

MPS

PFCとLLCトポロジを理解する

岩本純一

シニアFAEマネージャー

MPSジャパン

2024年7月

- 力率補正を理解する
- MPSのPFCソリューション
- 共振パワーコンバーションを理解する
- MPSのLLCソリューション
- Q&A

PFCとは

- PFCは **P**ower **F**actor **C**orrection を意味します
- **力率 (Power Factor: PF)** は、皮相電力における有効 (実際の) 電力の割合を示します:

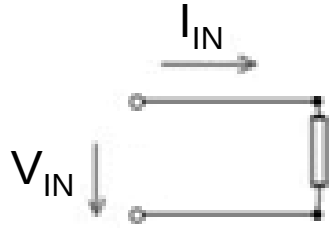
$$PF = \frac{\text{active power}}{\text{apparent power}} = \frac{[W]}{[V \cdot A]}$$

- よくある例え:

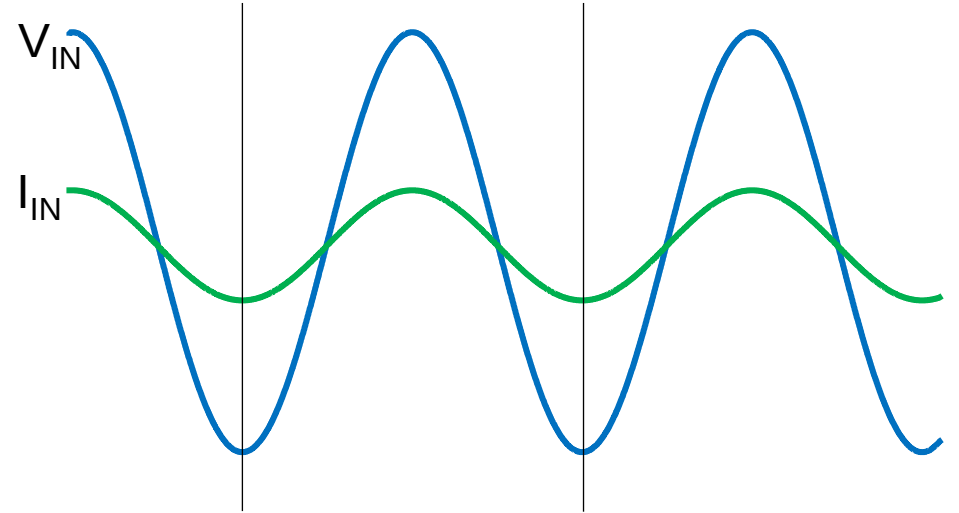


PFCとは

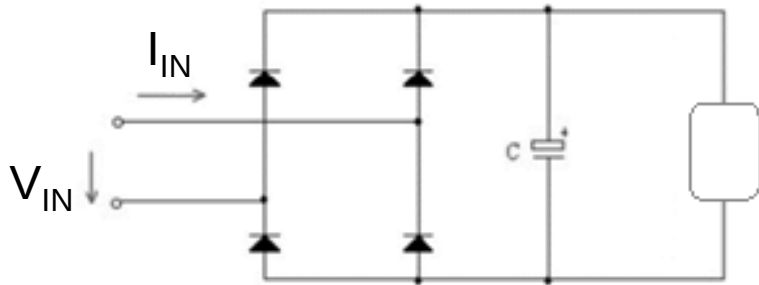
- 1の力率は抵抗に相当:



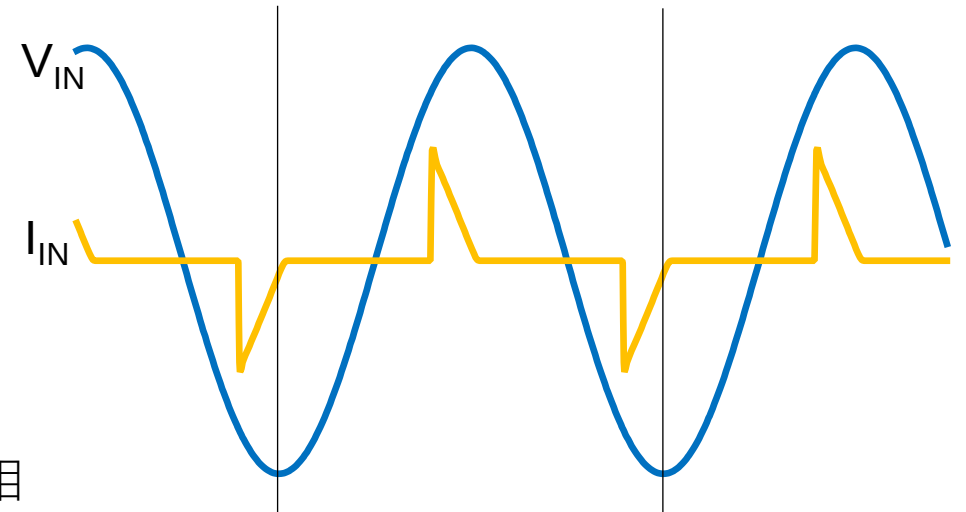
- 電流は正弦波で、入力電圧と同位相である



- 一般的な電源は1未満の力率がある:



- 電流は正弦波ではなく、おそらく入力電圧とは違う位相
- より大きなRMS値の電流が入力で循環 (より大きな無効電力)



なぜ力率が必要なのか

力率が低い場合、実際の負荷で使用するよりもより大きな電力が入力側巻線で循環する

→ 電線の過熱リスク

- 家庭で:



3 x 300W 機器 ($PF = 0.5 \geq 8A$) とすると

$PF = 1 \geq 4A$ と同じ

- 配電線で:



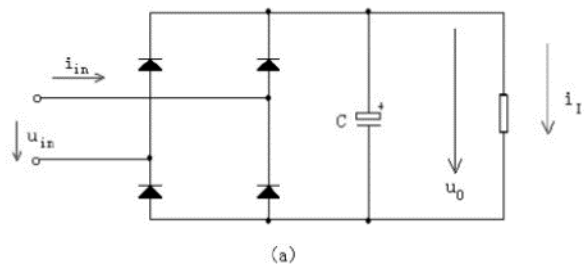
Happy birds!

→ 公益事業会社による高力率の奨励

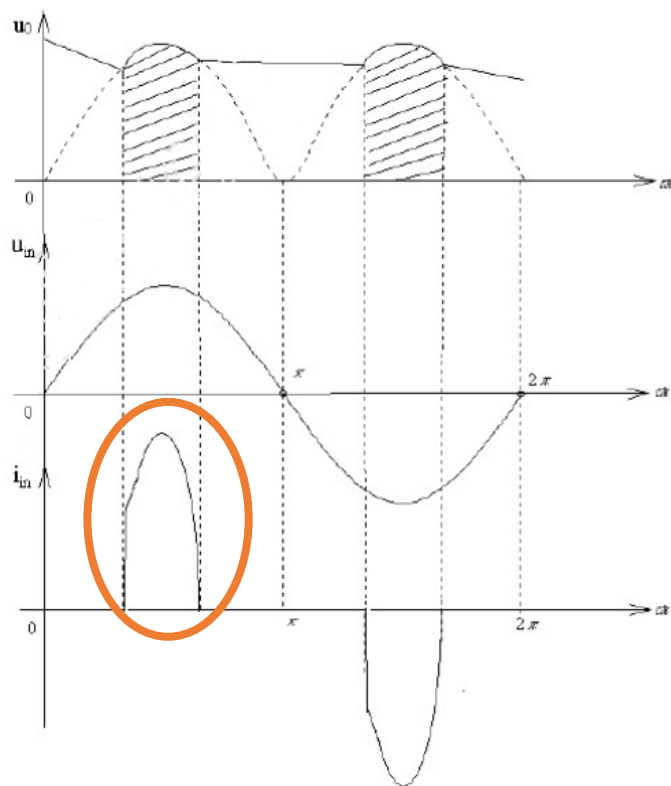
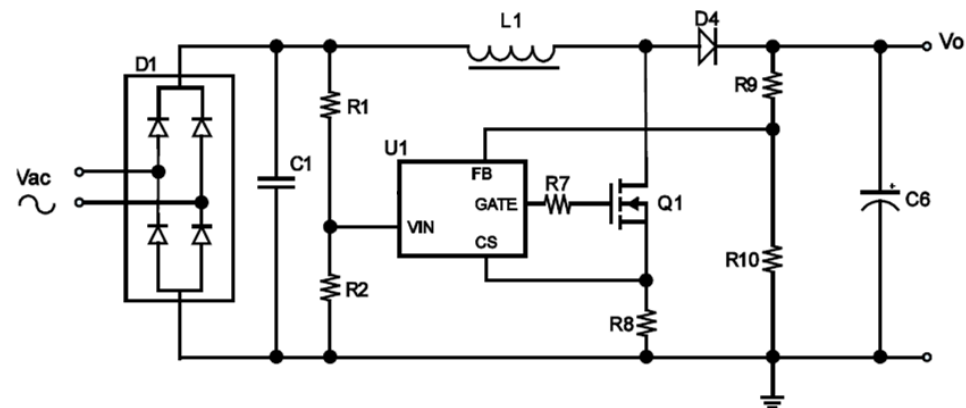
- より少ない発電所で済む
- 発電された電力のすべてを請求できる



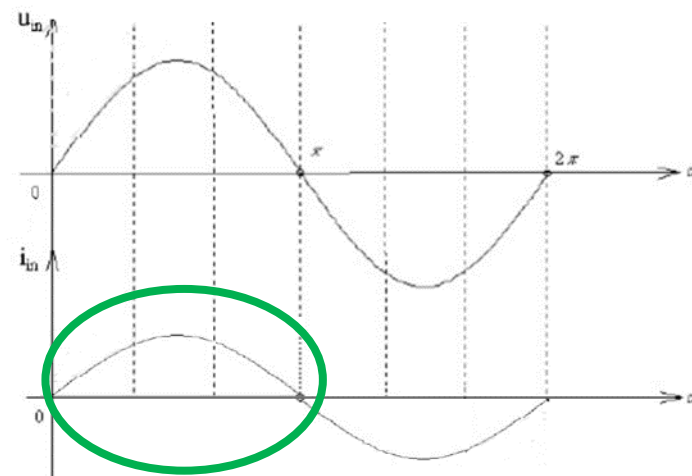
PFCの基本コンセプト



PFCを追加

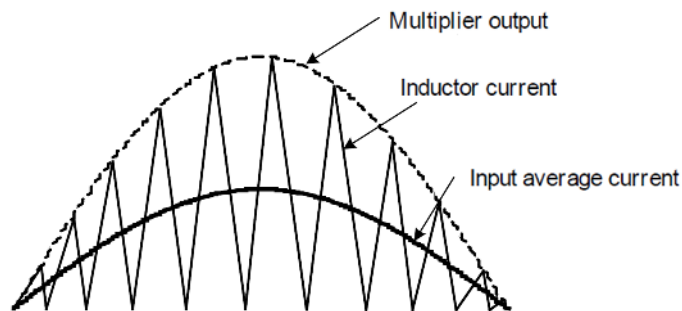


入力電流は電圧に追随



PFC動作モード

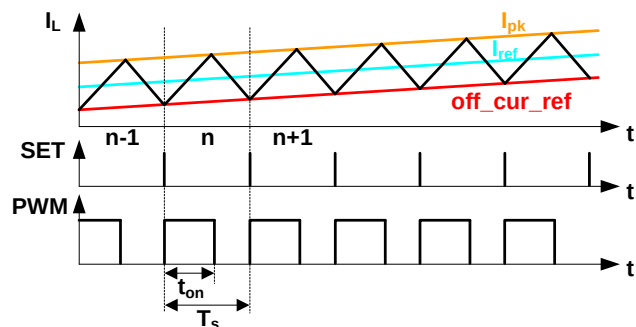
- 電流臨界モード (BCM) または臨界導通モード (CrM) PFC



300W未満の電力に最適

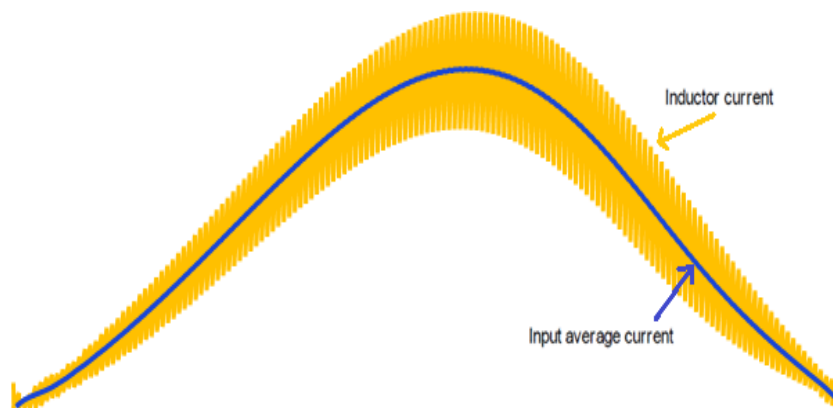
シンプルなアーキテクチャ
ゼロ電圧スイッチング
より大きなRMS値電流

- 電流連続モード (CCM) PFC



200W以上の電力に最適

より少ないRMS値電流
ハードスイッチング
より複雑なレギュレーションループ



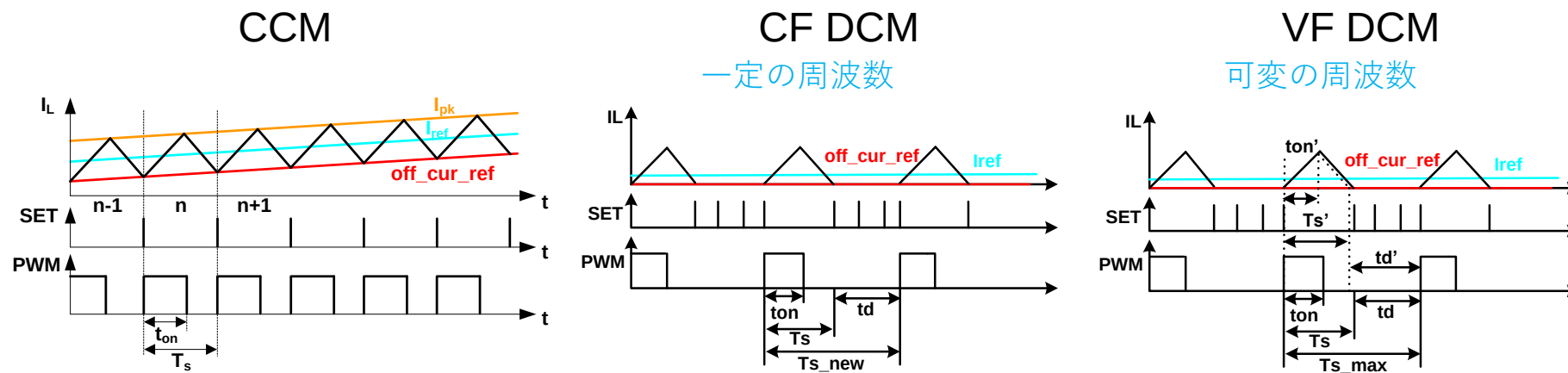
PFC動作モード

• マルチモードPFC

HR12xx

高負荷時のCCMまたは

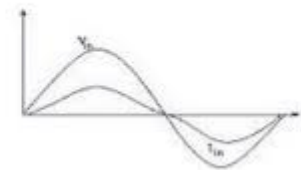
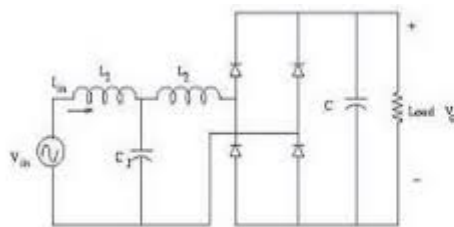
→ 効率最適化のために、軽負荷時はさまざまなDCMモード (電流不連続モード)



