



スマート・ゲート・ドライブについて

Nicholas Oborny

ABSTRACT

モータ・システム設計におけるゲート・ドライバは、おもに電気モータに電流を駆動する外部パワー MOSFET の制御を目的とした集積回路 (IC) です。ゲート・ドライバは、ロジックレベル制御入力とパワー MOSFET の間に位置する中間段として機能します。ゲート・ドライバには、幅広い外部 MOSFET を選択でき、さまざまな外部システム条件に対応できる堅牢性と柔軟性が求められます。

テキサス・インスツルメンツのスマート・ゲート・ドライブは、外部パワー MOSFET を駆動および保護するインテリジェントなソリューションを提供します。この機能を利用することでシステム設計者は MOSFET のスルーレートの調整、スイッチングおよび EMI 性能の最適化、部品表 (BOM) 点数の削減、デッドタイムの自動生成、外部パワー MOSFET とモータ・システムの追加保護を実現できます。

本書では、パワー MOSFET の制御を支える理論と手法、TI のスマート・ゲート・ドライブにおける IDRIVE および TDRIVE 機能の実装方法、システムレベルの多くの利点の詳細について説明します。

目次

1	パワー MOSFET の理論と動作.....	3
1.1	基礎.....	3
1.2	パラメータ.....	4
1.3	ターンオン動作.....	6
1.4	簡単なスルーレート計算.....	6
1.5	ゲート駆動電流.....	7
2	スマート・ゲート・ドライバのパラメータ: IDRIVE と TDRIVE	8
2.1	IDRIVE の実装.....	8
2.2	TDRIVE の実装.....	10
3	システムの利点.....	14
3.1	スルーレート制御.....	14
3.2	BOM の削減.....	17
3.3	システム保護.....	18
3.4	EMI の最適化.....	18

List of Figures

1	MOSFET モデル.....	3
2	MOSFET 回路モデル.....	4
3	MOSFET のゲート電荷量曲線.....	5
4	MOSFET のターンオン応答.....	6
5	MOSFET のスルーレートの測定値.....	7
6	スイッチ IDRIVE 方式.....	8
7	各種 IDRIVE 設定.....	9
8	電流源 IDRIVE 方式.....	9
9	クロス・コンダクションの例.....	10
10	デッドタイムの例.....	11
11	V _{GS} モニタの例.....	11

12	TDRIVE の例.....	12
13	dV/dt の例	13
14	TDRIVE のプルダウン.....	14
15	全 IDRIVE 設定にわたる V_{DS} の重ね書きプロット.....	15
16	IDRIVE 30mA 設定.....	15
17	IDRIVE 60mA 設定.....	15
18	10mA IDRIVE.....	16
19	20mA IDRIVE.....	16
20	30mA IDRIVE.....	16
21	40mA IDRIVE.....	16
22	50mA IDRIVE.....	16
23	60mA IDRIVE.....	16
24	70mA IDRIVE.....	17
25	一般的なゲート・ドライバ構成.....	17
26	250/500mA のスイッチ・ノード波形	19
27	250/500mA のスイッチ・ノード波形	19
28	10/20mA のスイッチ・ノード波形	19
29	10/20mA の EMI スキャン	21
30	20/40mA の EMI スキャン	21
31	50/100mA の EMI スキャン	21
32	200/400mA の EMI スキャン	22
33	250/500mA の EMI スキャン.....	22

List of Tables

1	MOSFET のデータシート・パラメータ (CSD18532Q5B)	4
2	IDRIVE とスルーレートの関係	16
3	EMI スキャン結果	19

商標

All trademarks are the property of their respective owners.

