

TI *Live!* POWER SUPPLY DESIGN SEMINAR

2022年4月6日

絶縁型ゲート・ドライバ向けバイアス電源の
設計検討事項

池田 幸司

目次

- ・ インバータと絶縁型ゲート・ドライバ向けバイアス電源の構成
- ・ 絶縁型バイアス電源を製作する複数の方法：
 - 制御方式
 - トポロジ
 - トランス
- ・ LLCベースのオープンループ絶縁型バイアス電源：
 - 動作原理
 - 回路のバリエーション
 - 電圧レギュレーション
 - 複数出力
 - 設計手順
- ・ 性能実証

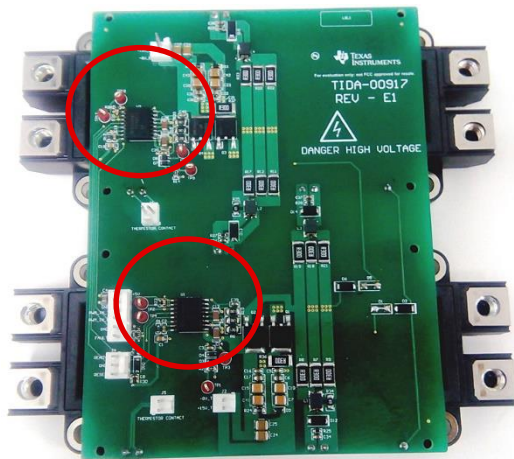
絶縁型ゲート・ドライバを採用している 各種アプリケーション



トラクション・インバータ



モーター・ドライブ



インバータと
絶縁型ゲート・ドライバ

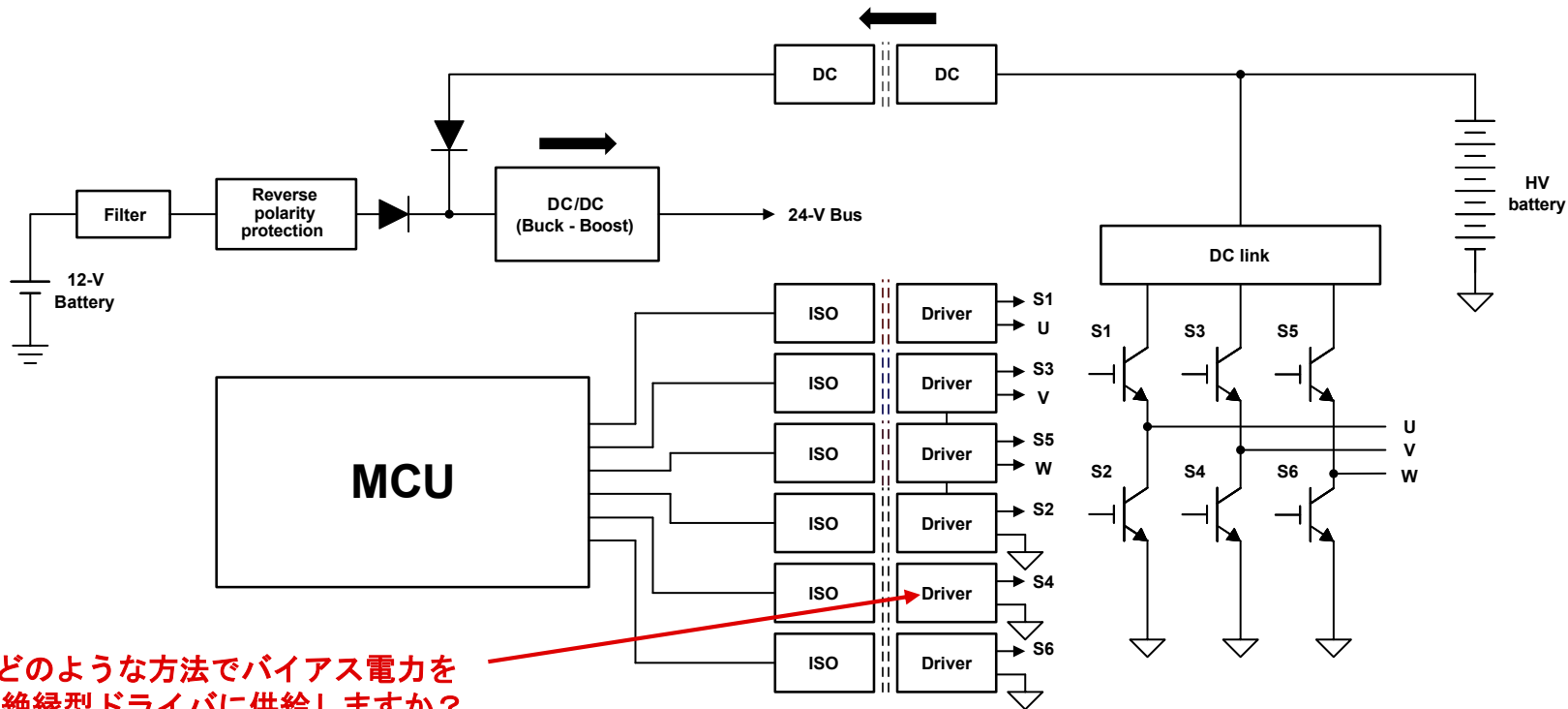


UPS



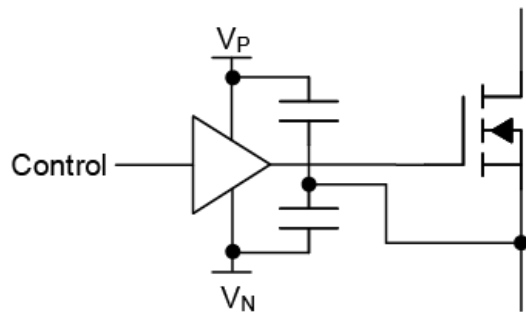
オンボード・チャージャ

例：自動車のトラクション・インバータ



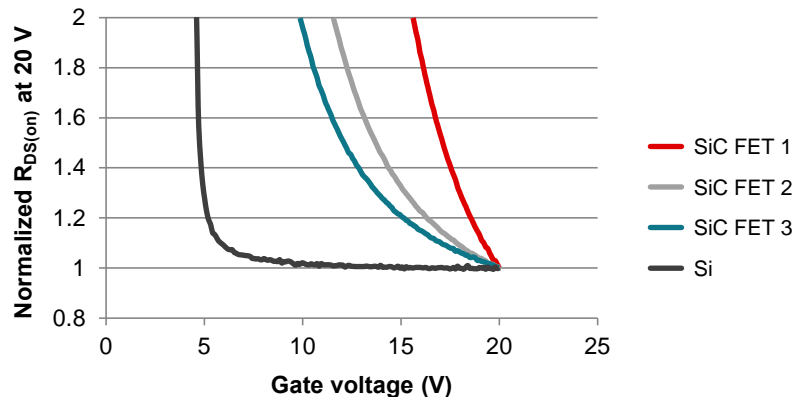
どのような方法でバイアス電力を絶縁型ドライバに供給しますか？

ゲート・ドライバの要件



ゲート・ドライバの電力

$$P_{DRV} = (V_P - V_N) \times Q_g \times f_{sw}$$
$$= V_{DRV} \times Q_g \times f_{sw}$$

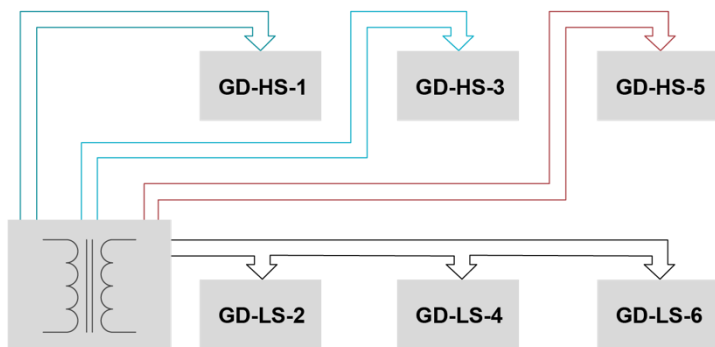


- Normalized $R_{DS(on)}$ はゲート電圧20V時の $R_{DS(ON)}$ を基準としています。
- SiC FET は $R_{DS(on)}$ で飽和せず、 V_{GS} が高くなると、 $R_{DS(on)}$ は小さくなります。