セット信号はCCMのバレーポイントとDCMポイントを決定する

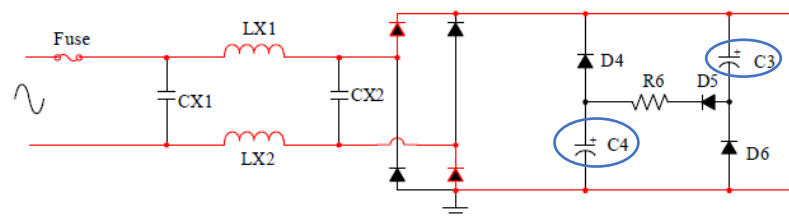
PFCトポロジ

パッシブ: ラインフィルタ:



大きな入力インダクタにより、
電流は正弦波になる

バレーフィルタ:

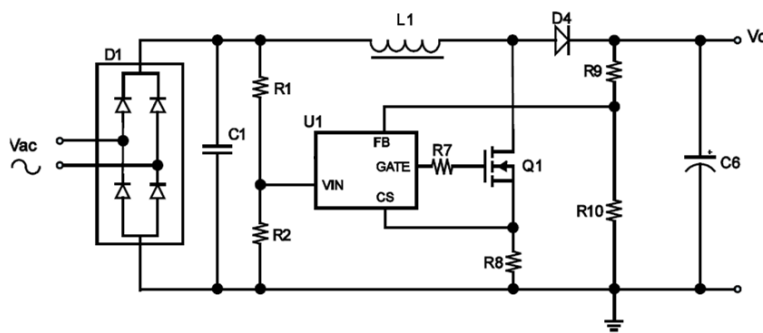


2個のフィルタリングコンデンサ
は直列に充電されるが、
並列に放電される

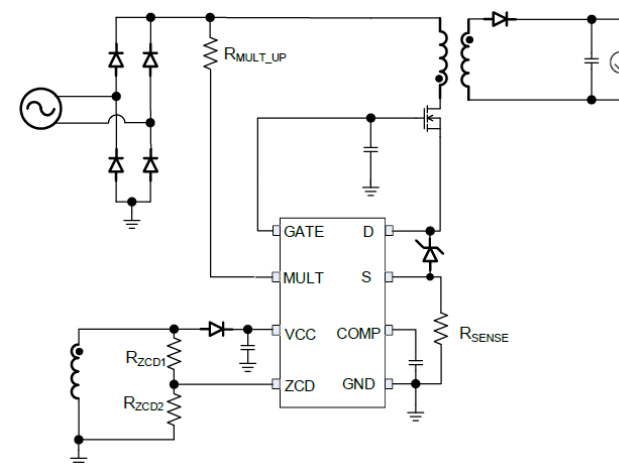
アクティブ: フライバック (低電力、シングルステージ: PFC + 絶縁型レギュレーション)

降圧 (あまり一般的ではない)

昇圧 ($P_{OUT} > 100W$ で一般的)



高効率



乗算器および小さな入力フィルタリング
コンデンサ付きBCMフライバック

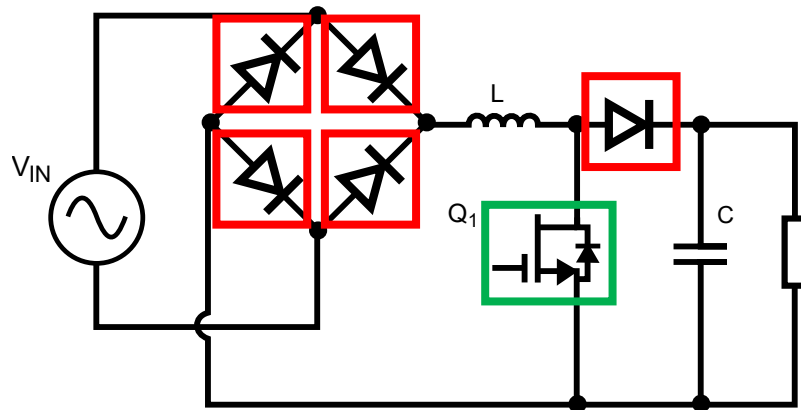
PFCトポロジー

大変多くのアクティブPFC構造があり、そのほとんどは昇圧トポロジーに基づいています。

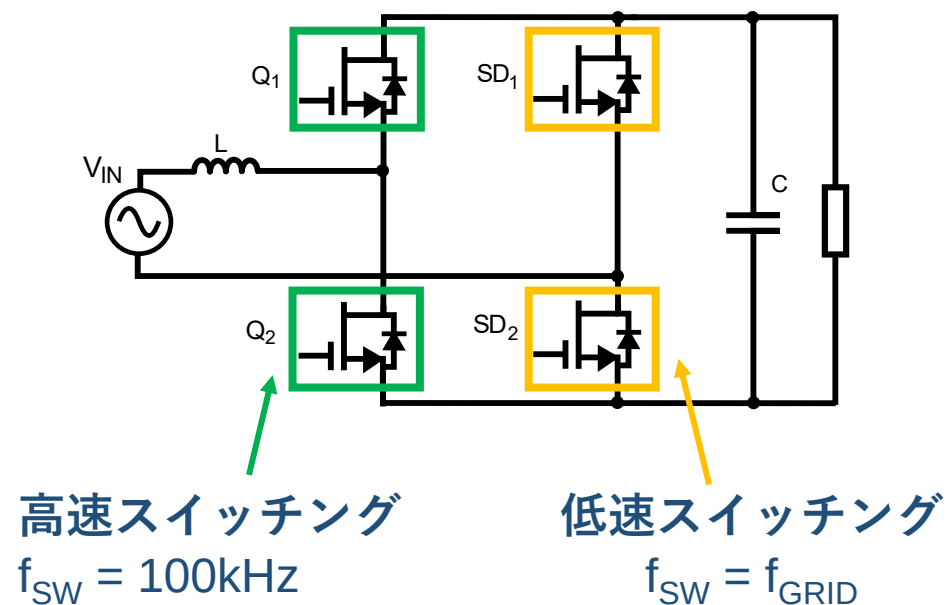
主な目的は出力電圧に対して (そして価格に対しても) 可能な限り最高の効率を達成することです。

例: インターリーブ降圧、ブリッジレス降圧、トータムポール、etc.

フルブリッジ整流器 + 昇圧

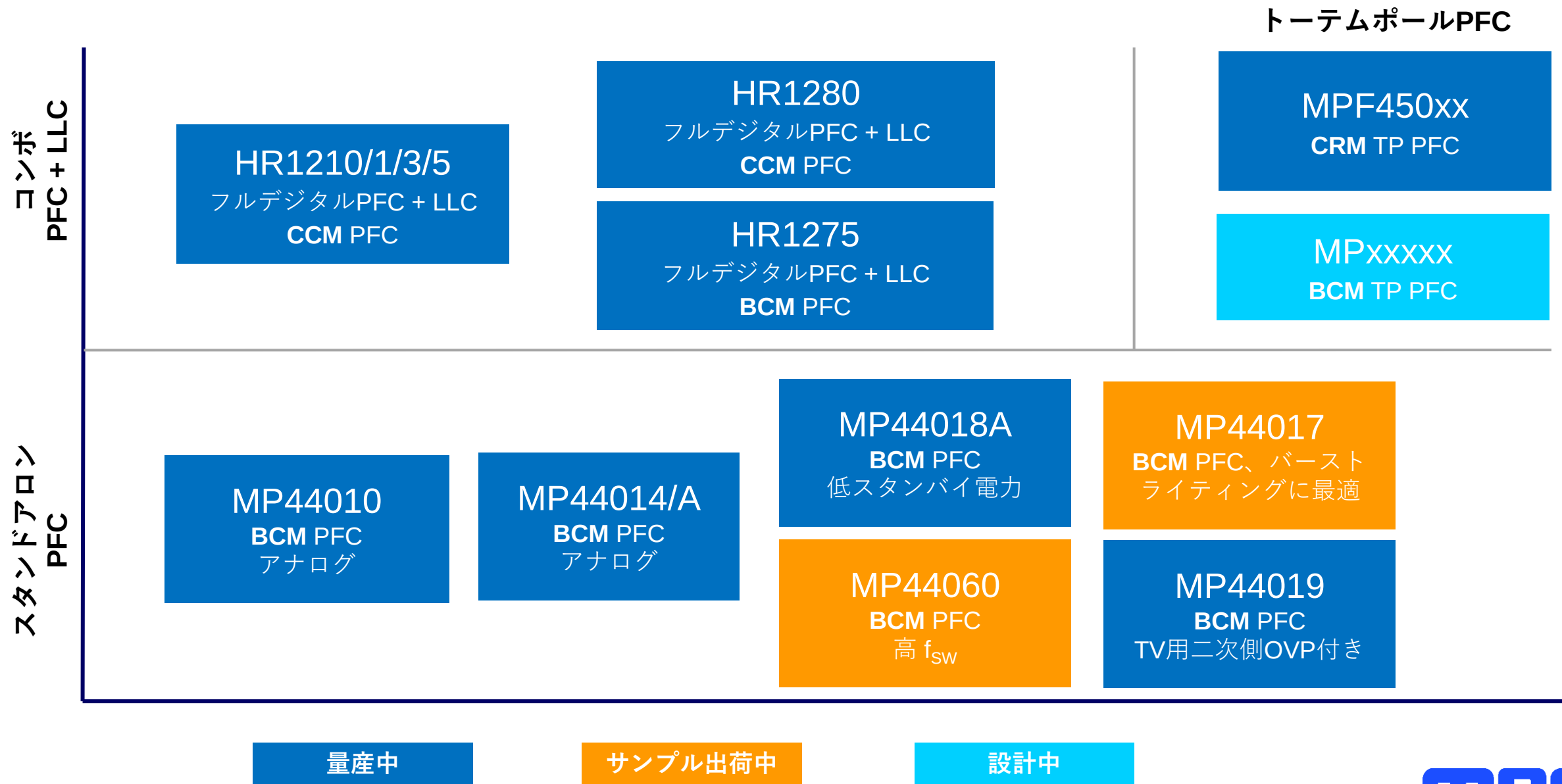


トータムポール・ブリッジレスPFC



- 力率補正を理解する
- **MPSのPFCソリューション**
- 共振パワーコンバーションを理解する
- MPSのLLCソリューション
- Q&A

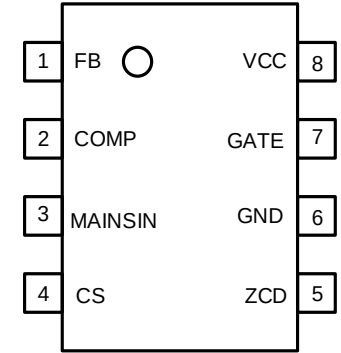
MPSのPFCロードマップ



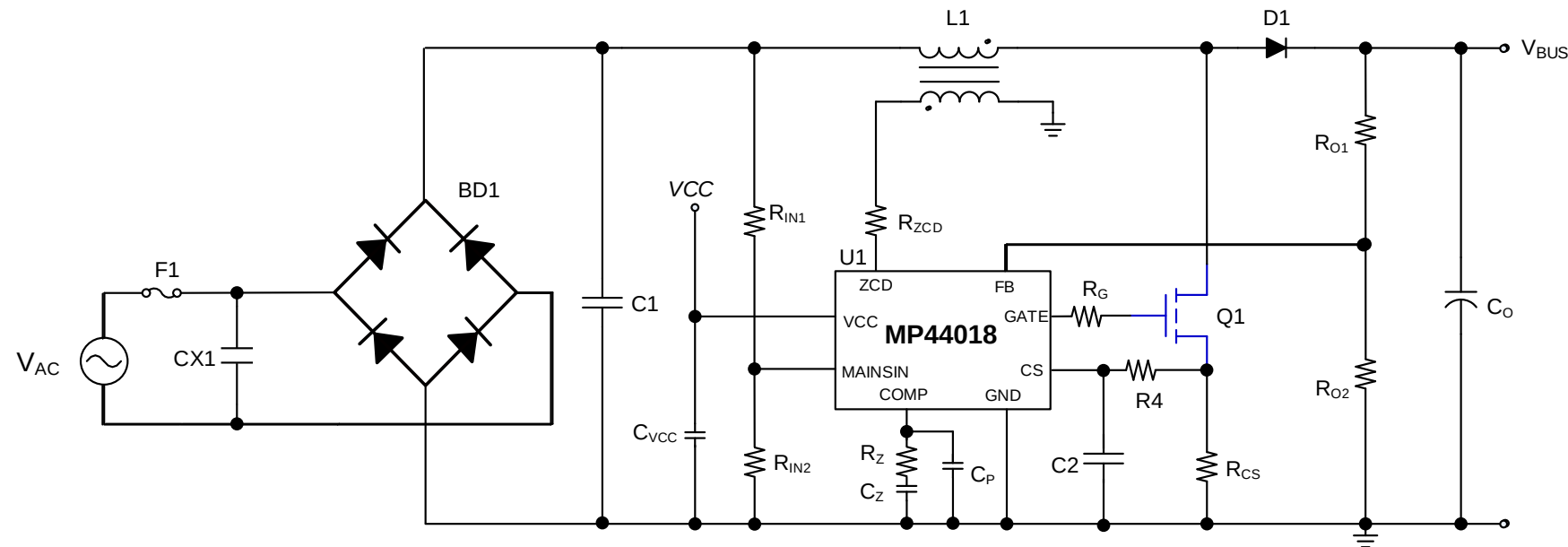
MP44018 主な機能

- スイッチング損失を最小限にするためのバレー電流起動
- 入力フィードフォワード (メイン補償)
- 軽負荷条件下でのスイッチング損失を低減するために周波数を減少
- THDを改善
- 強化されたダイナミック応答
- 可聴ノイズを低く抑えるソフトスタート / シャットダウンバースト