1 パワー MOSFET の理論と動作

1.1 基礎

金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は、今日の電子回路設計で使用される最も一般的なトランジスタです。MOSFET は、幅広いアプリケーションに役立つ多くの特性を備えています。これらの特性には、優れた拡張性、小さいターンオン電流、高いスイッチング速度、高いオフ状態インピーダンスが含まれます。MOSFET は IC 設計 (アナログおよびデジタル)、スイッチング電源アプリケーション、モータ制御、負荷スイッチ、その他の数多くの設計に使用されてきました。

図 1 に示すように、MOSFET はドレイン (D)、ソース (S)、ゲート (G)、ボディ (B) という 4 つの端子で構成されます。多くの場合、ボディ端子がソース端子に短絡し、3 端子デバイスとなっています。

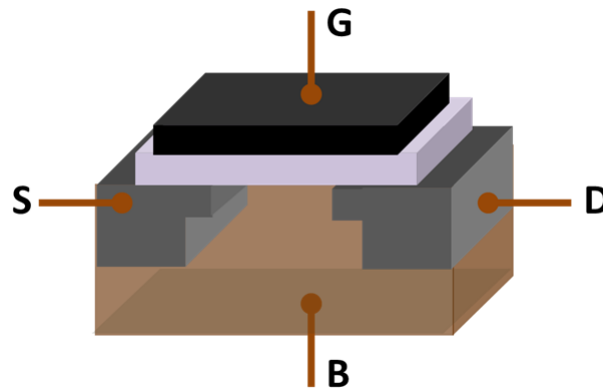


図 1. MOSFET モデル

MOSFET には、少数の簡単な式で定義できる 3 つの基本動作領域があります。これらの領域とそれぞれに対応する式を以下に示します。

- 遮断

$$V_{GS} \leq V_{th}$$

ここで

- V_{GS} = MOSFET のゲート・ソース端子間電圧
 - V_{th} = MOSFET のスレッショルド電圧
- (1)

- 線形

$$V_{GS} > V_{th}, V_{DS} \leq V_{GS} - V_{th}$$

ここで

- V_{DS} = MOSFET のドレイン・ソース端子間電圧
- (2)

- 飽和

$$V_{GS} > V_{th}, V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$$
(3)

遮断領域では、MOSFET はオフになり、ドレイン・ソース間は導通しません。線形領域では、MOSFET はオンになり、ソース電圧とドレイン電圧の両方に対して、ゲート電圧で制御される抵抗と同じように振る舞います。飽和領域では、MOSFET はオンになり、ドレイン電圧とゲート・ソース間電圧で制御される電流源と同じように振る舞います。

1.2 パラメータ

図 2 に、端子間容量とゲート抵抗に注目した一般的な MOSFET モデルを示します。

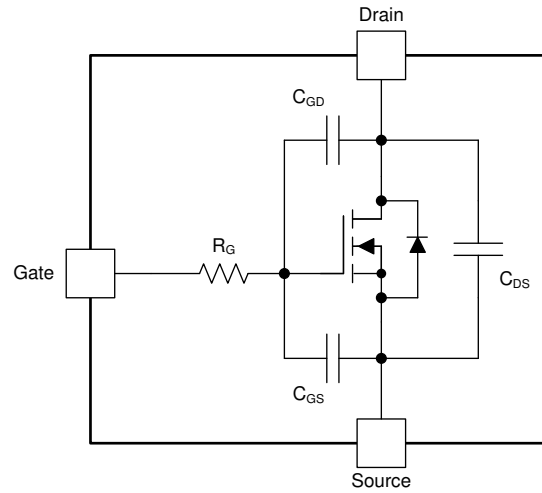


図 2. MOSFET 回路モデル

C_{GS} 容量はほぼ一定ですが、 C_{GD} および C_{DS} 容量はゲート・ドレイン間電圧、ドレイン・ソース間電圧、印加周波数によって大きく変化します。表 1 に、パワー MOSFET の一般的なデータシート・パラメータを示します。これらの値を見直すことで、これらの値が MOSFET のスイッチング性能に与える影響を把握できます。

表 1. MOSFET のデータシート・パラメータ (CSD18532Q5B)

