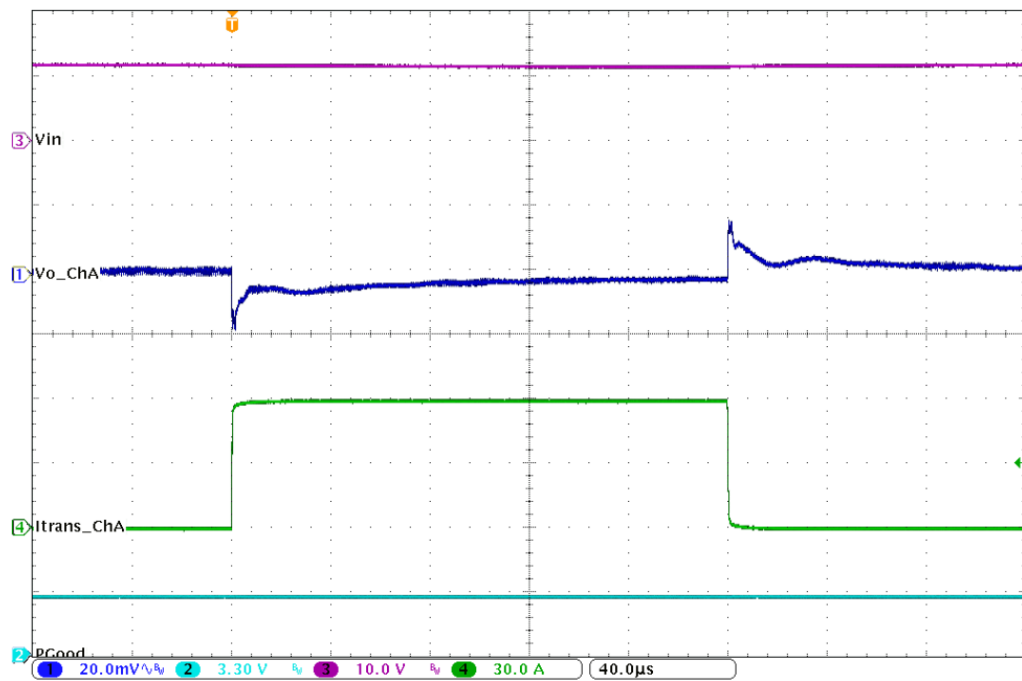
故障診断と信頼性

- BGAパッケージは、信頼性だけでなく、機械的および熱的ストレスを向上
- I²C でいかなるシステム故障を報告
- 各モジュール / 位相故障を検知



MPS

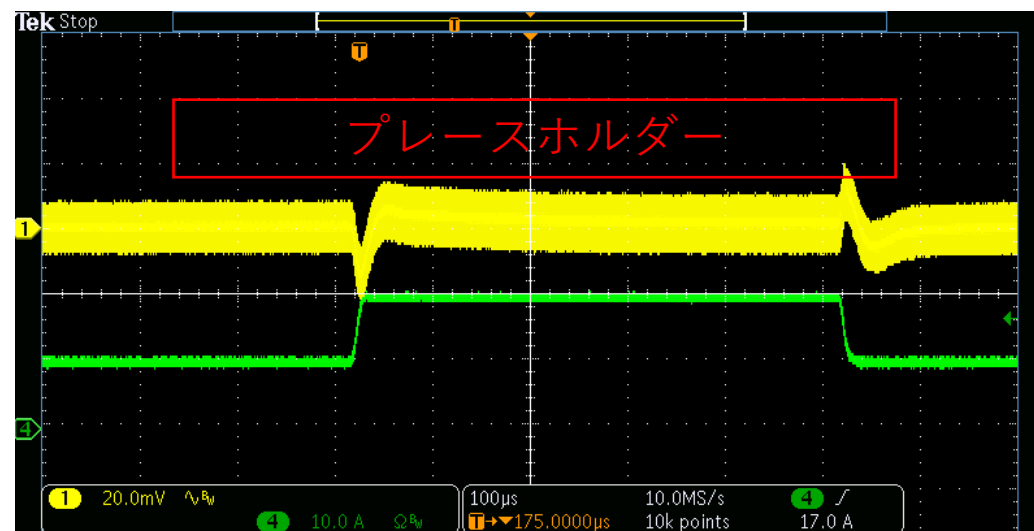
最大50%の外部部品を削減



VOUTA

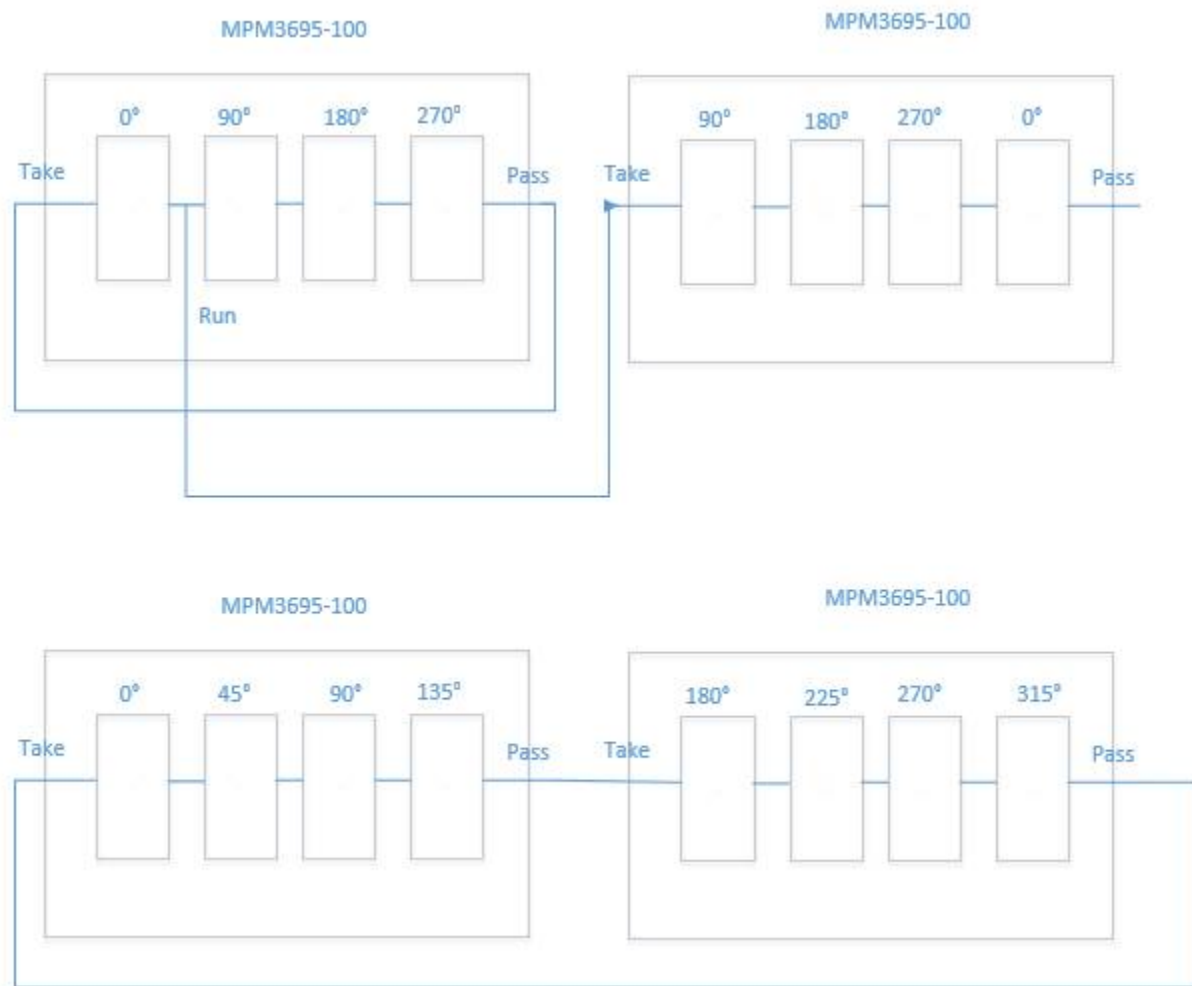
60-A load step

100 A/ μ sec



ブレースホルダー

オートインタリーブCOT



- MPSのスケラブルな電源モジュールで最大8相駆動が可能
- アクティブ電流バランスングにより、全出力に均等な電流を供給
- TAKEピンを介した自動マスター / スレーブ検出と位相カウント