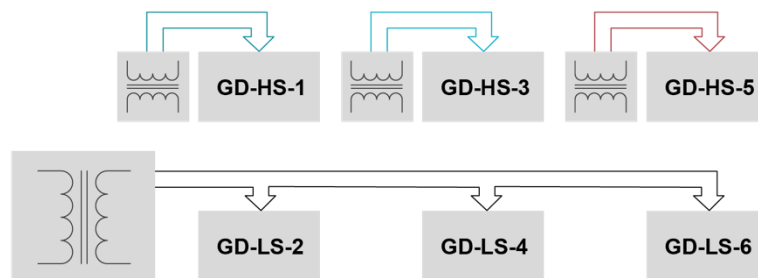
	Si MOSFET	SiC MOSFET	IGBT
正電圧レール (V_P)	+12V、+15V	+18V、+20V (5%、3%、1%)	+15V、+18V
負電圧レール (V_N)	0V	-5V、-4V、-3V	-8 V または 0 V

さまざまなバイアス電源の構成

集中型



一部分散型

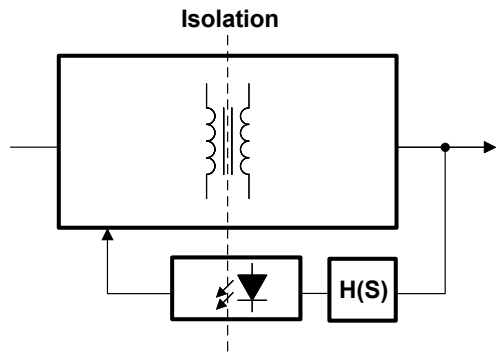


完全分散型



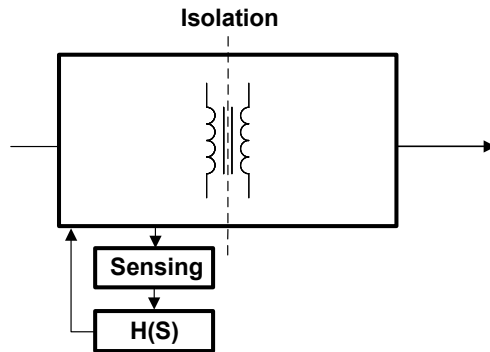
- 集中型システムはコストが最小ですが、電力が集中し、障害発生時の管理が難しくなります。
- 完全分散型システムは電力と障害を分散しますが、よりコストが必要となります。
- 一部分散型システムは、コストと信頼性の間でのトレードオフとなります。

出力電圧の制御



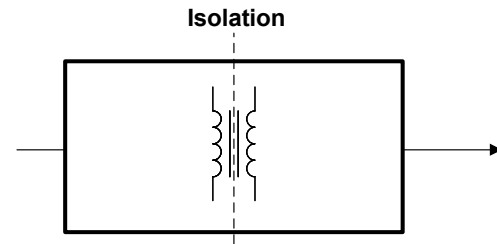
クローズドループ
2次側フィードバック

- 適切にレギュレーションされる出力
- プリレギュレータは必要ありません。
- 部品点数は多くなります。
- フォトカプラが原因で、信頼性は高くありません。



クローズドループ
1次側フィードバック

- セミレギュレーション出力
 - 補助巻線電圧でフィードバック
- プリレギュレータは必要ありません。
- 出力電圧サンプリング方式を使用する場合、ノイズに敏感です。



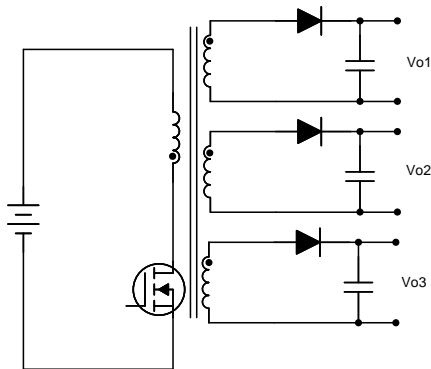
オープン・ループ
フィードバックなし

- 制御ループを使用せず、常に安定した動作です。
- ノイズにそれほど敏感ではありません。
- レギュレーションしないので、プリレギュレータが必須です。

オープンループ制御は信頼できるソリューションを実現します。

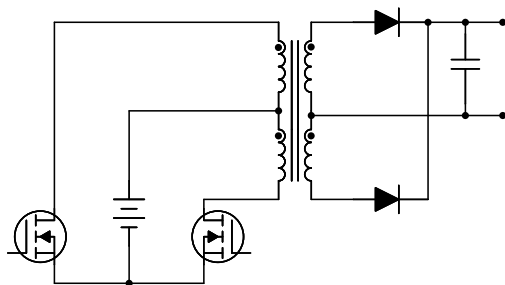
絶縁型バイアス電源で使用する各種トポロジ

フライバック



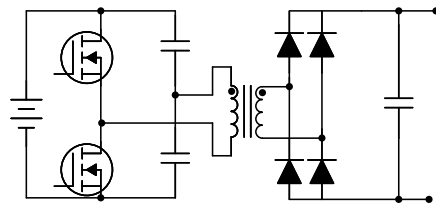
- フライバックは簡単に複数の出力を生成できます。
 - 巻線比に比例する電圧。
 - 同じような負荷では、クロス・レギュレーションはそれほど課題になりません。
 - 集中型システムに最適です。
- フォトカプラ、または1次側フィードバックを通じて制御可能。

プッシュプル



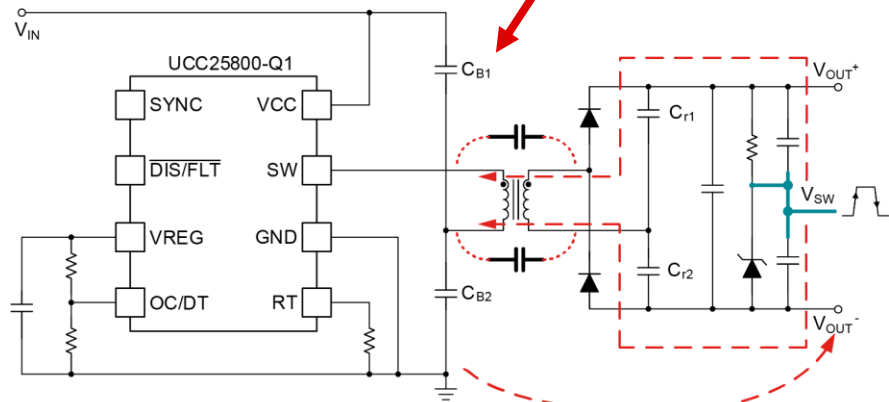
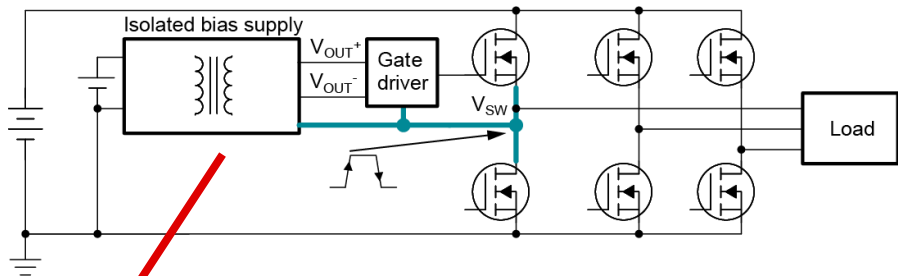
- 50% デューティ・サイクルのオープンループ動作を採用する場合、トランス経由で出力を入力に接続します。
- デューティ・サイクルが50%未満の場合、クローズドループ制御で出力電圧のレギュレーションを実行するには、フィルタで1個のインダクタが必要。
- 分散型と一部分散型の各システムにとっては適切です。

ハーフまたはフル・ブリッジ



- 50% デューティ・サイクルの場合、トランス経由で出力を入力に接続します。
- 1個のゲート・ドライバICと1個のシンプルなタイマを使用するだけで実装できます。
- 分散型と一部分散型の各システムにとっては適切です。