パラメータ	テスト条件	最小	標準	最大	単位
ダイナミック特性					
C_{ISS} 入力容量	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 30V, f = 1MHz$		3900	5070	pF
C_{OSS} 出力容量			470	611	pF
C_{RSS} 帰還容量			13	17	pF
R_G 直列ゲート抵抗			1.2	2.4	Ω
Q_g 総ゲート電荷量(10V)	$V_{DS} = 30V, I_D = 25A$		44	58	nC
Q_{gd} ゲート・ドレイン間のゲート電荷量			6.9		nC
Q_{gs} ゲート・ソース間のゲート電荷量			10		nC
$Q_{g(th)}$ V_{th} でのゲート電荷量			6.3		nC
Q_{oss} 出力電荷量	$V_{DS} = 30V, V_{GS} = 0V$		52		nC
$t_{d(on)}$ ターンオン遅延時間	$V_{DS} = 30V, V_{GS} = 10V, I_{DS} = 25A, R_G = 0\Omega$		5.8		ns
t_r 立ち上がり時間			7.2		ns
$t_{d(off)}$ ターンオフ遅延時間			22		ns
t_f 立ち下がり時間			3.1		ns

コンデンサと抵抗の定義は以下のとおりです。

C_{ISS} —ドレインとソースを短絡状態にして、ゲート・ソース端子間で測定した入力容量値 ($C_{ISS} = C_{GS} + C_{GD}$)。

C_{OSS} —ゲートとソースを短絡状態にして、ドレイン・ソース端子間で測定した出力容量値 ($C_{OSS} = C_{DS} + C_{GD}$)。

C_{RSS} —ソースを接地し、ドレイン・ゲート端子間で測定した帰還容量値 ($C_{RSS} = C_{GD}$)。

R_G — ゲート端子の直列抵抗。

電圧に対する容量値の変化を考慮に入れるため、より重要な情報としてゲート電荷量曲線が通常は使用されます。ゲート電荷量の値は、端子間容量に蓄積される電荷量に関係します。ゲート電荷量は、スイッチング過渡中の電圧に対する容量値の変化が考慮されているため、システム設計者にとってより有用です。

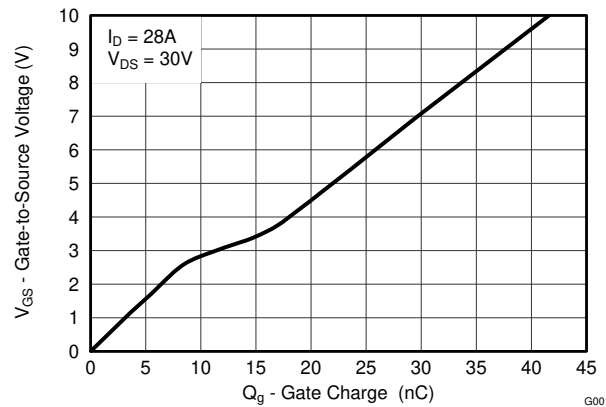


図 3. MOSFET のゲート電荷量曲線

ゲート電荷量のパラメータは以下のように定義されます。

- Q_G** — ゲート・ソース間電圧を特定の値 (よく使用される電圧は 4.5V と 10V) まで上げるのに必要な総ゲート電荷量。
- $Q_{G(th)}$** — 0V から MOSFET のスレッショルド電圧に達するまでに必要な電荷量。スレッショルド電圧に達すると、ドレインからソースへ電流が流れ始めます。
- Q_{GS}** — 0V からミラー・プラトー電圧に達するまでに必要な電荷量。プラトー電圧に達すると、ドレイン・ソース間電圧は下降し始めます。
- Q_{GD}** — ミラー領域を通過するために必要な電荷量。ミラー領域という名称は、この期間中、帰還容量が充電されるため、ゲート・ソース間電圧が比較的一定に保たれることに由来します。この期間中、MOSFET がオン状態になるにつれて、MOSFET の V_{DS} は下降します。