- 低電圧保護 (UVP)
- 過電圧保護 (OVP)
- 過電流制限 (OCL)
- 過電流保護 (OCP)
- ブラウンイン (BI) および
ブラウンアウト (BO)
- オープン / 短絡ピン保護
- 過熱保護 (OTP)

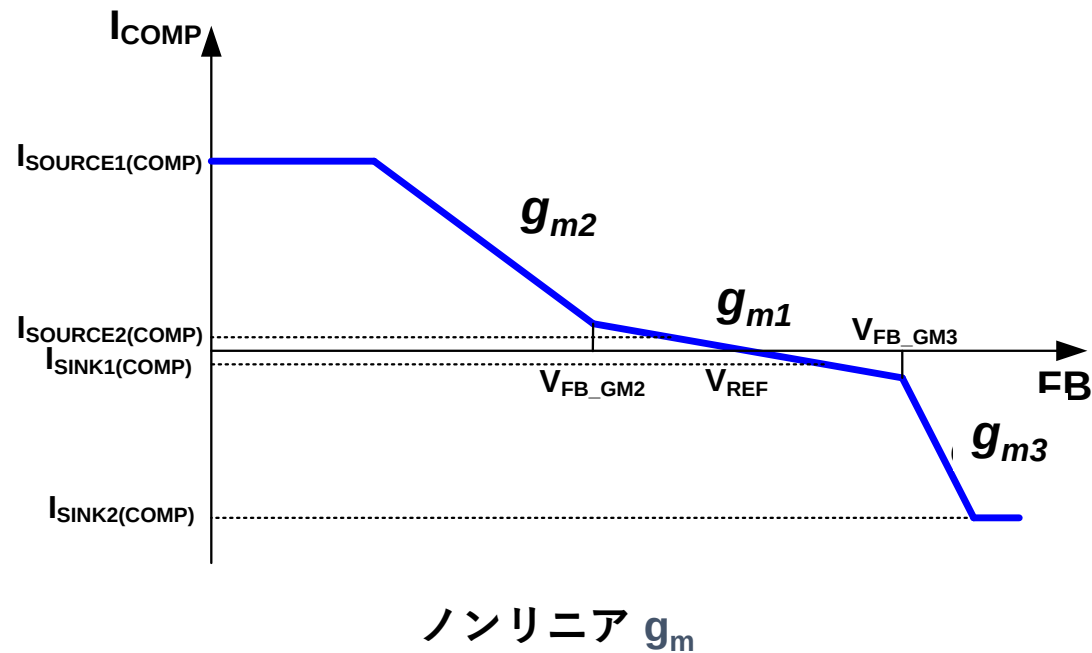


SOIC-8パッケージ
(5mm x 6.2mm x 1.7mm)

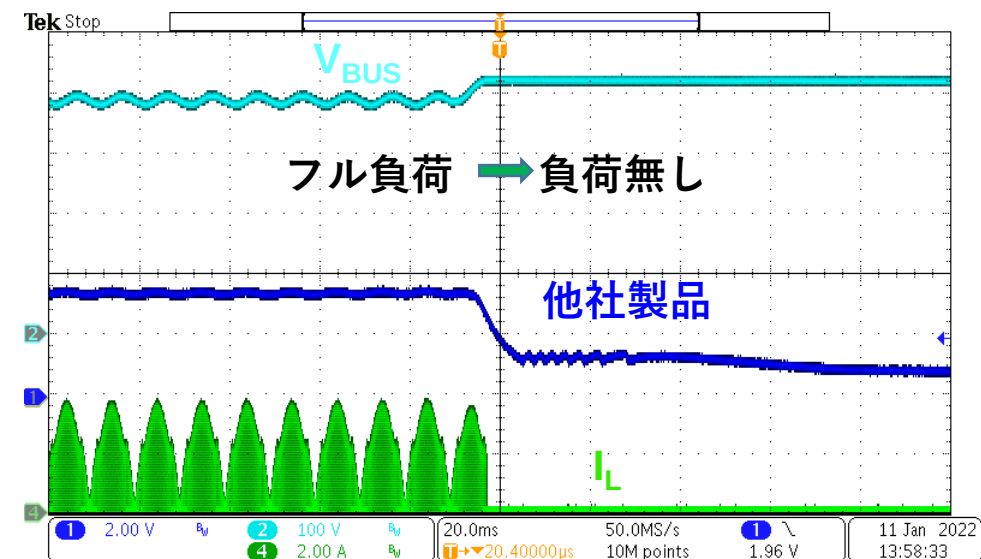
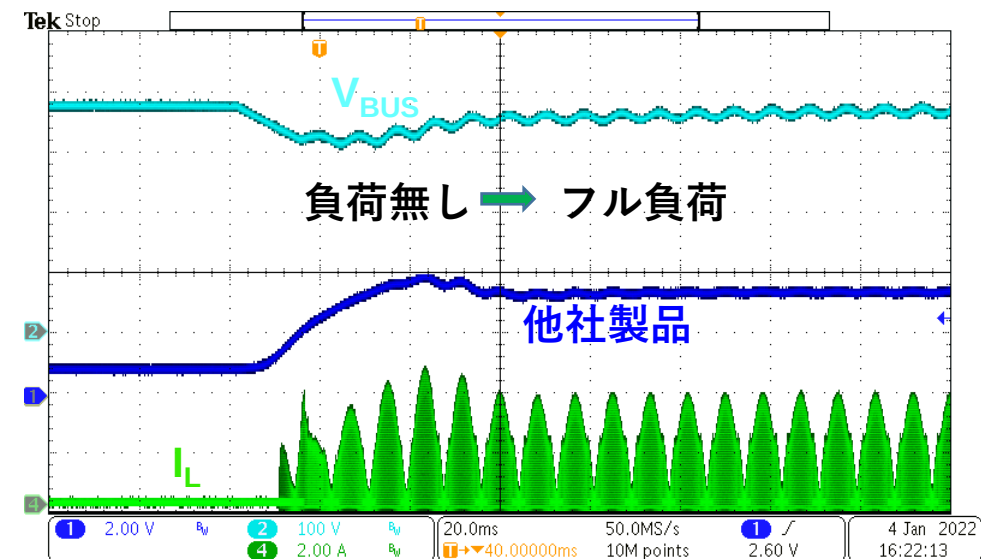


MP44018 強化されたダイナミック応答

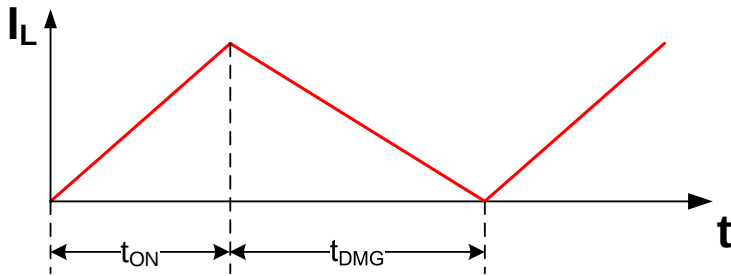
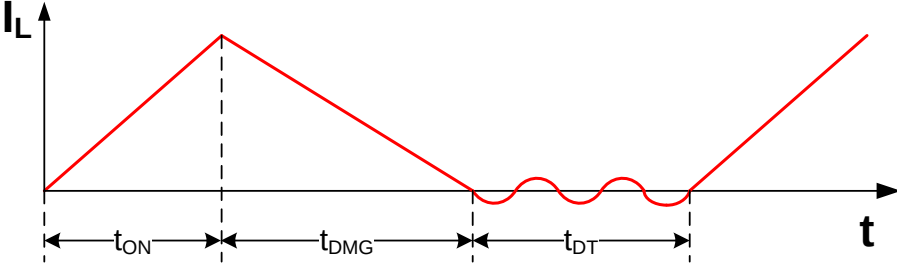
強化されたダイナミック応答



- 定常状態におけるより良い力率とTHDのための低 g_m (g_{m1})
- より高速な過渡応答のための高 g_m (g_{m2} および g_{m3})



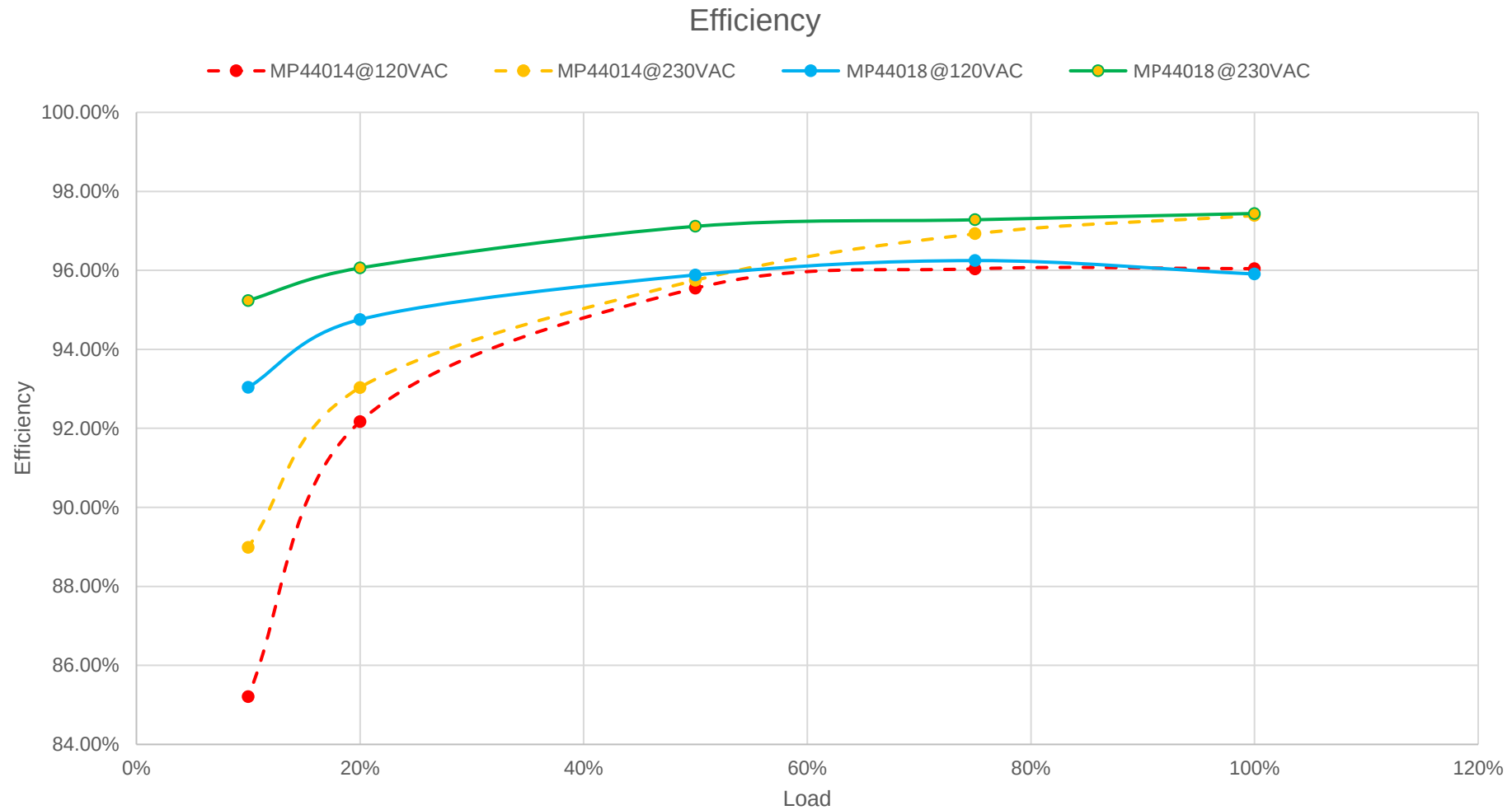
MP44018 THD改善

	BCM (COT: コンスタントオンタイム)	DCM (VOT: 可変オンタイム)
動作モード		
入力電流	$I_{IN1}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{2 \times L} \times t_{ON}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{R_{EQ1}}$	$I_{IN2}(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{2 \times L} \times t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta) = \frac{ V_{AC}(\theta) }{R_{EQ2}}$ $D_C(\theta) = \frac{t_{ON}(\theta) + t_{DMG}(\theta)}{t_{ON}(\theta) + t_{DMG}(\theta) + t_{DT}}$
入力等価インピーダンス	$R_{EQ1} = \frac{2 \times L}{t_{ON}(\theta)}$	$R_{EQ2} = \frac{2 \times L}{t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta)}$
PF = 1の条件	$t_{ON}(\theta) = \varepsilon(\text{constant})$	$t_{ON}(\theta) \times D_C(\theta) = \varepsilon(\text{constant})$

専用の可変オンタイム (VOT) 制御回路を内蔵、 t_{ON} が計算される

MP44018 効率

効率比較



➤ 軽負荷時、MP44018の効率は前世代の製品よりもはるかに高い

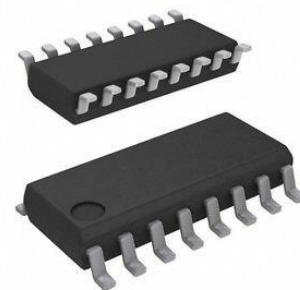
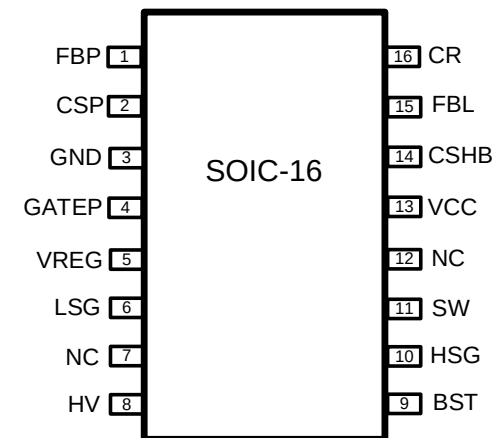
HR1275 主な機能

システム全体の機能:

- トータル85mW以下、無負荷電力損失 (PFC + LLC含む)
- 起動のためのHV電流源
- IEC 62368およびIEC 60950認証済み、ACドロップアウト時スマートX-コンデンサ放電
- パワーグッド (PG) 機能
- 外部過熱保護 (OTP)
- パラメータ調整のためのUARTインタフェース
- ユーザーフレンドリーなGUI