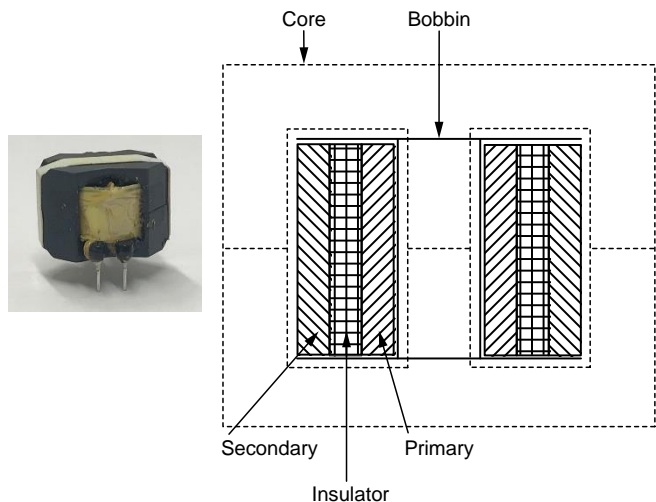
トランスのパラメータはシステムのEMIに影響を及ぼす



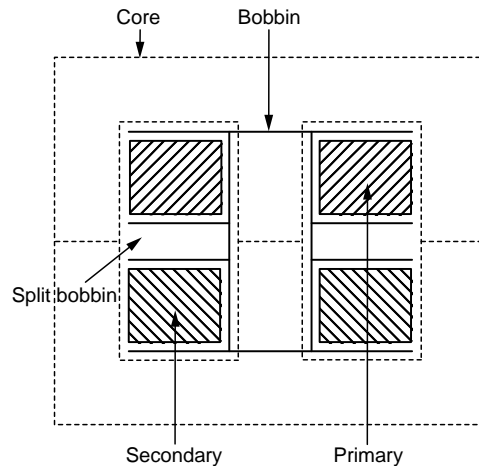
- 大きいdv/dtは、トランスの寄生容量と結合し、1次側に影響を及ぼします。
- EMIノイズが増大します。
- 余分の損失が発生します。
- コントローラのノイズが増加し、同相過渡耐性 (CMTI) の課題が発生します。
- dv/dt がより大きい SiC または GaN のデバイスでノイズが悪化します。

$$i = C \frac{dv}{dt} = 1 \text{ pF} \times \frac{100 \text{ V}}{\text{ns}} = 0.1 \text{ A}$$

トランスの構造：寄生容量の低減



$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$



- 絶縁材の厚さが増すと静電容量は小さくなります。
- 表面積が大きい場合、効果が下がります。
- 分割ボビンを採用すると、表面積が減り、距離が広がるので、静電容量が小さくなります。
- より小さい静電容量を実現できます。

距離を広げると、寄生容量が小さくなると同時に、漏れインダクタンスが大きくなります。

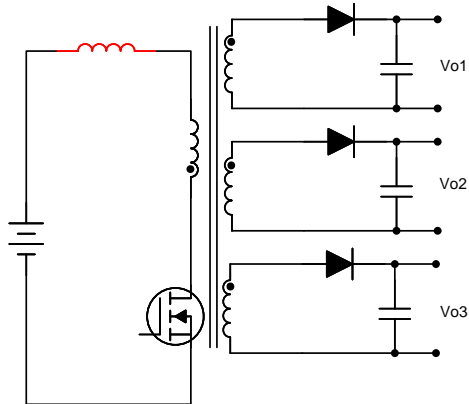
絶縁型バイアス電源の各種トランス

	分割ボビン トランス	プッシュプル トランス	3巻線 フライバック	2巻線 PSR フライバック	ハーフブリッジ
$C_{\text{Pri-Sec}}$	2pF 未満	$\cong 10\text{pF}$	$\cong 20\text{pF}$	$\cong 20\text{pF}$	$\cong 20\text{pF}$
CMTI	150V/ns 以上	悪い	悪い	かなり悪い	かなり悪い
コスト比較	ベースライン	+15%	+30%	+18%	+18%
漏れインダクタンス	大きい	非常に小さい	小さい	小さい	小さい
レギュレーション	良好	良好	より良好	最良	良好

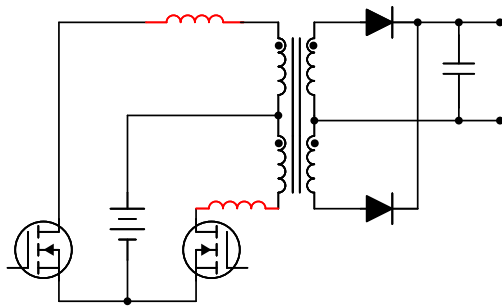
分割ボビントランスを使用すると、1桁静電容量が小さくなります。

トポロジに対する漏れインダクタンスの影響

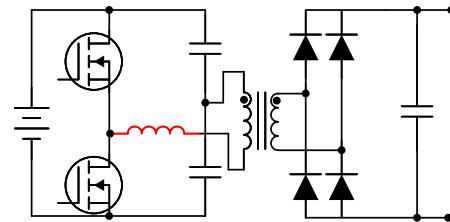
フライバック



プッシュプル



ハーフブリッジ

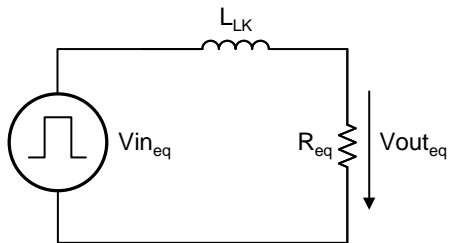
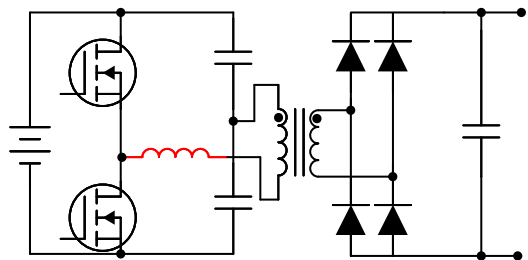


- リークエージ・エネルギーを2次側に伝送することはできません。
- リークエージによって：
 - リンギングに起因するEMIの増加
 - 損失の増加
 - デバイスのストレス増加
- リークエージを最小化する必要があります。

- リークエージ・エネルギーは完全にリリース可能です。
- リークエージ由来の余分のリンギングは発生しません。
- よりよい電圧レギュレーションを得るためにリークエージを小さくする必要があります。

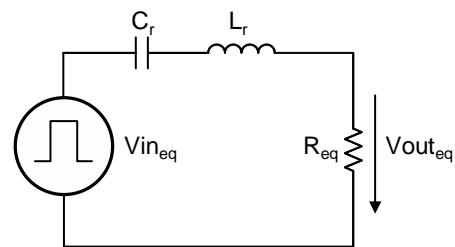
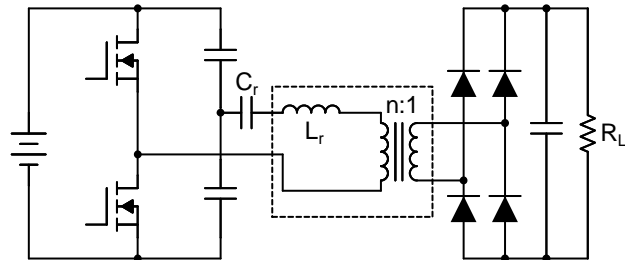
PWMコンバータと共振コンバータの比較

PWMコンバータ



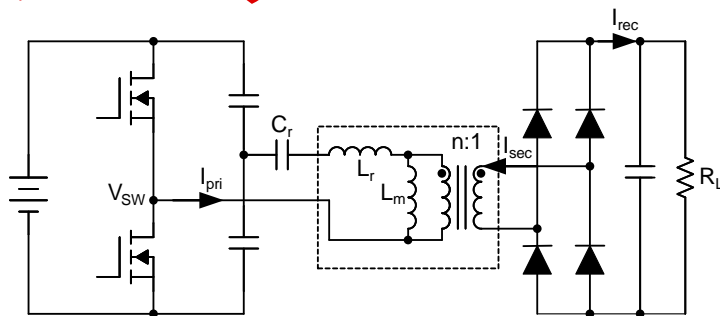
- 電圧降下を小さくするために、漏れインダクタンスの最小化が必要です。

共振コンバータ



- 電圧降下を引き起こさずに、共振タンク・インピーダンスが0になるようにチューニングすることは可能です。

LLCコンバータ

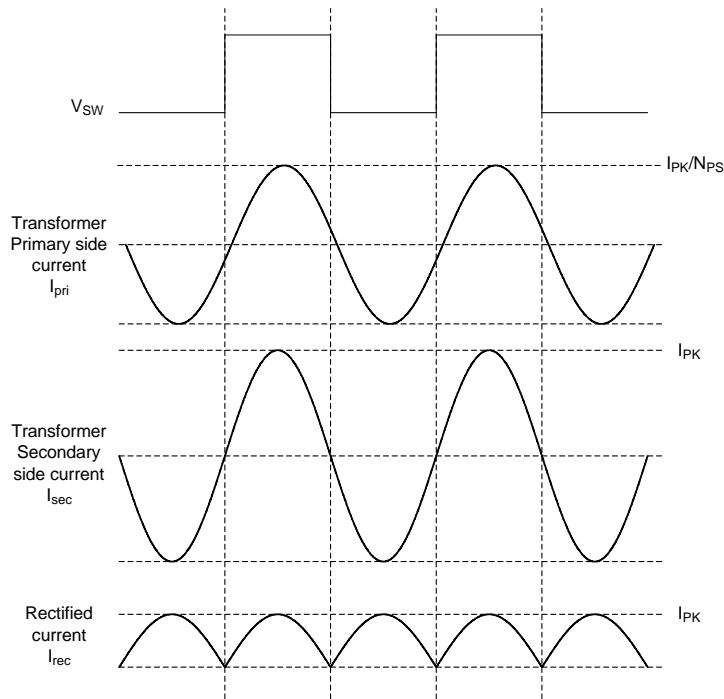
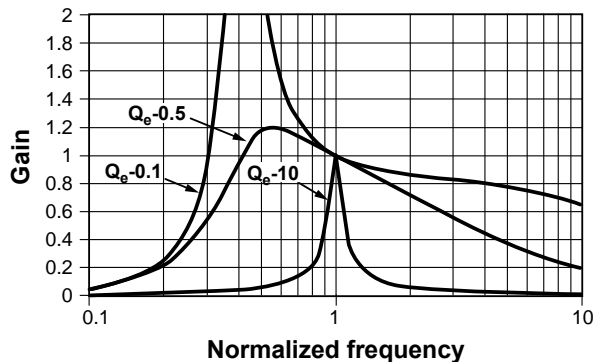