1.3 ターンオン動作

1.2 に示した内容に基づくと、ゲートを特定の電圧にバイアスするには所定の電荷量が必要です。これらのパラメータを使用すると、特定の電圧と電流を印加した場合の MOSFET の挙動が明確になります。図 4 に、MOSFET の一般的なターンオン応答を示します。

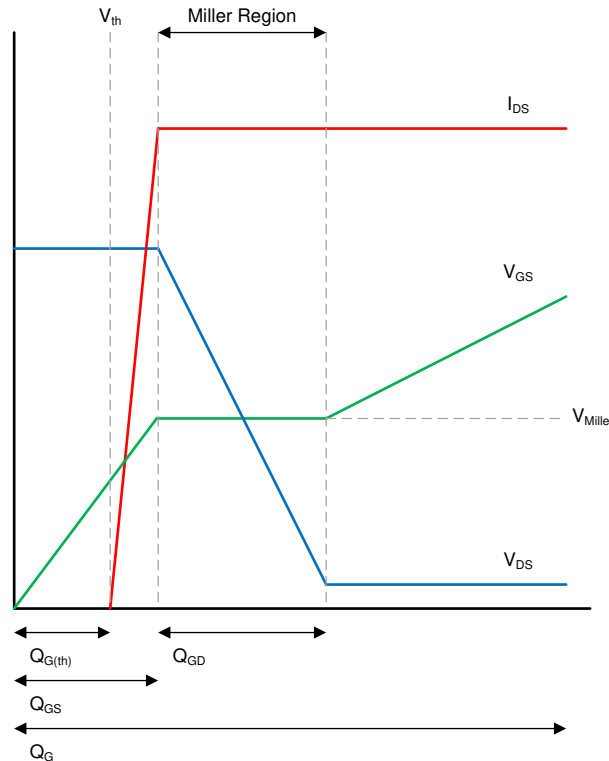


図 4. MOSFET のターンオン応答

この曲線は、ゲートへの電荷供給に伴うゲート・ソース間電圧の上昇から始まります。ゲート・ソース間電圧が MOSFET のスレッショルド電圧に達すると、電流がドレインからソースに流れ始めます。その後、MOSFET はミラー領域を通過するため、ゲート・ソース間電圧はほぼ一定に保たれます。ミラー領域の間、ドレイン・ソース間電圧は下降します。ミラー領域を抜けた後、最終的な駆動電圧に達するまでゲートは充電され続けます。

1.4 簡単なスルーレート計算

残念ながら、パラメータと式から MOSFET の V_{DS} の正確なスルーレートを計算するには、MOSFET に関する特定の知識、基板とパッケージの寄生素子、ゲート駆動回路に関する詳細な情報が必要です。このような計算は、本書で扱う範囲を超えています。本書では、ラボ・データと比較した簡単な第 1 次近似計算のみを取り上げます。

ミラー領域中、MOSFET の V_{DS} は下降するため、ミラー電荷量 (Q_{GD}) とゲート駆動能力を使用してスルーレートを概算できます。最初に必要な仮定は、MOSFET のゲートを駆動するために理想的またはほぼ理想的な定電流源を使用するということです。

1.4.1 例

図 5 に、DRV8701 スマート・ゲート・ドライバが 24V で CSD18532Q5B を駆動する波形を示します。DRV8701 は、25mA のソース電流に設定されています。この波形が示すスルーレート約 312ns は、式 4 を使用して計算した第 1 次近似値とよく一致します。

$$t_{\text{SLEW}} = \frac{Q_{\text{GD}}}{I_{\text{SOURCE}}}$$

$$t_{\text{SLEW}} = \frac{6.9 \text{ nC}}{25 \text{ mA}} = 276 \text{ ns}$$

ここで

- $Q_{\text{GD}} = 6.9\text{nC}$
- $I_{\text{SOURCE}} = 25\text{mA}$

(4)