MPSの電源モジュール: 主な利点

モノリシックな
パワーステージ

カスタマイズされた
ソフト飽和インダクタ

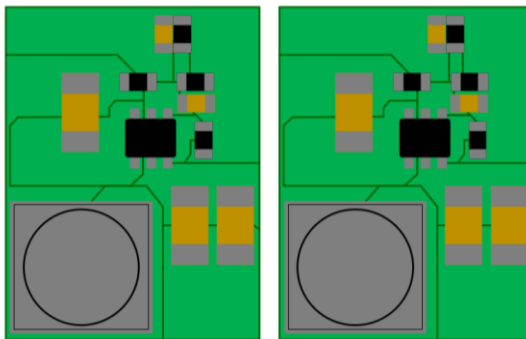
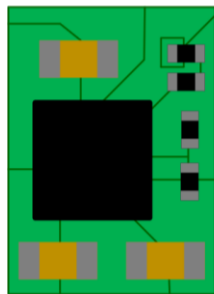
Mesh Connect™
パッケージング技術

広い温度範囲の
受動素子

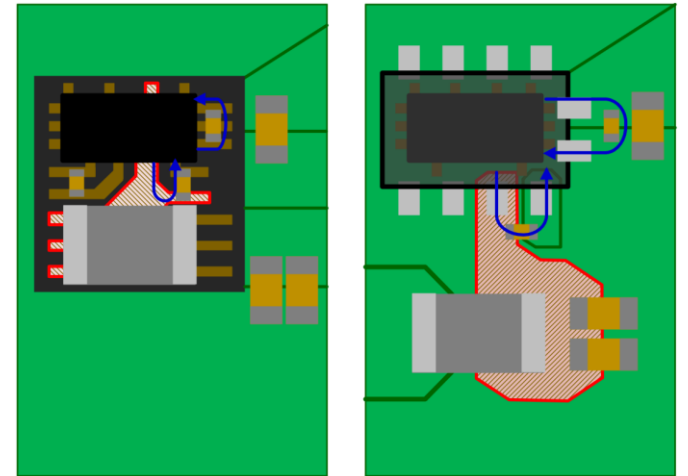
MPM38111

MP2152 x 2

- 小さなソリューション
サイズ
- シンプルな基板レイア
ウト
- 最小限の部品数



EMI性能を改善



EMIに最適化された
モジュールレイアウト

- 小さなスイッチノード
- 小さなホットループ
- より速い市場投入期間
- 電源としての完全な機能