$$Gain = 2nV_O/V_{in}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

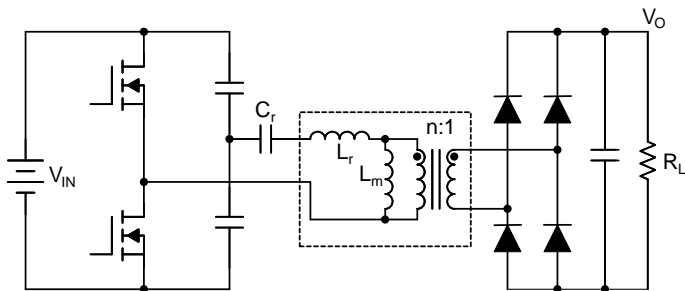
$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e}$$

$$R_e = \frac{8n^2}{\pi^2} R_L$$



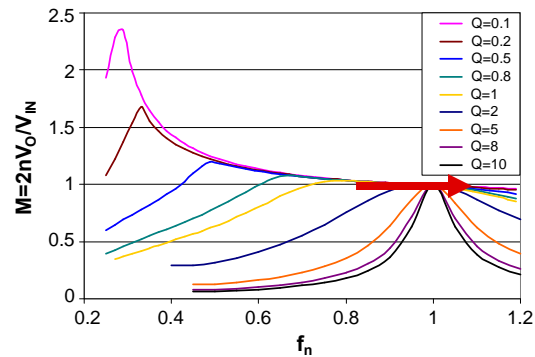
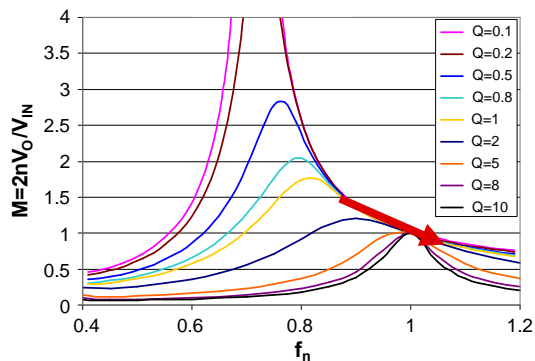
- 共振周波数で共振タンクのインピーダンスは0に等しくなります。入力と出力はトランス経由で短絡状態になります。固定周波数のオープンループ制御が可能です。
- トランスの漏れインダクタンスを共振インダクタとして使用することができます。

異なる漏れインダクタンスのLLCゲイン曲線



$$L_n = \frac{L_m}{L_r} = \frac{1}{\text{percentage leakage}}$$

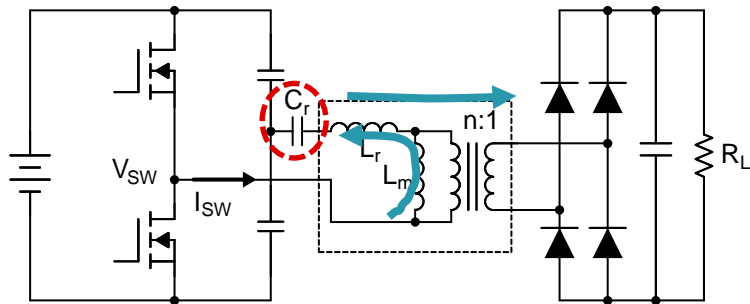
$L_n=1$



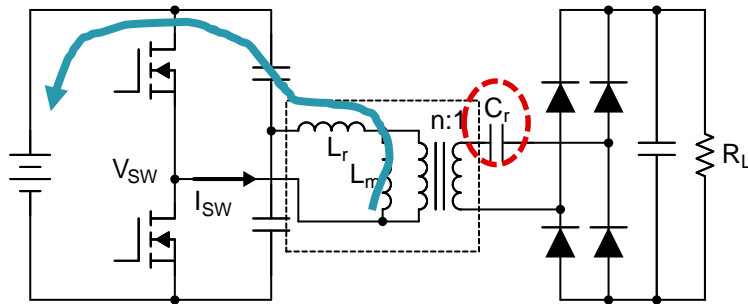
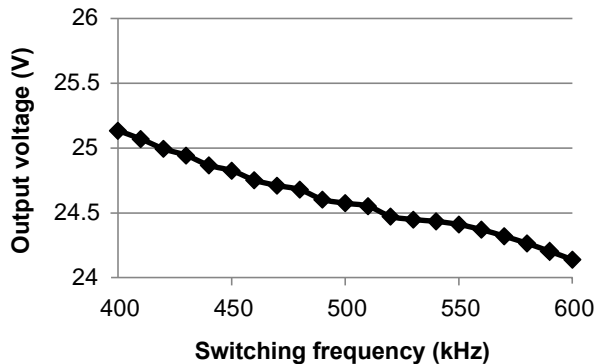
$L_n=15$

- 励磁インダクタが共振インダクタよりかなり大きい場合、共振周波数の前後でゲイン曲線は平坦になります。
- L_n がかなり大きい場合、出力電圧は周波数誤差の影響をそれほど受けなくなります。

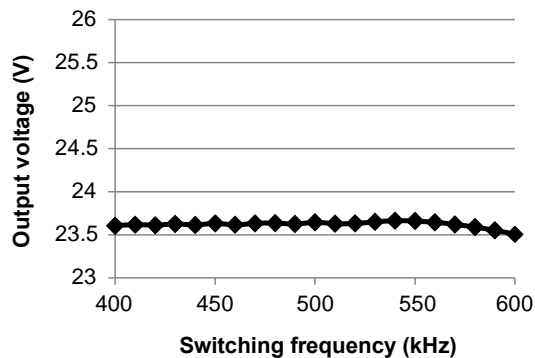
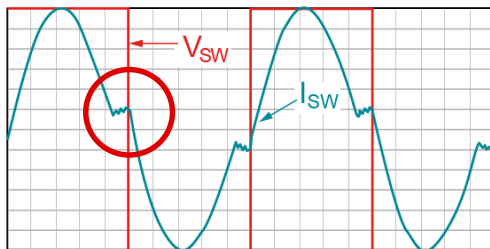
1次側共振と2次側共振の比較



1次側共振

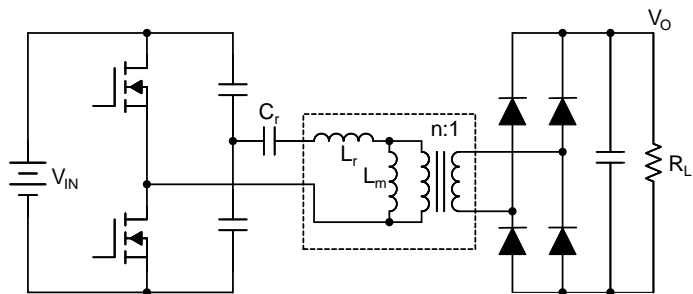


2次側共振



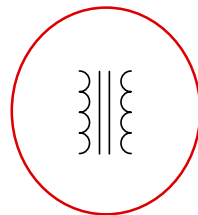
2次側共振は、スイッチング周波数誤差の影響をそれほど受けません。

LLCコンバータのバリエーション



フィルタ容量は共振容量より大幅に大きくする必要があります。

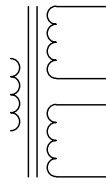
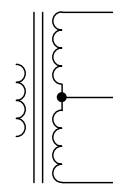
トランスの
バリエーション