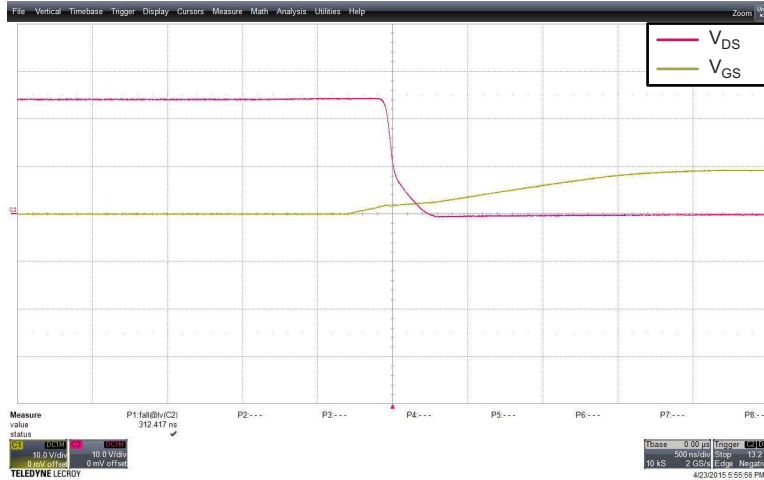


図 5. MOSFET のスルーレートの測定値

1.5 ゲート駆動電流

モータ・ドライバなどのスイッチング・パワー MOSFET システムを設計する場合、2 つの重要な電流パラメータを調べる必要があります。それはピーク・ゲート駆動電流と平均ゲート駆動電流です。

1.5.1 ピーク・ゲート駆動電流

ピーク・ゲート駆動電流とは、ターンオンおよびターンオフ期間中にゲート・ドライバがパワー MOSFET のゲートにソースまたはシンクできるピーク電流です。おもにこの値によって、MOSFET のスルーレートの大きさが決まります。

1.5.1.1 例

DRV8701 は、150mA のピーク・ソース電流と 300mA のピーク・シンク電流に対応しています。1.4.1 の例を用いて、立ち上がり時間と立ち下がり時間をそれぞれ式 5、式 6 により計算できます。

$$t_{\text{RISE}} = \frac{Q_{\text{GD}}}{I_{\text{SOURCE}}}$$

$$t_{\text{RISE}} = \frac{6.9 \text{ nC}}{150 \text{ mA}} = 46 \text{ ns}$$

ここで

- $Q_{\text{GD}} = 6.9\text{nC}$
- $I_{\text{SOURCE}} = 150\text{mA}$

(5)

$$t_{\text{FALL}} = \frac{Q_{\text{GD}}}{I_{\text{Sink}}}$$

$$t_{\text{FALL}} = \frac{6.9 \text{ nC}}{300 \text{ mA}} = 23 \text{ ns}$$

ここで

- $Q_{\text{GD}} = 6.9 \text{ nC}$
- $I_{\text{SINK}} = 300 \text{ mA}$

(6)

1.5.2 平均ゲート駆動電流

平均ゲート駆動電流とは、パワー MOSFET を周期的にスイッチングする場合にゲート・ドライバが必要とする平均電流です。前述のとおり、パワー MOSFET をスイッチするための電荷量は少ない (44nC) もの、kHz レンジで MOSFET をスイッチングした場合、この電荷は平均化され、ゲート・ドライバ電源からの一定の電流となります。

式 7 を用いて、平均ゲート駆動電流を計算します。

$$I_{\text{AVG}} = Q_{\text{G}} \times \text{スイッチングする MOSFET の数} \times \text{スイッチング周波数} \quad (7)$$

1.5.2.1 例

$$I_{\text{AVG}} = 44 \text{ nC} \times 6 \times 45 \text{ kHz} = 11.88 \text{ mA} \quad (8)$$