PFCコントローラ:

- フル負荷範囲にわたる高効率のCrM / DCMマルチモードPFC制御
- 低可聴ノイズのためのインテリジェントバレースイッチング
- 最大400kHzで動作
- 入力コンデンサ電流補償
- 低可聴ノイズでより高い軽負荷時効率を実現するプログラマブルなソフトバーストモード
- プログラマブルなAC入力ブラウンイン / ブラウンアウト
- サイクルごとのスイッチングカレントリミット
- 過負荷保護 (OLP)、過電圧保護 (OVP)



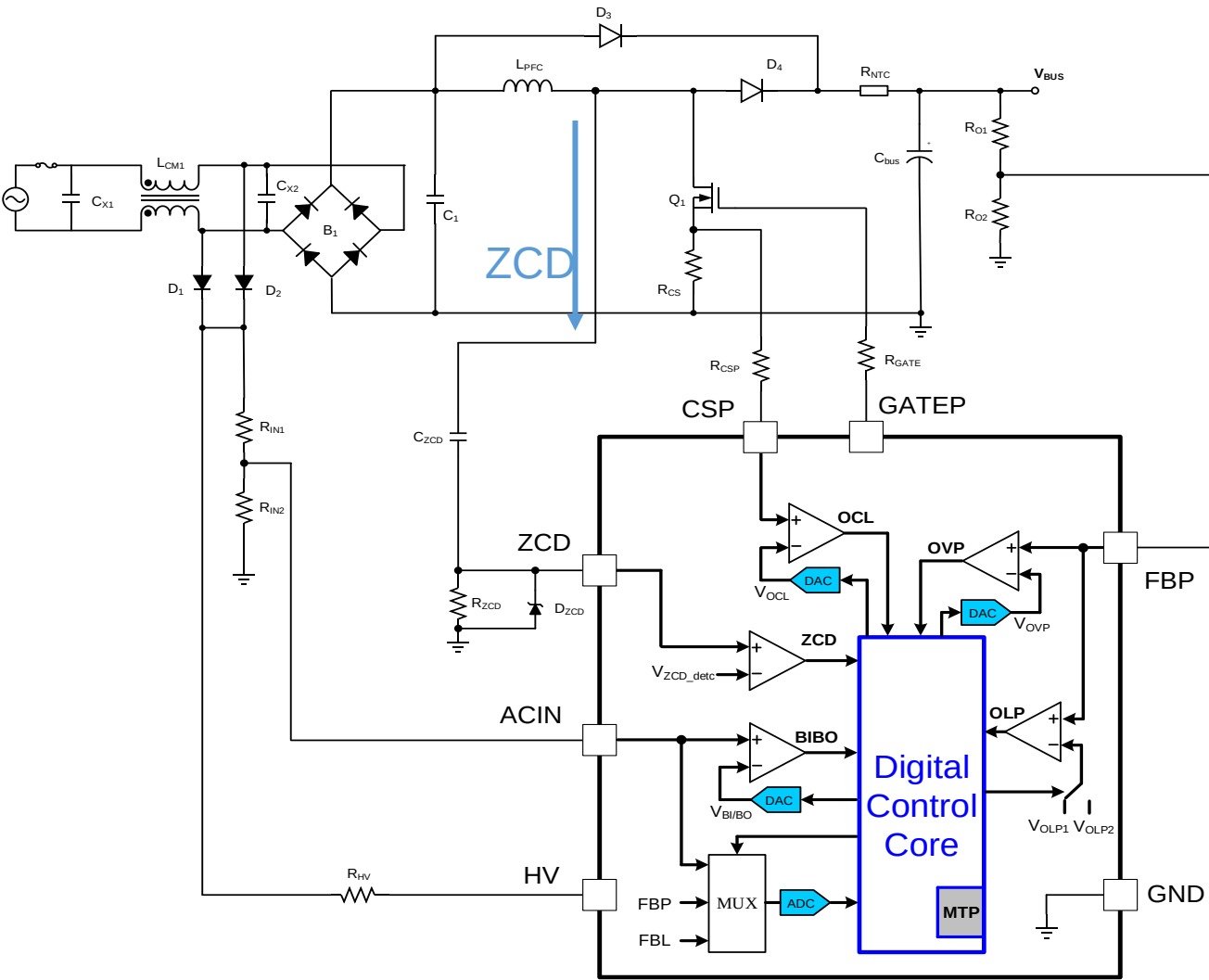
HR1275 PFCアーキテクチャ

入力ピン:

ピン	詳細
ACIN	外部分割抵抗を介したAC入力検知
ZCD	PFCバレーおよび消磁時間検知入力。高電圧コンデンサを介してPFCスイッチドレインに接続
FBP	外部分割抵抗を介した V_{BUS} 電圧検知
CSP	カレントリミット保護

出力ピン:

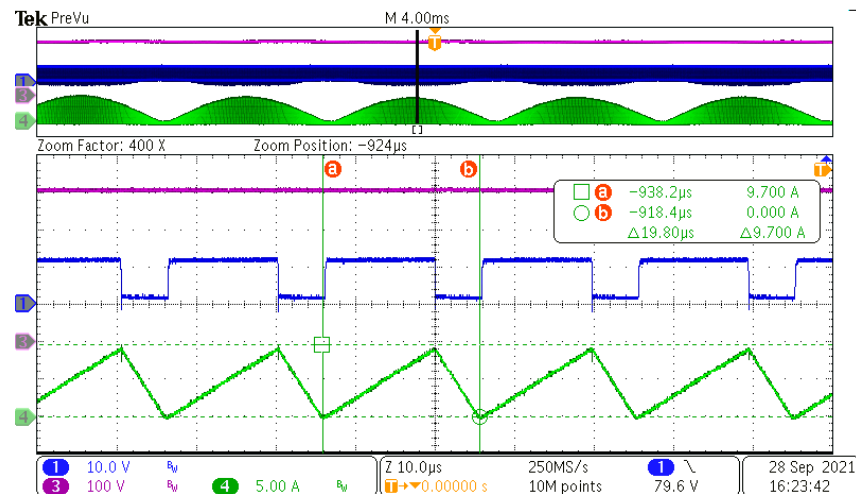
ピン	詳細
GATEP	PFCスイッチ用ゲートドライバ



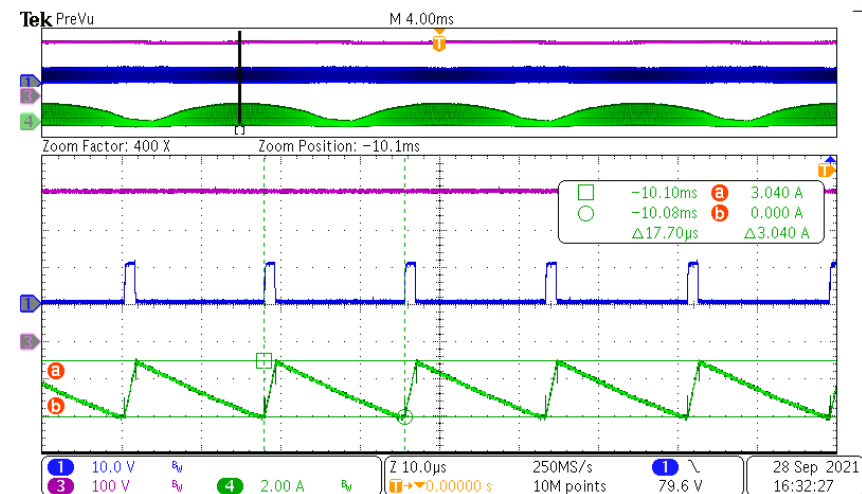
HR1275 240W性能

BCM
高負荷

試験条件: $V_{IN} = 85V_{AC}$, $I_{OUT} = 20A$



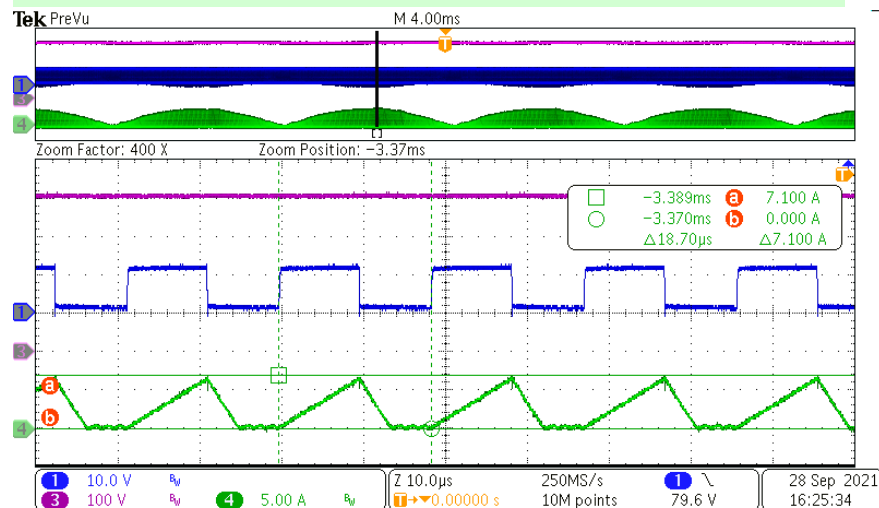
試験条件: $V_{IN} = 265V_{AC}$, $I_{OUT} = 20A$



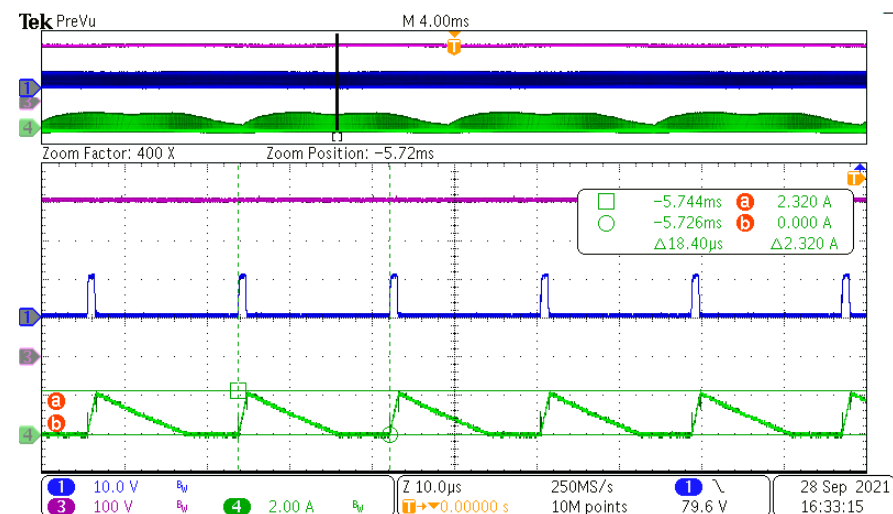
CH1: GATEP
CH3: V_{BUS}
CH4: I_{PFC}

DCM
軽負荷

試験条件: $V_{IN} = 85V_{AC}$, $I_{OUT} = 10A$



試験条件: $V_{IN} = 265V_{AC}$, $I_{OUT} = 10A$



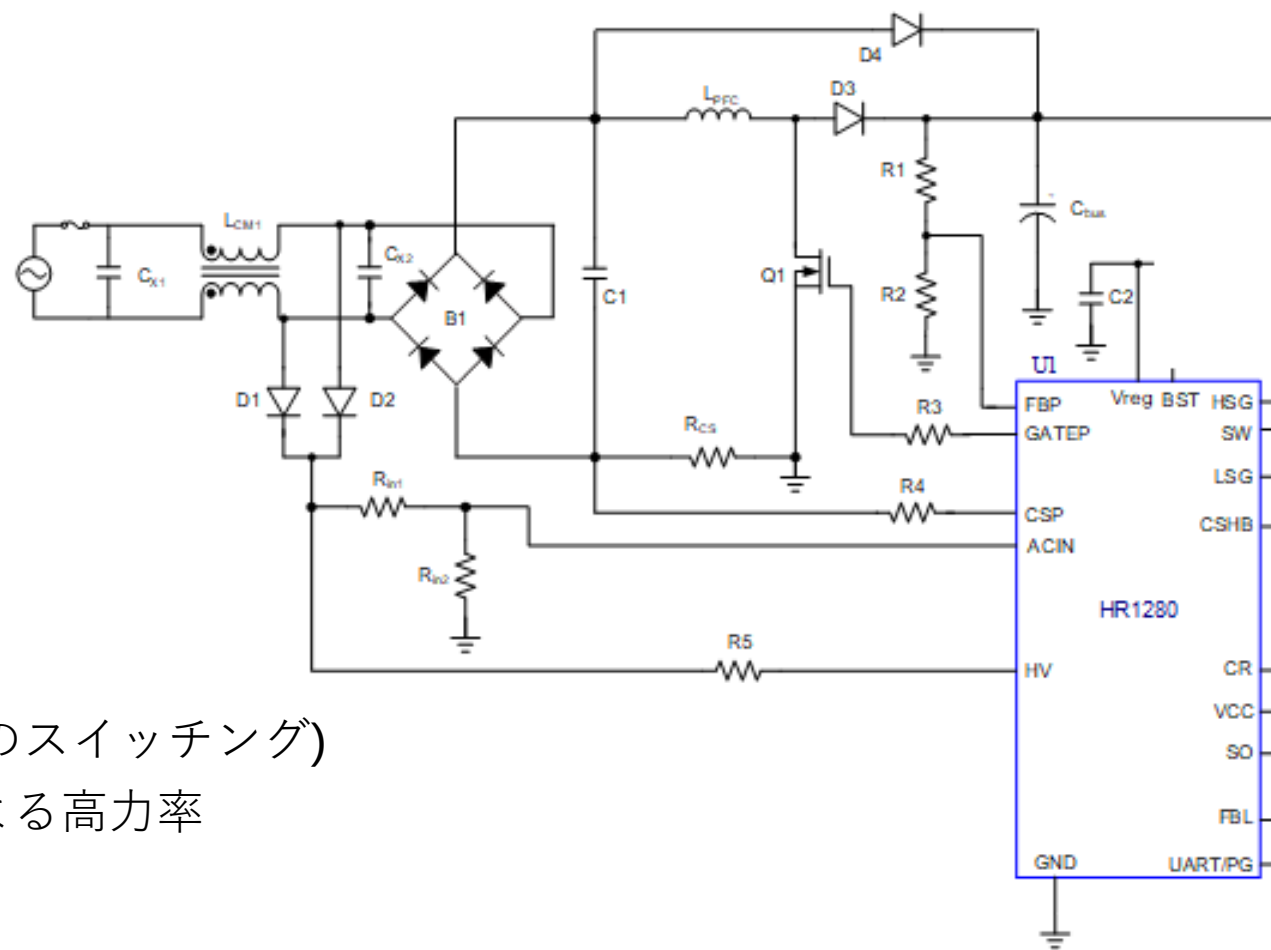
HR121x 主な機能

システム:

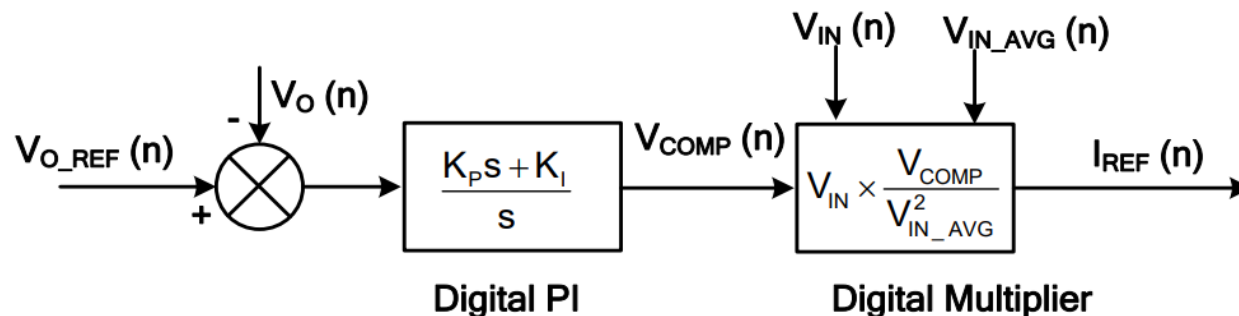
- 無負荷時Pin < 100mW、12V出力
- 起動時高電圧電流源
および スマートX-コンデンサ放電
- パワーグッド (PG) 機能
- UARTインタフェースとパラメータ調整用GUI

PFC:

- デジタルPFCのCCM / DCM動作 (最大250kHzのスイッチング)
- コンデンサ電流補償 (20%負荷時0.95未満) による高力率
- EMIを改善する調整可能な周波数ジッタ
- 調整可能なソフトスタート
- 低可聴ノイズのための調整可能なソフトバースト起動
- 調整可能なACブラウンイン / ブラウンアウト、過負荷保護 (OLP)、過電圧保護 (OVP)、過電流保護 (OCL)

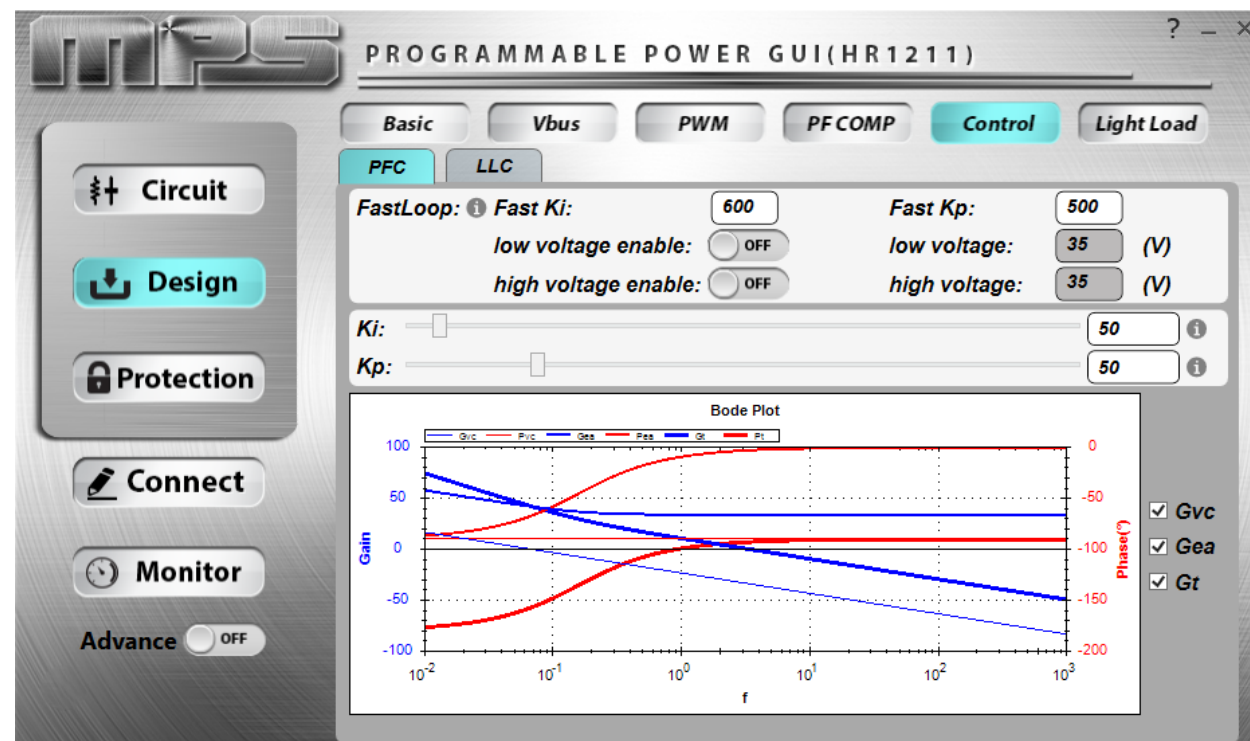


HR121x PFC制御



特許取得PFC平均電流制御:

- 重負荷用CCM
- 軽負荷用DCM (効率改善)
- デジタルPI補償器
- PI補償器はGUIを介して調整可能
 - 基板に直接接続
 - リアルタイム

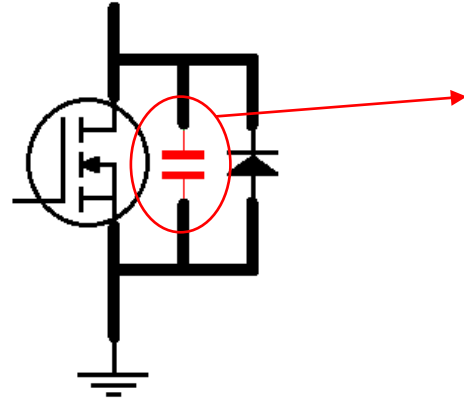


- 力率補正を理解する
- MPSのPFCソリューション
- 共振パワーコンバーションを理解する
- MPSのLLCソリューション
- Q&A

なぜ共振コンバータなのか

- 出力電力が増加すると、標準的でシンプルな構成ではあまりに非効率になる

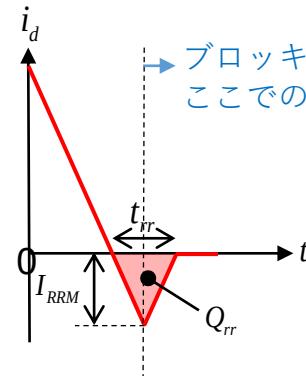
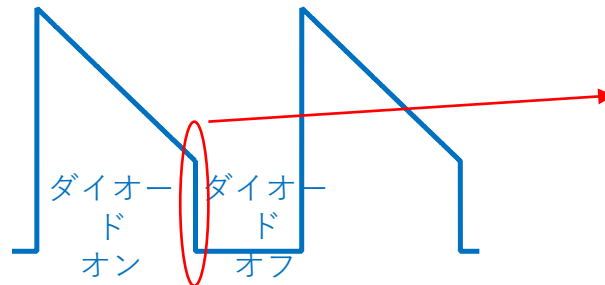
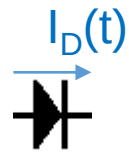
- パワースイッチのハードスイッチング
- ダイオードの逆回復時間



寄生コンデンサが充電されている間スイッチがオンになると、損失が大きくなる
(スイッチング周波数とともにスケールアップ)

→ ゼロ電圧スイッチング (ZVS)

- トランスにエネルギーを蓄積



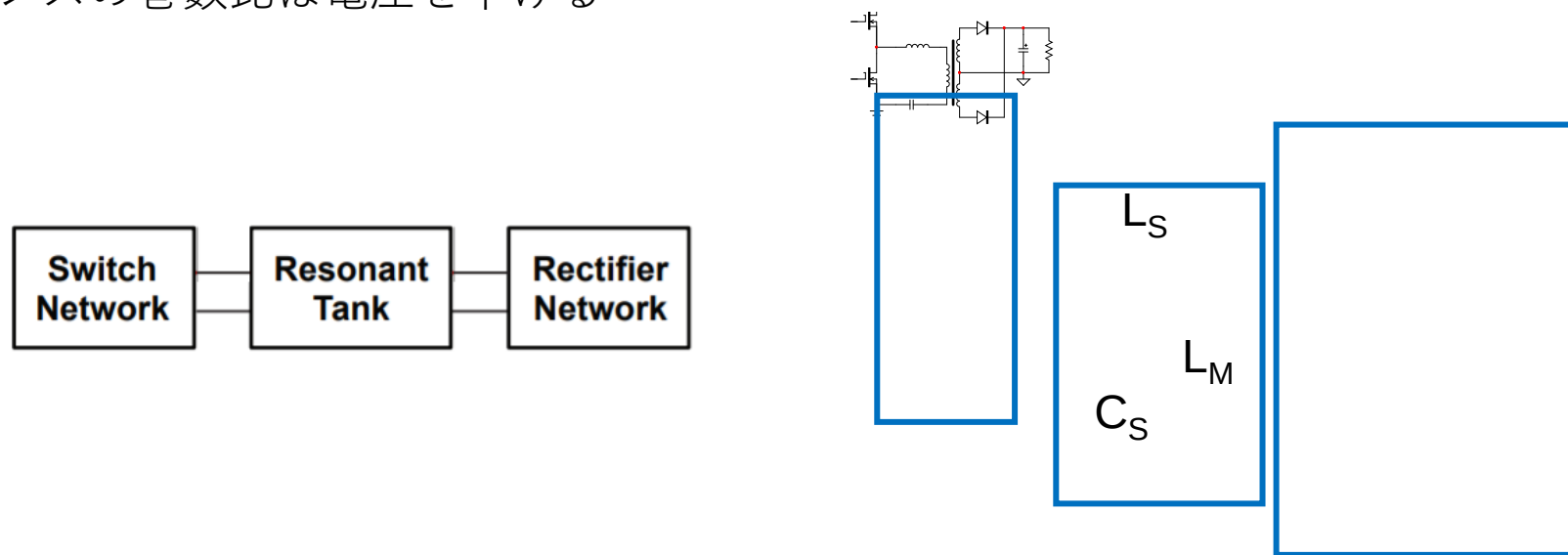
ブロッキングは
ここでのみ開始

ダイオードは逆流時、瞬時には
電圧をブロックし始めない

→ ゼロ電流スイッチング (ZCS)

LLC共振コンバータとは何か

- LLCは直列共振コンバータ:
 - トランスの磁化インダクタンス (L_M) は共振素子のひとつ
 - トランスの漏れインダクタンス (L_S) は共振に関与
 - 直列コンデンサ (C_S) は共振を確実にするために追加されている
 - トランスの巻数比は電圧を下げる



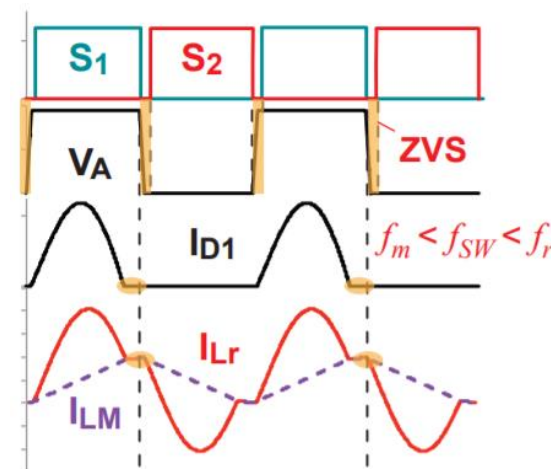
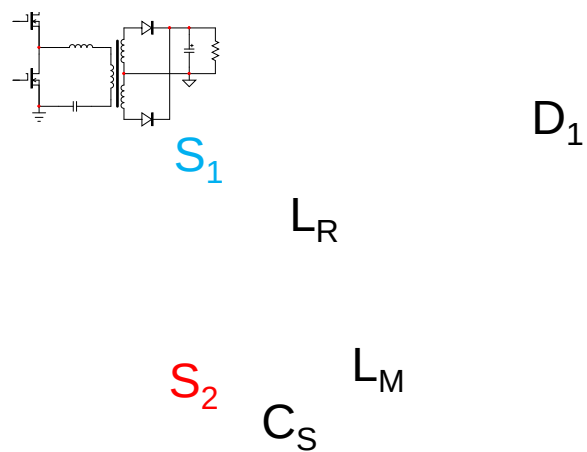
スイッチング周波数は、出力に送信される電力を制御する

LLC共振コンバータとは

LLCコンバータは通常負荷条件下でのソフトスイッチングを保証:

- パワースイッチ (一次側) 用のゼロ電圧スイッチング (ZVS)
- 整流ダイオード (二次側) 用のゼロ電流スイッチング

コンパクトなコンバータを形成するため高スイッチング周波数で動作可能



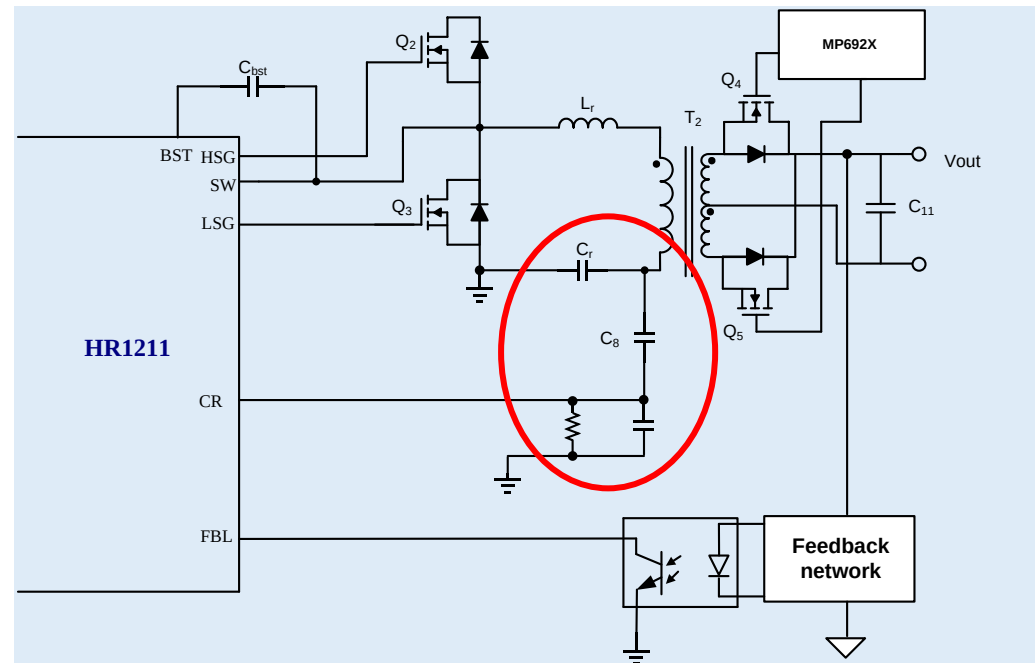
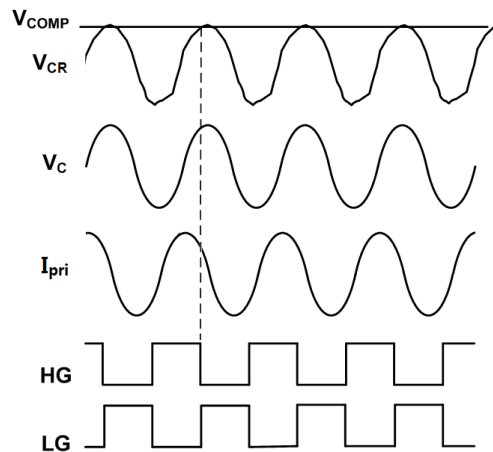
限られた部品点数 + 磁界は小さく (特に高スイッチング周波数において)

→ 高い電力密度

電流モード LLC

- 出力を調整するためにLLCの周波数を制御することは、複雑なループ補償につながる
- サイクルごとの一次側のピーク電流を制御することで、シンプルにすることが可能
→ 電流モードによる制御
- 共振コンデンサ周辺の電圧を監視することで、コントローラは電流の情報にアクセス可能

$$\Delta V_{C_r} = \frac{1}{C_r} \int i_{C_r}(t) \cdot dt$$



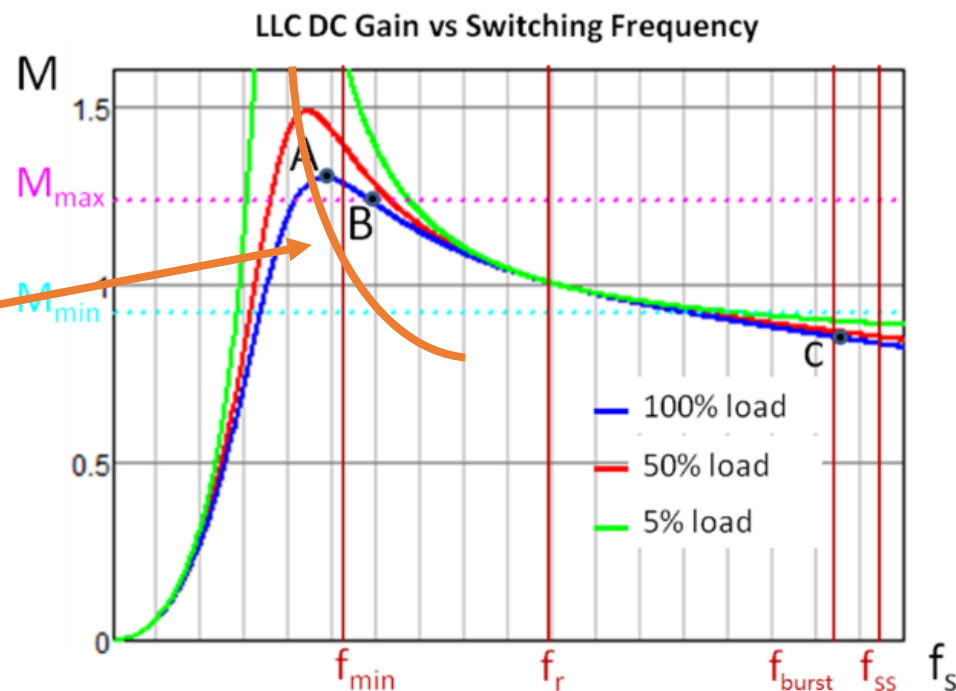
周波数制御機能付き電流モードLLC

基本波近似法 (FHA)に基づき、DCゲインはスイッチング周波数を調整することによって制御可能

ある周波数以下では制御則が反転

→ 領域の変更を回避

(容量性 vs. インダクティブ領域)



LLCコンバータはDCゲイン範囲が限られているため、大きな入出力電圧変動に対応しにくい:

- PFCフロントエンドステージによく適合 (LLCステージに対して安定した一定の入力電圧)
- すべてのアプリケーションに適合するわけではない (一定の電圧出力により適している)

- 力率補正を理解する
- MPSのPFCソリューション
- 共振パワーコンバージョンを理解する
- **MPSのLLCソリューション**
- Q&A

MPS LLCコントローラのロードマップ

コンボ
PFC + LLC

HR1210/1/3/5

フルデジタルPFC + LLC
電流モードLLC

HR1280

フルデジタルPFC + LLC
電流モードLLC

HR1275

フルデジタルPFC + LLC
電流モードLLC

スタンドアロン
LLC

HR1001A

ダイレクト周波数制御
OCP自動再起動

HR1001C

ダイレクト周波数制御
耐サージ性能アップ

HR1002/A

ダイレクト周波数制御
高スイッチング周波数

HRxxxx

デジタル
電流モードLLC

HR1001L

ダイレクト周波数制御
OCPラッチ

HR1001B

ダイレクト周波数制御
OCP自動ラッチ

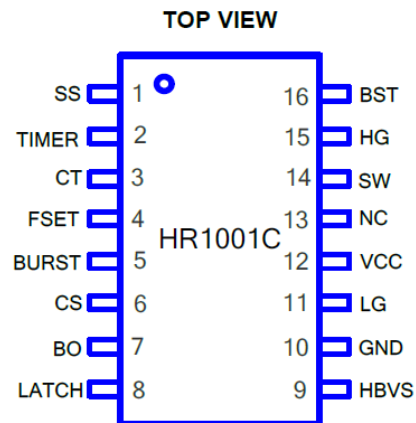
量産中

サンプル出荷中

設計中

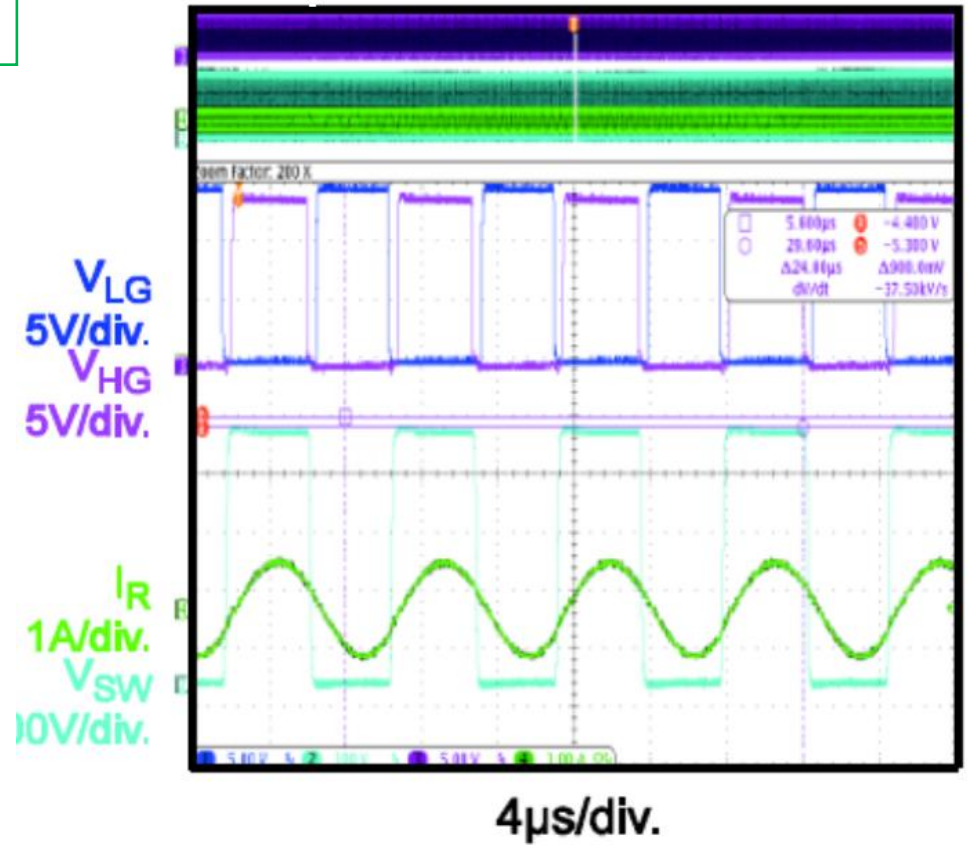
HR1001C 主な機能

- アダプティブデッドタイムの調整 (ADTA)
- サージ性能強化のための遅延時間調整可能な過電流保護 (OCP)
- 容量性モード保護 (CMP)
- 共振ハーフブリッジコンバータ用の50%デューティサイクル、可変周波数制御
- ブートストラップダイオードを内蔵した600Vハイサイドゲートドライバ

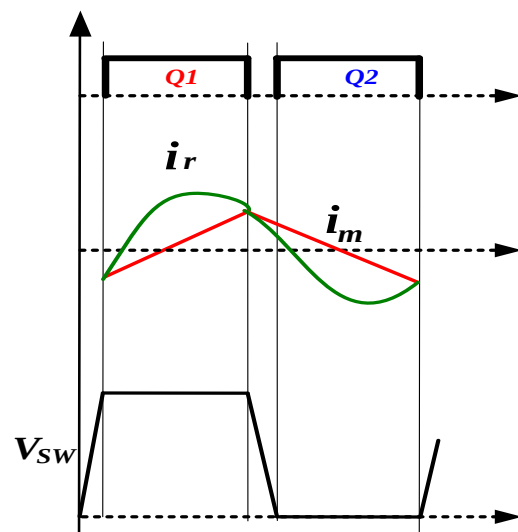


Steady State

$V_{OUT}=24\text{ V}$, $I_{OUT}=4.16\text{ A}$

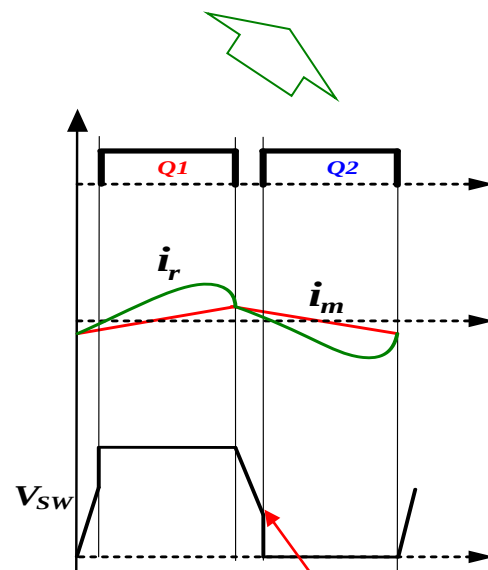


HR1001C アダプティブデッドタイム



通常のソフトスイッチング

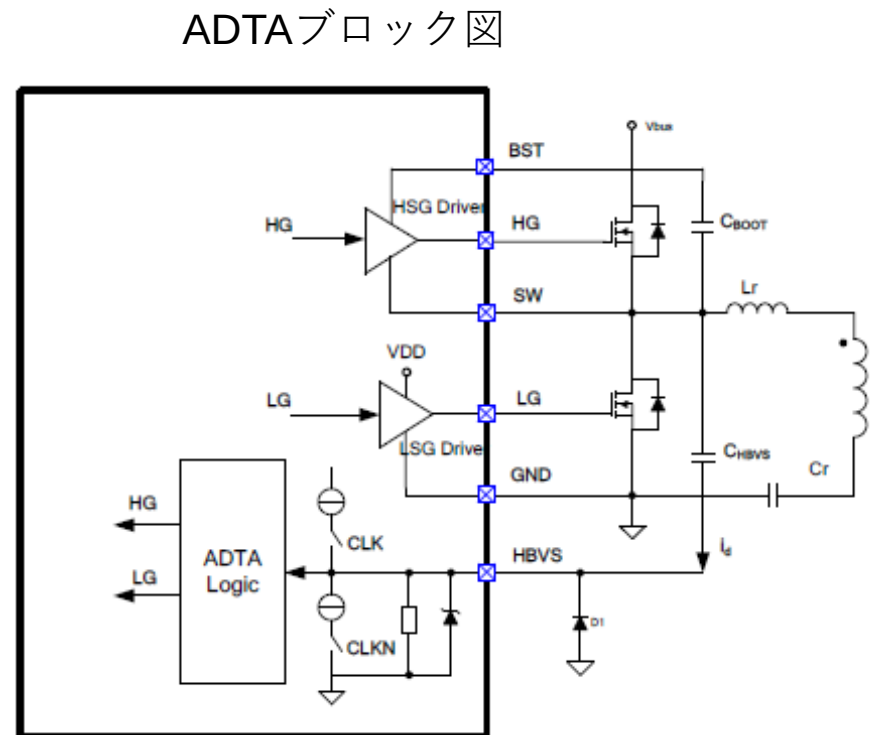
- 抵抗率
- 放熱問題
- コスト高



ハードスイッチング!