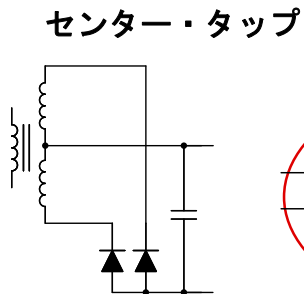
2巻線

センター・タップ

複数出力

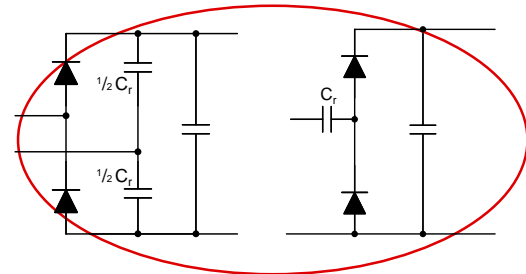


整流の
バリエーション



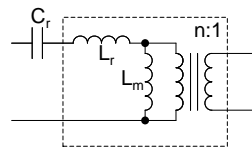
センター・タップ

電圧ダブル

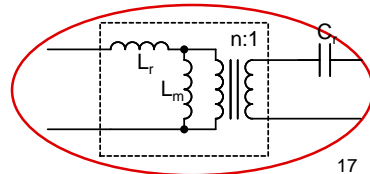


共振の
バリエーション

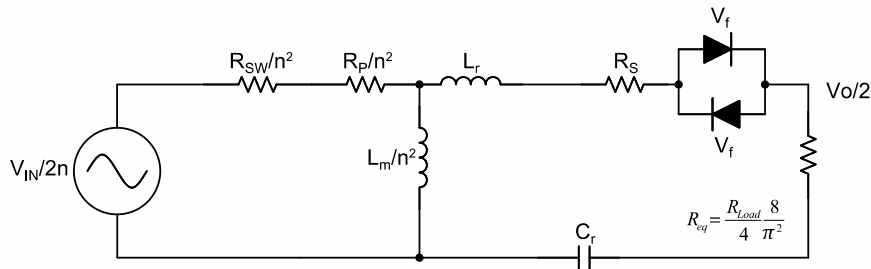
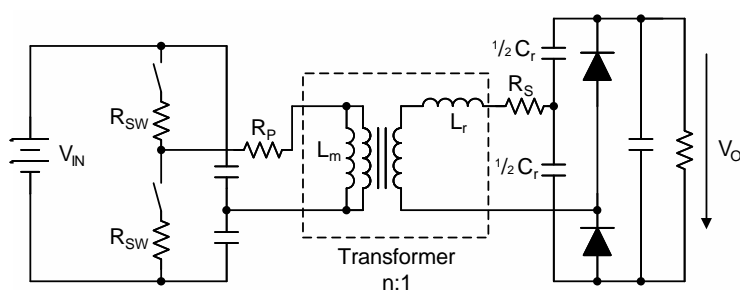
1次側共振



2次側共振



オープンループLLCの電圧レギュレーション

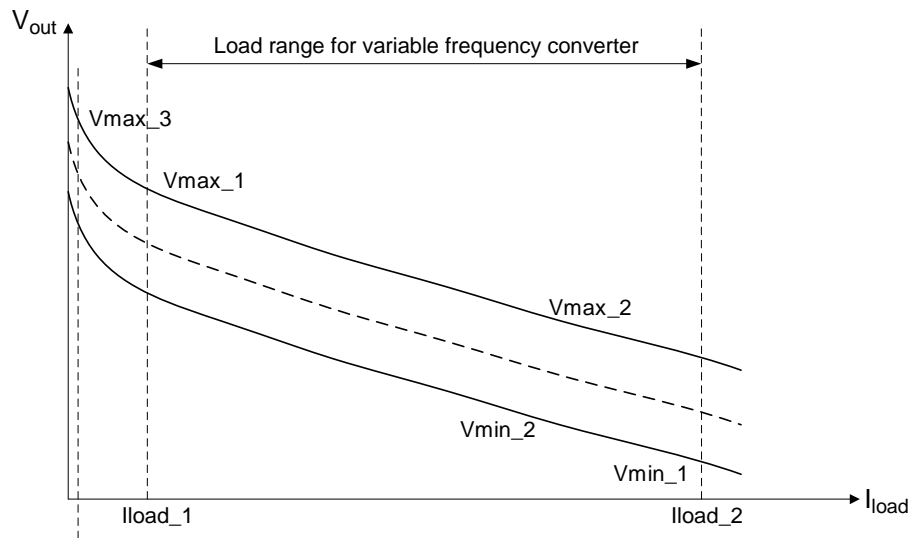


共振周波数の場合

$$v_o \approx \underbrace{\frac{v_{in}}{n}}_{\text{DC電圧}} - 2v_f - \underbrace{\frac{\pi^2}{2} \left(\frac{R_{SW}}{n^2} + \frac{R_P}{n^2} + R_S \right)}_{\text{内部抵抗}} \times I_O = \frac{v_{in}}{n} - 2v_f - \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{R_{SW}}{n^2} + R_{ac} + R_{ESR} + R_{Diode} \right) \times I_O$$

- トランスの巻線比と抵抗成分の損失、さらにダイオードの電圧降下によって、電圧レギュレーションが決まります。
- 抵抗成分の損失を小さく抑えると、ロード・レギュレーションが改善する結果になります。

電圧レギュレーションの例

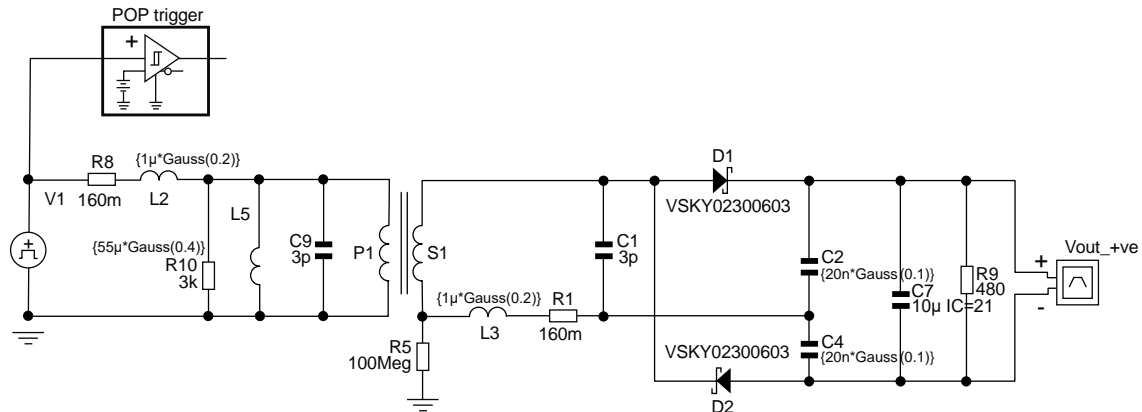


ゲート・ドライバの電力

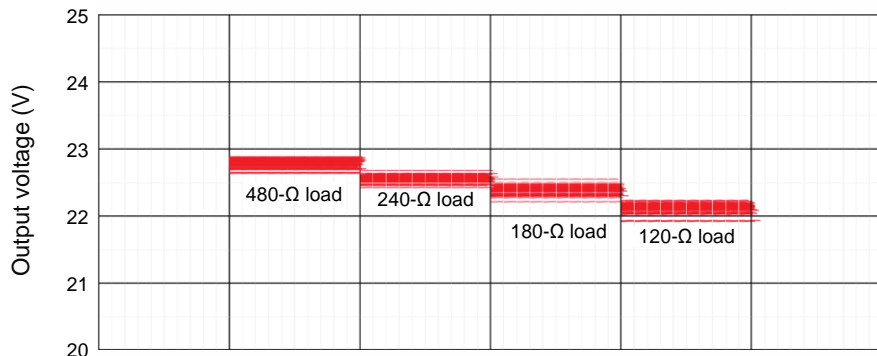
$$P_{DRV} = V_{DRV} \times Q_g \times f_{SW}$$

- 固定スイッチング周波数のインバータの場合、ゲート・ドライバ負荷は一定となります。
 - 出力電圧の変動を小さくすることができます。
- スタンバイ・モード時の負荷では電圧は上昇する傾向にあります。
 - オーバーシュートする可能性があるので、追加のツェナー・ダイオード・クランプが必要です。
 - 主にダイオードのジャンクション容量によって決まります。
- 周波数が可変するインバータの場合、ゲート・ドライバ負荷は変動します。
 - 出力電圧はさらに変動します。

各部品の精度に対する出力電圧の精度への影響



- トランスの巻線比 : 1:1
- 漏れインダクタンスは1次側と2次側の両方に同じ値で配置する
 - 精度 20%
- 励磁インダクタンスの精度 40%
- スイッチング周波数の精度 6%
- 共振容量の精度 10%



- すべての精度を考慮すると、それぞれの負荷条件において、出力電圧約22Vに対して約0.2Vの幅で変動します。
- 電圧レギュレーションにとって、ロード・レギュレーションが支配的です。

オープンループLLC 設計の流れ

スイッチング周波数 f_{SW}

入力電圧 V_{IN}

出力電圧 V_{OUT}

Volt-second rating

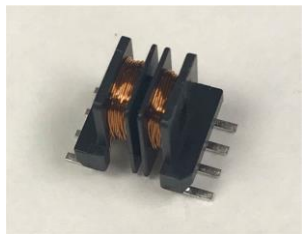
$$VS = \frac{V_{in}}{8f_{SW}}$$

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_{in}}{V_{out} + V_{headroom}}$$

負荷電流 I_{OUT}

$$I_{rmsS} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} I_{out}$$

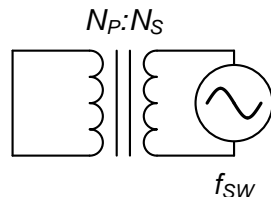
$$I_{rmsP} = \frac{I_{rmsS}}{N_P/N_S}$$



リーケージ L_K
を測定

エア・ギャップなし $L_m = \frac{t_d}{8C_{SW}f_{SW}}$

Primary side



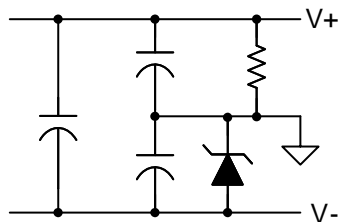
Secondary side

C_r を計算

$$f_r = 1.1f_{SW}$$

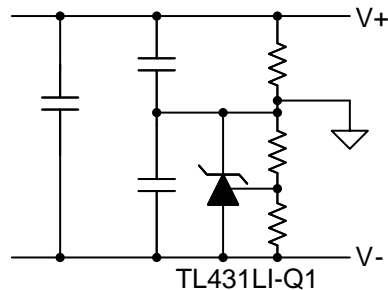
$$C_r = \frac{1}{4\pi^2 L_K f_r^2}$$

単出力を分割して複数出力を生成



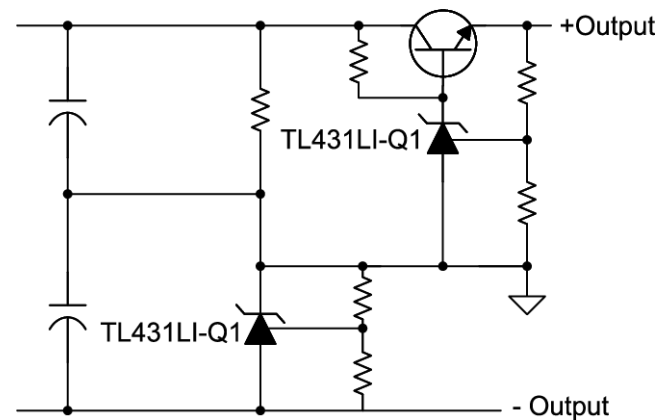
ツェナー

- 最小コスト
- レギュレーションなし



シャント・レギュレータ

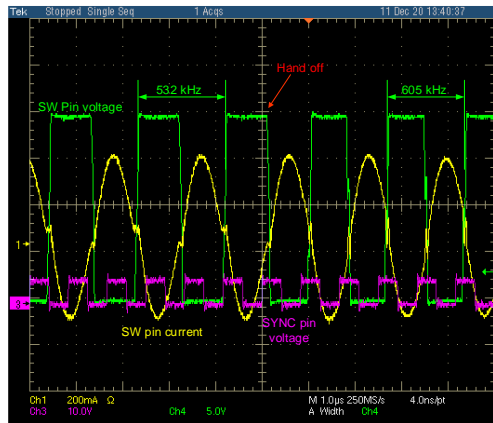
- より高いコスト
- 負出力はレギュレーションされる
- 正出力はレギュレーションされない



シャント・レギュレータと
リニア・レギュレータ

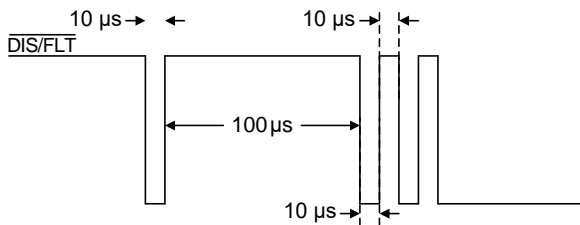
- 高コスト
- 効率が低下
- レギュレーション出力

UCC25800-Q1 オープンループLLCトランス・ドライバ



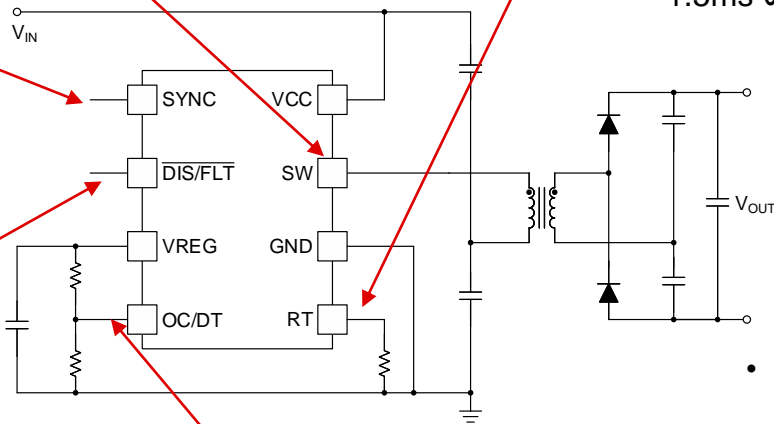
外部クロックとの同期

ディスエーブルとFault report



- ハーフブリッジFET内蔵
- 1A ピークの正弦波電流

- プログラマブル・スイッチング周波数：
 - 100kHz ~ 1MHz
 - 端子オープン時は 1.2MHz
 - 1.5ms のソフト・スタート



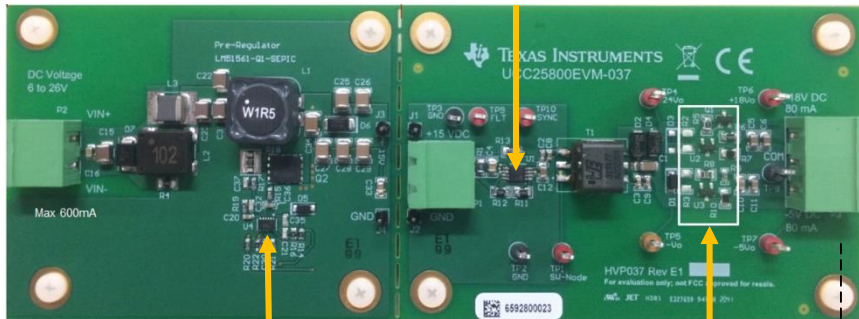
- プログラマブルな過電流保護 (過負荷と短絡の保護)
- デッドタイムの自動調整機能、最大デッドタイムの設定可変

- 追加の保護機能：
 - 入力 OVP
 - 加熱保護
 - 端子オープンショート

オープンループLLC絶縁型バイアス電源の測定

プリレギュレータLM5156を搭載した UCC25800 EVM

UCC25800-Q1

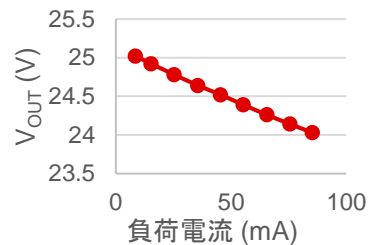


LM5156-Q1

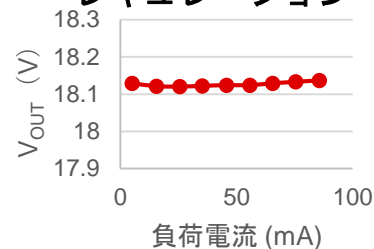
1% ロード・レギュレーション用の
オプション部品

パラメータ	仕様
入力電圧範囲	6 V ~ 26 V
出力電圧と電流	+18V、-5V、0 ~ 85mA
スイッチング周波数	2.2MHz と 500kHz
絶縁	Yes: 2,500V _{AC} (1 秒)
トポロジ	SEPIC + オープンループ LLC トランス・ドライバ