軽負荷で
 f_{SW} 上昇

L_M 許容度



アダプティブデッドタイムの調整で、軽負荷時でもZVSを保証

→ いかなるMOSFETでも高効率と低コストを達成可能

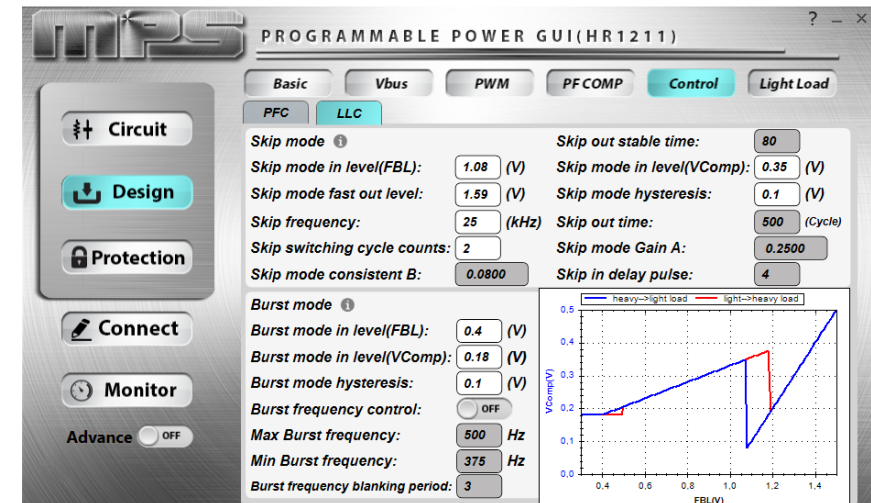
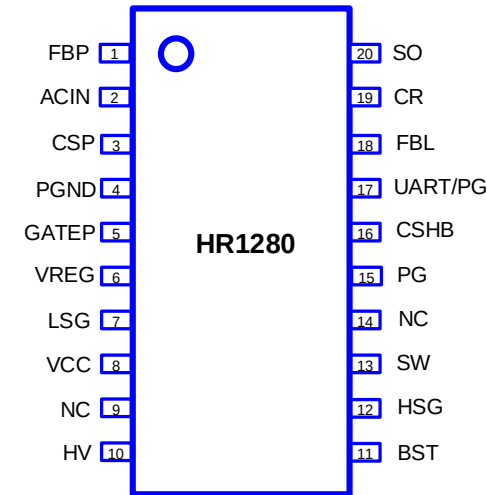
HR1275 LLC 主な機能

システム全体の機能

- 全体で85mW未満の無負荷時電力損失
- 起動時のHV電流源
- ACドロップアウト時のスマートX-コンデンサ放電、IEC 62368およびIEC 60950認証済み
- パワーグッド (PG) 機能
- 外部過熱保護 (OTP)
- パラメータ調整用のUARTインタフェース
- ユーザーフレンドリーなGUI

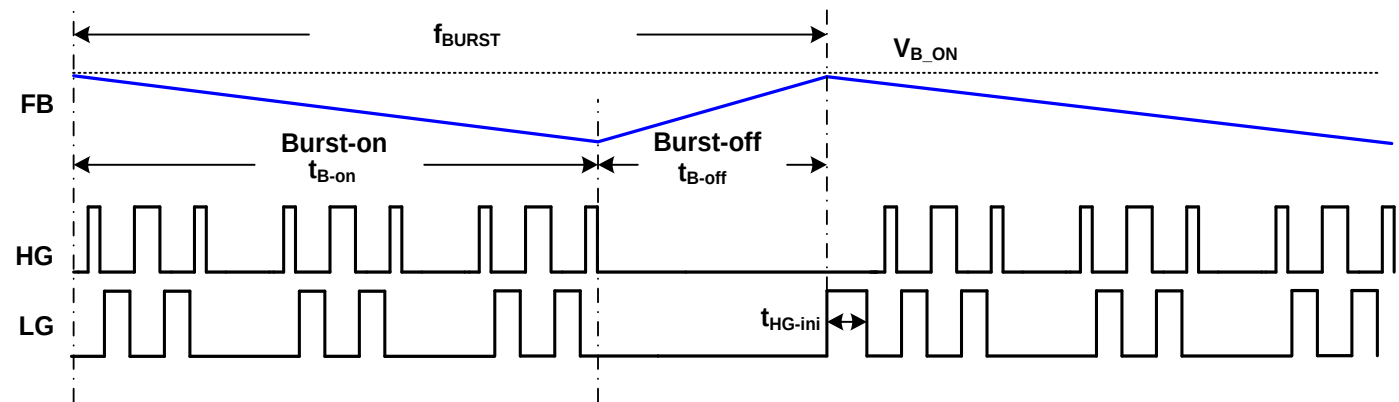
LLCコントローラ

- 電流モード制御
- 正確なEntry / Exit Skip / Burstモード制御
- 最小および最大リミットでのHB LLCのアダプティブデッドタイム調整 (ADTA)
- 容量性モード保護機能
- 最大500kHzで動作
- 調整可能な過電流保護 (OCP) と過電力保護 (OPP) 機能



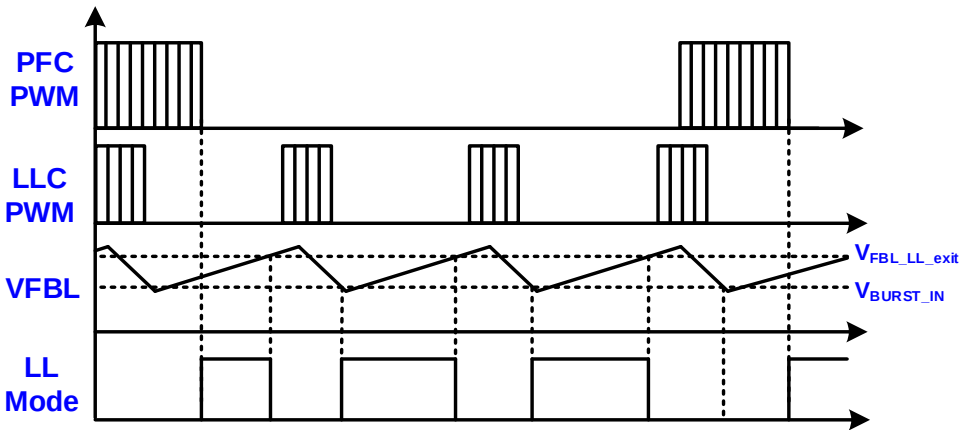
HR1275 LLC 軽負荷バーストモード

- 調整可能な固定 V_{COMP}
- 調整可能な t_{H1} および t_{L1}
- 調整可能なスキップ周波数
- FBL電圧を基にしたPWM オン / オフ:
バースト-オン / オフ レベル
- バースト周波数制御
- 省電力のためのFBLプルアップ抵抗制御



バーストモードでの動作電流:

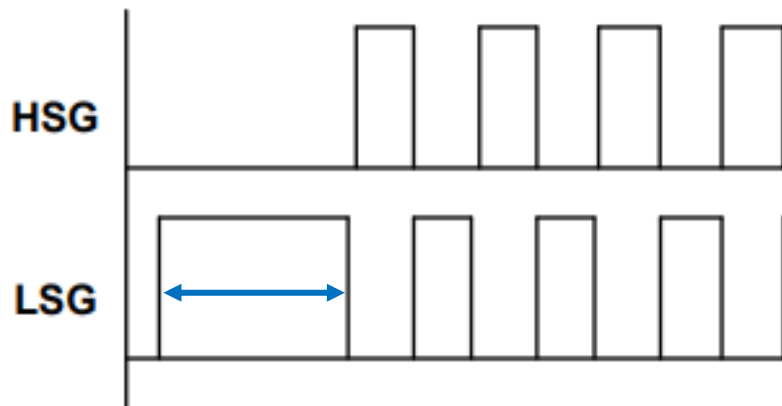
製品型番	HR1275	HR1280	HR1211
ICの消費電流	1.2mA	1.3mA	2.2mA



HR1275 無負荷スタンバイ電力:

V_{IN}	85V _{AC}	115V _{AC}	230V _{AC}	265V _{AC}
無負荷時消費電力 (mW)	73.9	75.1	82.2	84.8

HR12xx 起動方法



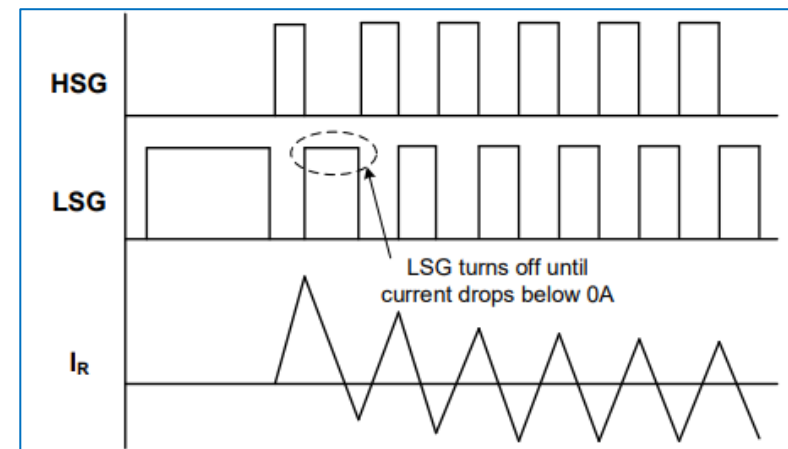
起動:

- ローサイドゲート (LSG) が最初にオンしてBSTコンデンサを充電
- それから、ハイサイドゲート (HSG) とLSGが選択的にオン
- ソフトスタートは、高スイッチング周波数で始まった後フィードバック (FB) ループが引き継ぐまで減少することで達成される

注記:

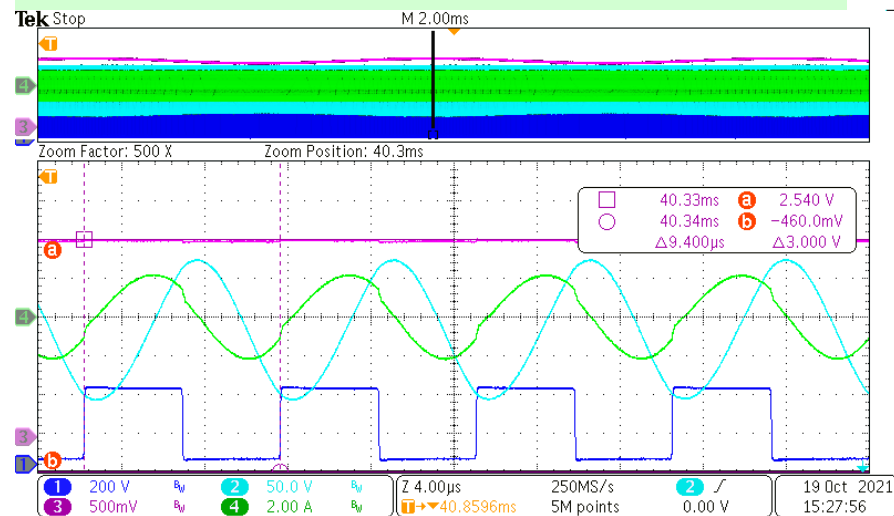
- 最初のLSGパルス期間はGUIで調整可能

- 起動中共振コンデンサ電圧に不均衡が発生するが、これはハードスイッチングを誘発する
- ハードスイッチングを回避するため、共振タンクの電流がゼロ以下に落ちるまでLSGドライバはオフにならない ($V_{CSHB} < V_{CSNR}$)