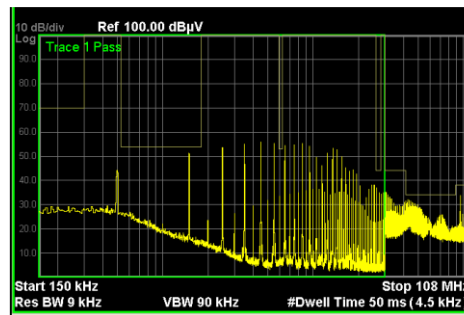
ロード・レギュレーション



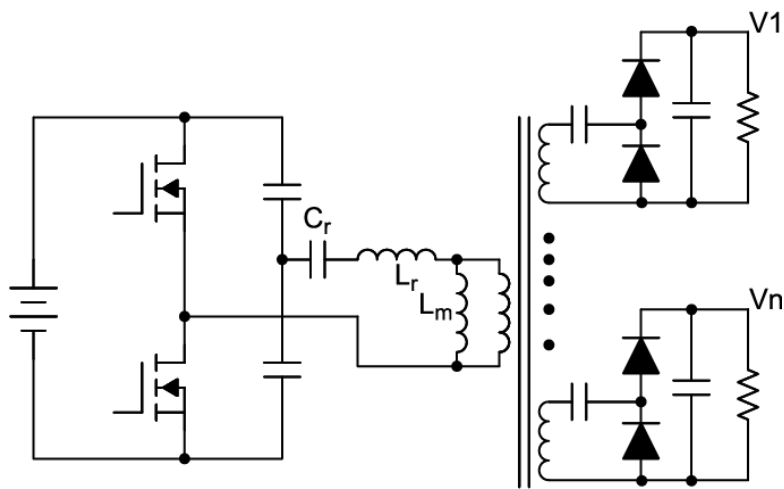
1%のロード・レギュレーション



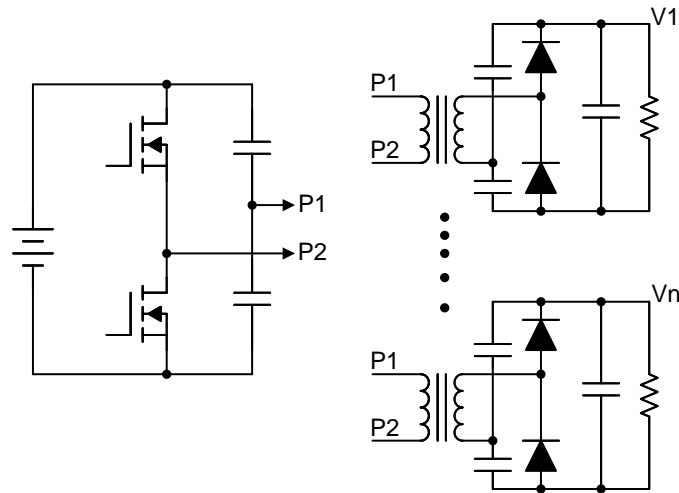
CISPR 25 Class 5 EMI規格
を上回る特性



複数出力

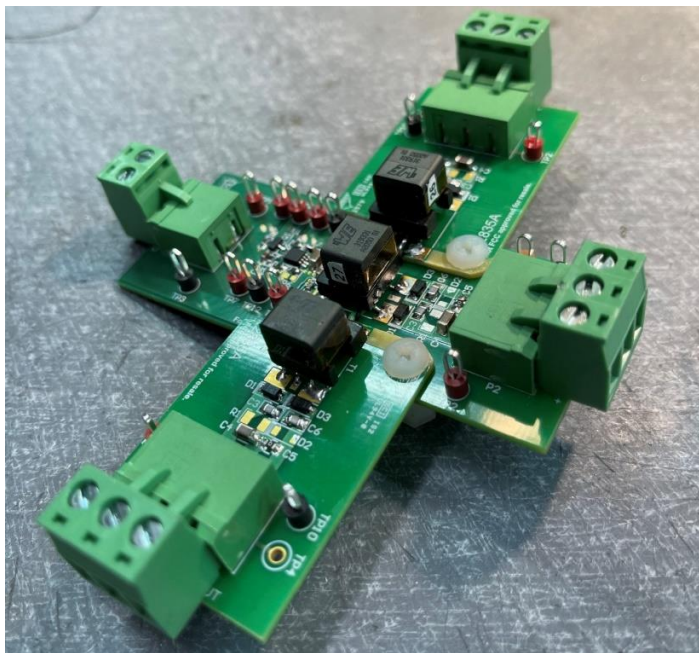


- 複数の2次側巻線を持つ1個のトランスを駆動します。
- 1次側共振を使用します。
- 複数の出力の間でノイズ結合が発生します。

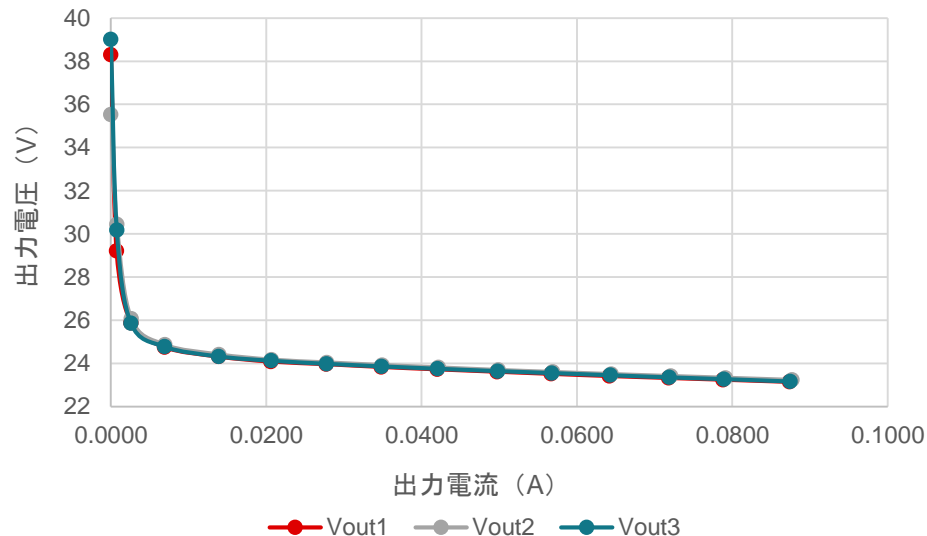


- 複数の2巻線トランスを駆動します。
- 2側共振を使用します。
- 複数の出力の間でのノイズ結合は最小です。

例：複数のトランスを駆動

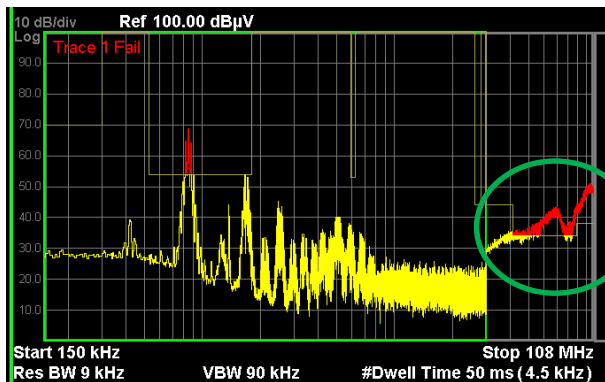


均一な負荷を使用する場合のコンバータの電圧レギュレーション、 $V_{IN}=25V$

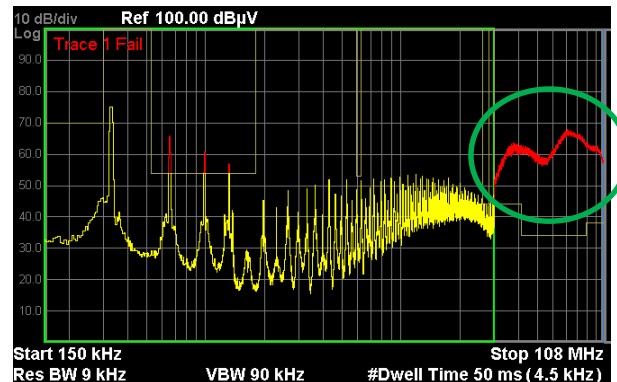


- 単一の1次側パワーステージが、3個のトランスと2次側回路を駆動します。
- 同等の3つの出力電圧を生成します。

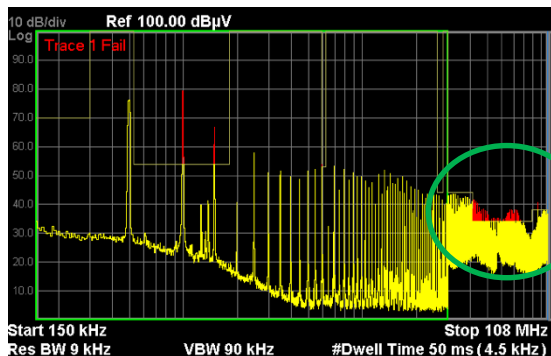
EMIノイズ特性の比較



5V プッシュプル



24V フライバック

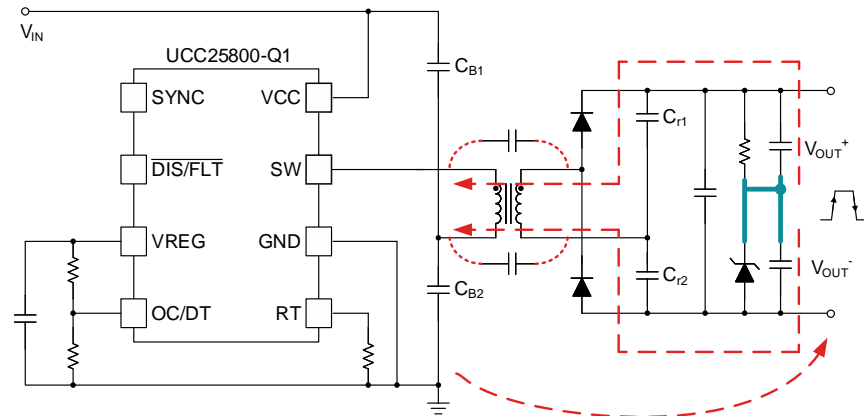
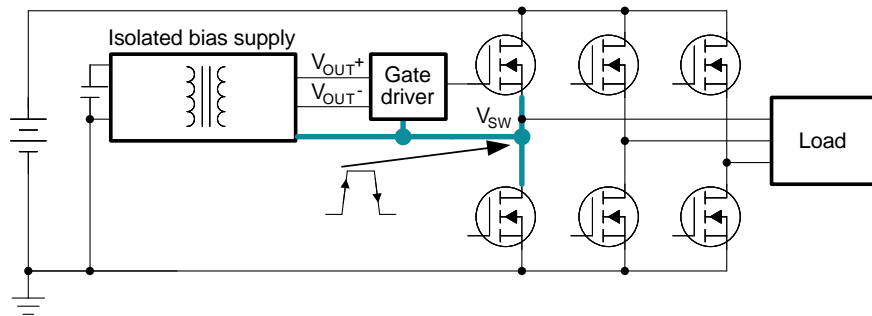


24V LLC

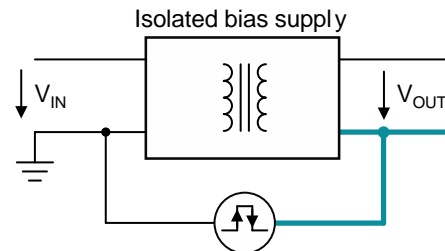
LLCでは、高周波
EMIノイズがかなり
小さくなっています。

*EMIフィルタの追加なし

CMTIの検討事項

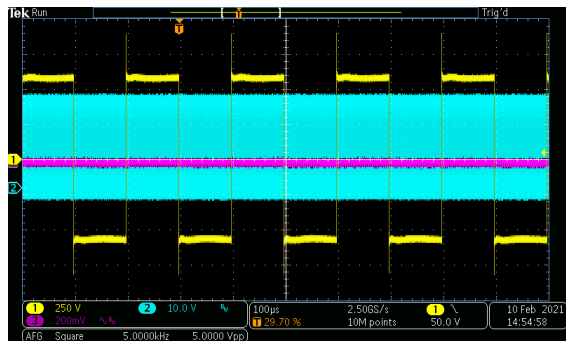


- dv/dt は $50V/ns$ を超える可能性があります。
- バイアス電源の入カグランドと出力グランドの間に単電圧パルスを印加して検証します。

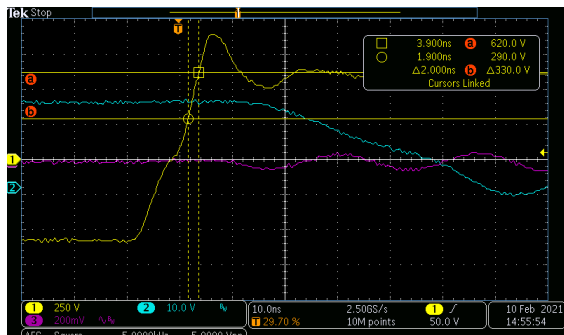


ストライク電圧

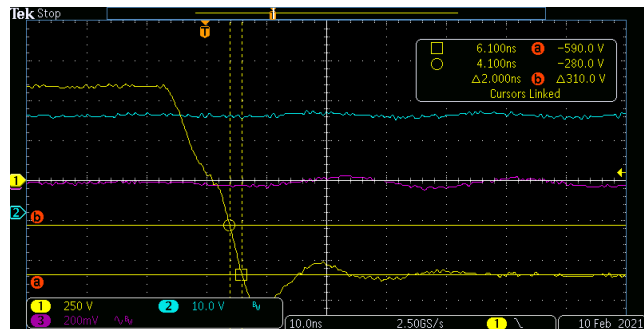
CMTI特性



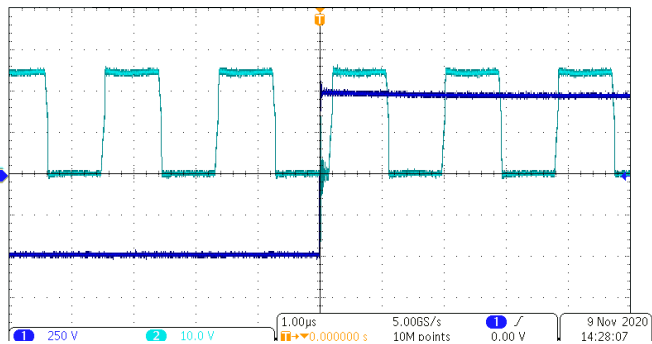
165V/ns



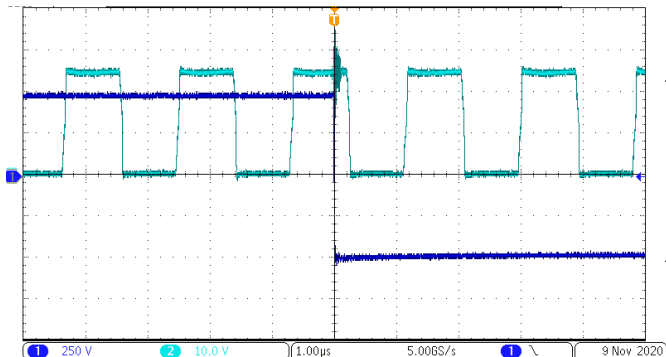
155V/ns



スイッチ・ノード



ストライク電圧

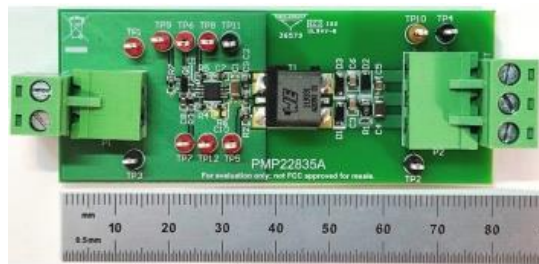


スイッチ・ノード

ストライク電圧

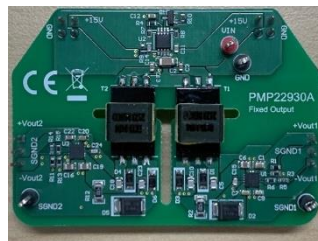
150 V/nsを上回るCMTIは動作に影響を及ぼしません。

利用可能な各種リファレンス・デザイン



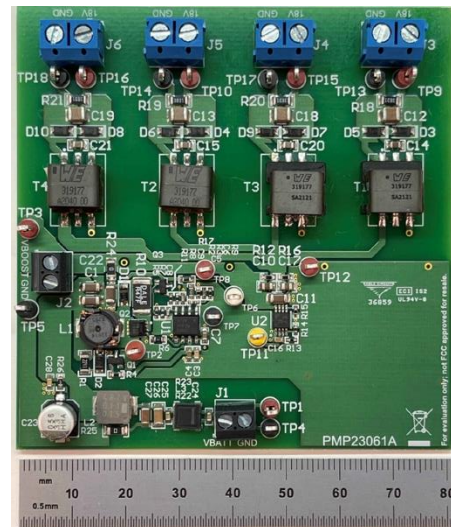
PMP22835

24V入力、18Vと-5Vの出力、6W、
1MHzのスイッチング周波数



PMP22930

15V入力、15Vと-4Vの出力、
2.6W、600kHzの
スイッチング周波数



PMP23061

6V ~ 28Vの入力、昇圧
プリレギュレータ搭載、その後段に
1個のLLCを配置、3個の1W 18V出力、
1個の3W 18V出力、
500kHzのスイッチング周波数

まとめ

- インバータの絶縁型ゲート・ドライバに電力を供給するには、絶縁型バイアス電源が必要です。
 - オープンループ制御は信頼できるソリューションを実現し、ノイズの影響をそれほど受けません。
- LLCトポロジは漏れインダクタンスの大きいトランスを使用して、トランスの1次側と2次側の間にある寄生容量を最小化することができます。
 - EMIノイズの低減
- オープンループLLCコンバータは、シンプルで信頼できるソリューションを実現します。
 - EMIの低減
 - 高CMTI
 - 良好な電圧レギュレーション
 - 複数出力可



©2022 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

The 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)