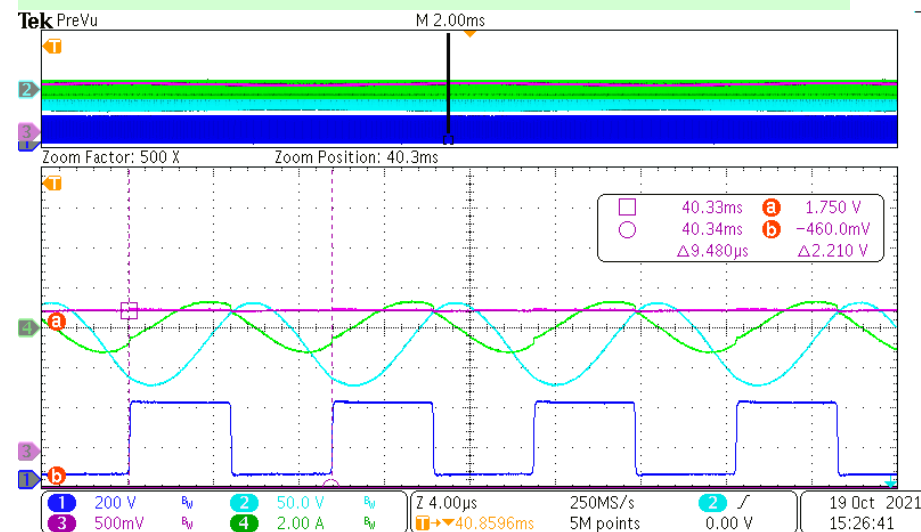
HR1275 LLC波形

試験条件: $V_{IN} = 220V_{AC}$, $I_{OUT} = 20A$



高負荷

試験条件: $V_{IN} = 220V_{AC}$, $I_{OUT} = 10A$



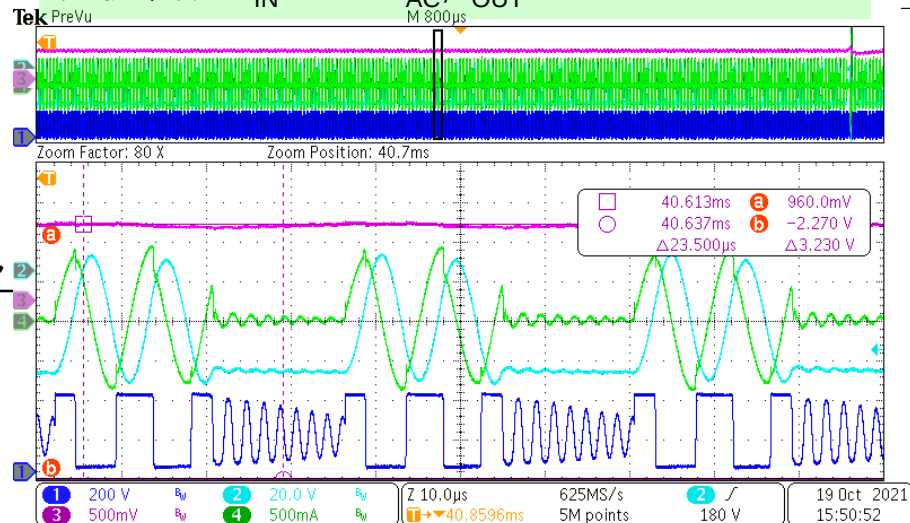
CH1: SW

CH2: V_{CR}

CH3: FBL

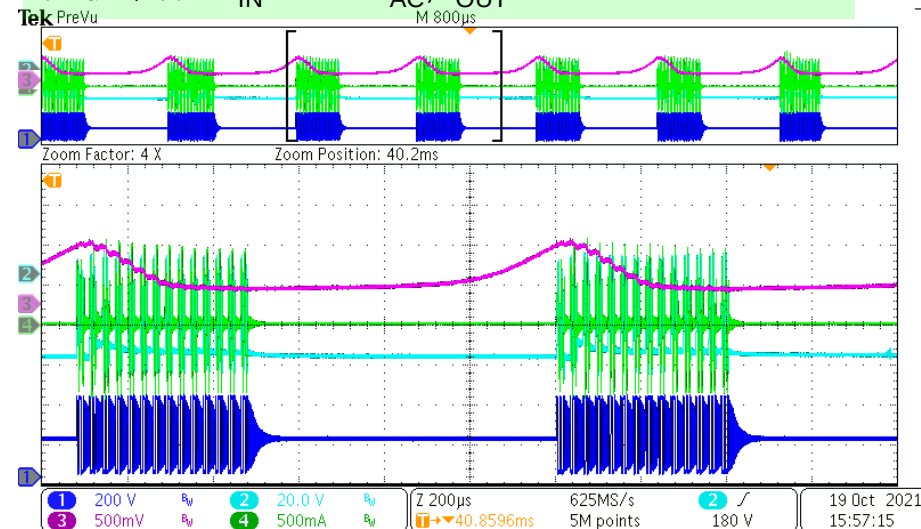
CH4: I_R

試験条件: $V_{IN} = 220V_{AC}$, $I_{OUT} = 2A$



バースト
軽負荷

試験条件: $V_{IN} = 220V_{AC}$, $I_{OUT} = 1A$



MPS LLC設計ツール

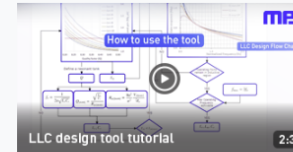
LLC Design Tool

MPS LLC Tool

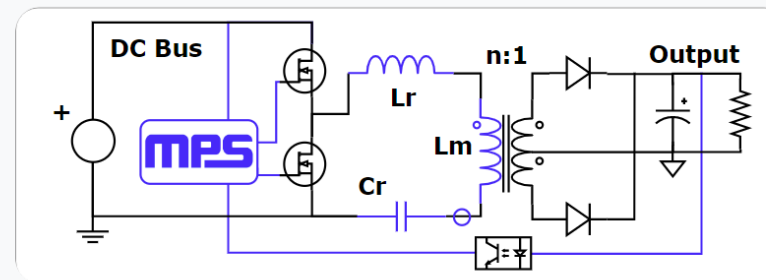
The MPS LLC Tool will help you to define a value for the resonant tank (formed by L_r , C_r and L_m) to ensure that the converter is working on the quasi resonant region achieving soft switching. The tool will suggest a design solution depending on the Input-Output specification but the user can modify the key parameters.

LLC converters are becoming more and more famous because of their ability to achieve high powerdensities with low losses. This behaviour is achieved by means of soft switching techniques. The one most commonly used in this type of converter is zero voltage switching (ZVS). What the designer must guarantee is that once the transistor switches, the voltage of the drain source (V_{ds}) must become close to zero. Then the switching losses (known as the product of V_{ds} by the transistor current) are drastically reduced. Obtaining this scenario within all input-output conditions is not an easy task. MPS with this tool wants to speed up the design process of this type of converters.

How to use the tool ▼



チュートリアル



Specifications

Define your input and output circuit specifications:

Input		Output	
Minimum Voltage [V]	Maximum Voltage [V]	Voltage [V]	Overload [%]
360	410	12	10
Typical Voltage [V]	Resonance Frequency [kHz]	Current [A]	Auxiliary Power [W]
380	100	55	

Peak Mg

仕様を入力

<https://www.monolithicpower.com/jp/design-tools/design-tools/llc-design-tool.html>



MPS LLC同期整流コントローラのロードマップ

LLC 同期整流ドライバ

LLC用デュアル同期整流コントローラ

MP6922A
30mV V_{DS}
デュアル同期整流

MP6923
15mV V_{DS}
デュアル同期整流

MP6922
70mV V_{DS}
デュアル同期整流

MP6925/A
高効率デュアル同期整流

MP6926
高周波数LLC 同期整流

高電力密度の
PDマーケット向け

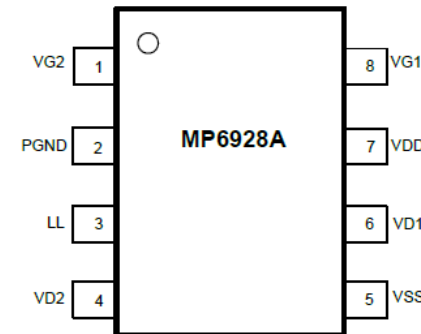
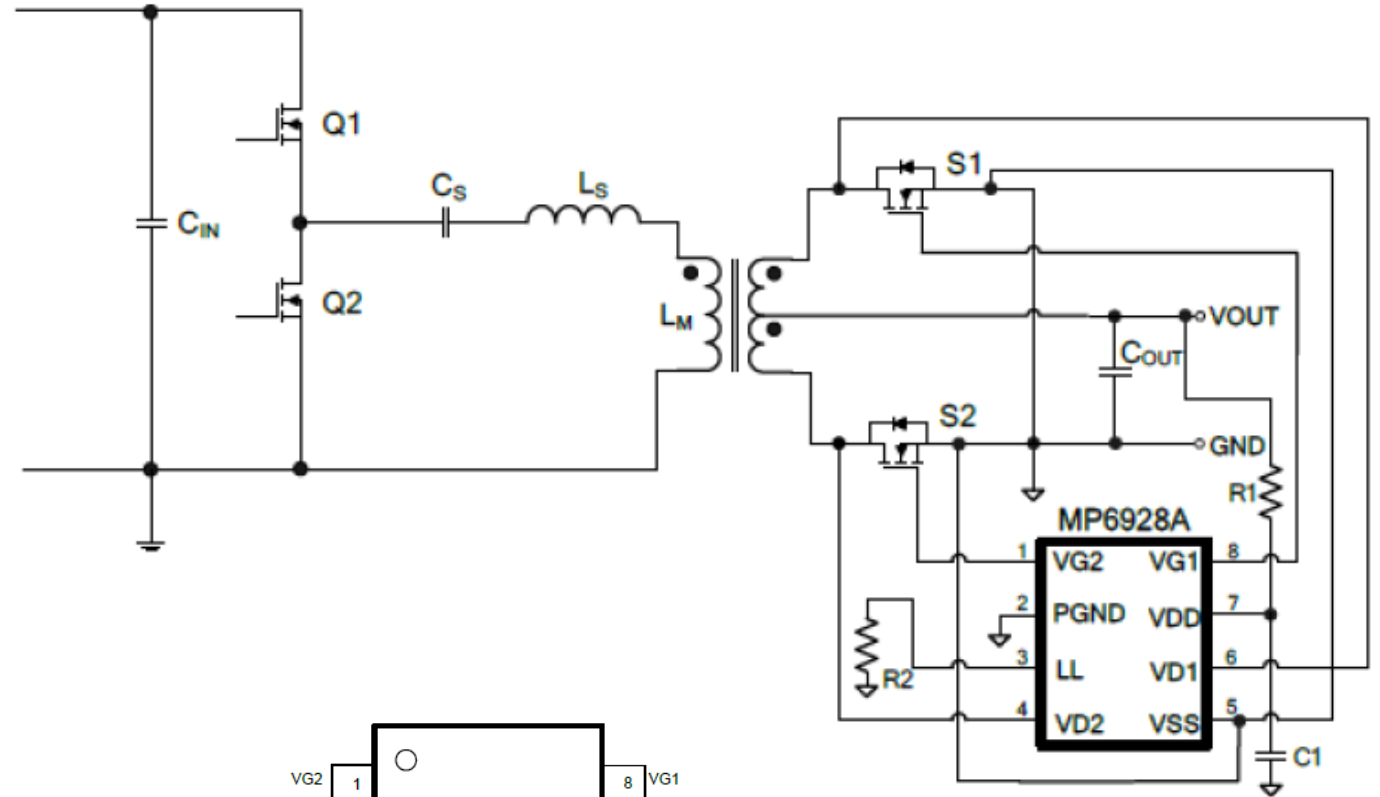
量産中

サンプル出荷中

MP6928A 主な機能

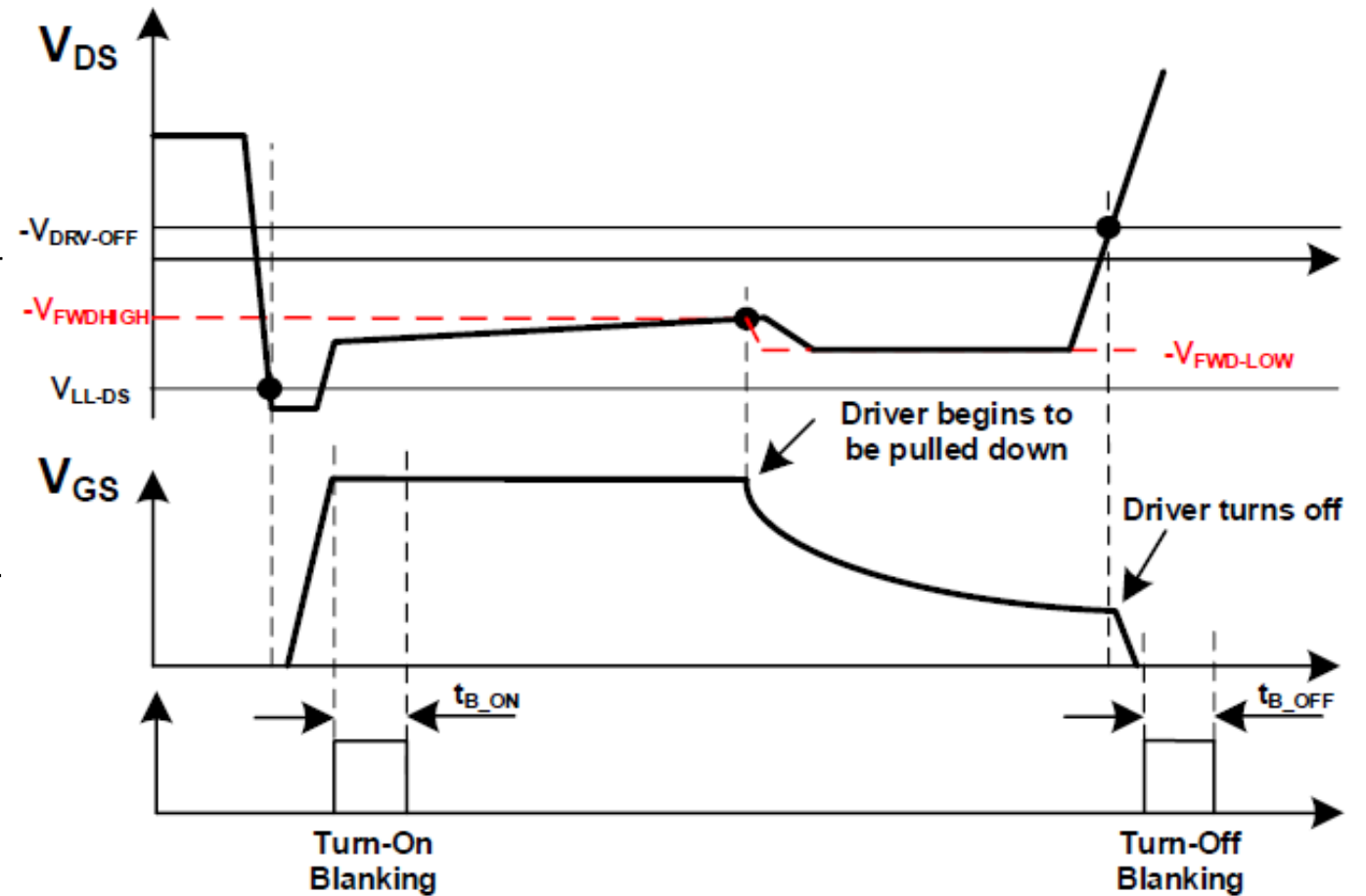
→ MP6926, MP6929へ

- 12Vの標準および5Vのロジックレベル FETとともに動作
- 高速ターンオフ
- 4.3V~35Vの広範な V_{DD} 動作範囲
- 200Vのドレイン・ソース間電圧に耐性
- 150 μ A未満の自己消費電流 (I_Q)
- ハイサイドおよびローサイドの整流に対応



MP6928A アダプティブ順方向電圧

- 高速なターンオフ速度 (約35ns)
- CCM、DCMおよびBCMモードに対応
- 軽負荷時にゲートドライバをラッチオフするための軽負荷機能。電流を85 μ Aに制限
- 2つのNチャネルMOSFETを駆動、アダプティブ順方向電圧降下レギュレーション



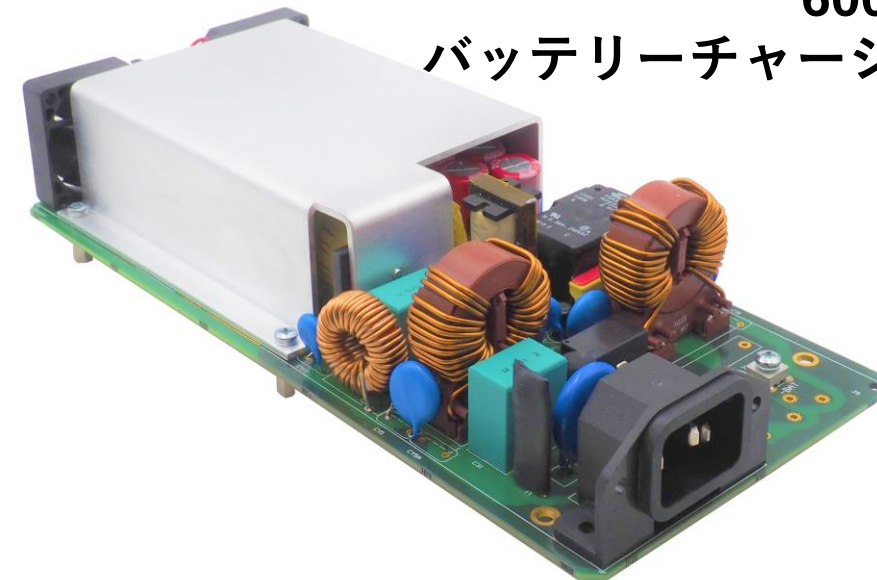
HR1211 リファレンスデザインの例

USB PD 3.1 240W



パラメータ	仕様
入力電圧範囲	100V _{AC} ~ 265V _{AC}
出力電圧範囲	3.3V _{DC} ~ 48V _{DC}
出力電流	最大5A
効率	94%以上
力率	98%以上
伝導エミッション	クラスB EN55032規格に対応

600W
バッテリーチャージャ



パラメータ	仕様
入力電圧範囲	85V _{AC} ~ 265V _{AC}
出力電圧範囲	35V _{DC} ~ 58.8V _{DC} (± 1.5%)
出力電流	10A (± 1.5%)
効率	92%以上
力率	98%以上
伝導エミッション	クラスB EN55032規格に対応