2 スマート・ゲート・ドライバのパラメータ: IDRIVE と TDRIVE

2.1 IDRIVE の実装

前セクションで述べたように、MOSFET のゲートに印加する電流を精密に制御することで、MOSFET の V_{DS} スルーレートを適切に計算および調整できます。この特長は電力段設計において有益です。いくつかのシステムレベルの利点について 3 でさらに詳しく説明します。

テキサス・インスツルメンツのスマート・ゲート・ドライバは、その多くの製品に、MOSFET のスルーレートを簡単に制御するため、調整可能なゲート駆動電流機構を組み込んでいます。この調整可能なゲート駆動電流パラメータを IDRIVE と呼びます。このセクションでは、IDRIVE の一般的な設定および実装方法について説明します。

図 6 に、もっとも一般的な実装方法を示します。この方法では、ゲートと電源電圧の間に MOSFET プリドライバ・スイッチを使用することで、外部パワー MOSFET のゲートに向かう電流を制御しています。

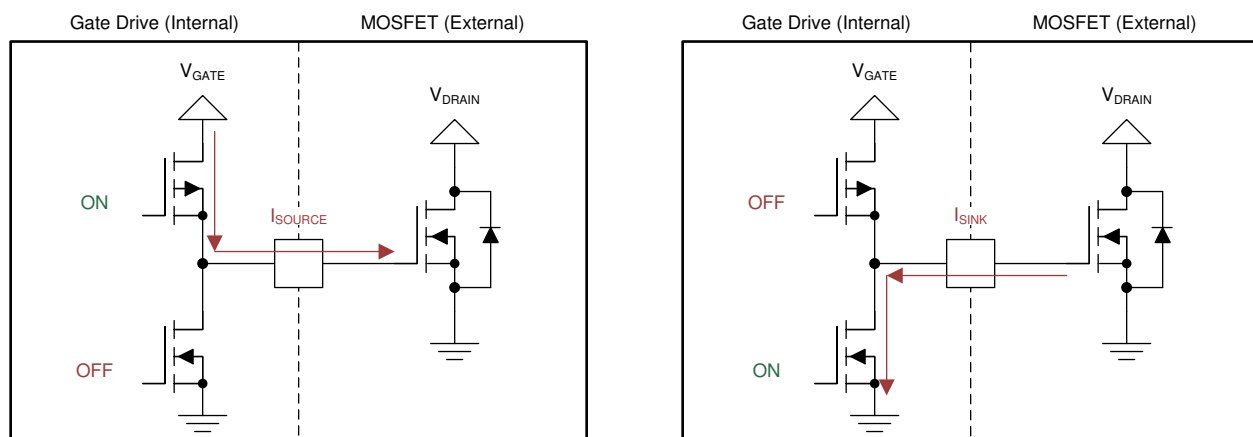


図 6. スイッチ IDRIVE 方式

V_{DS} 下降時の外部 MOSFET のゲートへの電流を制御するため、スマート・ゲート・ドライバは MOSFET の各種特性を活用しています。スイッチ (プリドライバ MOSFET) が飽和領域 (1.1) で動作できる場合、外部 MOSFET への電流は固定値に制限されます。外部 MOSFET がミラー領域を通過するとき、ゲート・ソース間電圧は頭打ちになり、比較的一定に保たれます (1.3)。

これらの 2 つの特性を利用することで、ミラー充電期間中、スマート・ゲート・ドライバは確実に、プリドライバ・スイッチのゲートに適切なバイアス電圧を印加し、スイッチを飽和領域に維持できます。外部 MOSFET のゲートは短絡しているように見えるため (容量に AC 電圧を印加するため)、ソースまたはシンク電流はスイッチの飽和電流に制限されます。

複数のスイッチを使用することで (図 7 を参照)、スマート・ゲート・ドライバは通常動作中に異なる電流レベルに設定変更をすることができます。

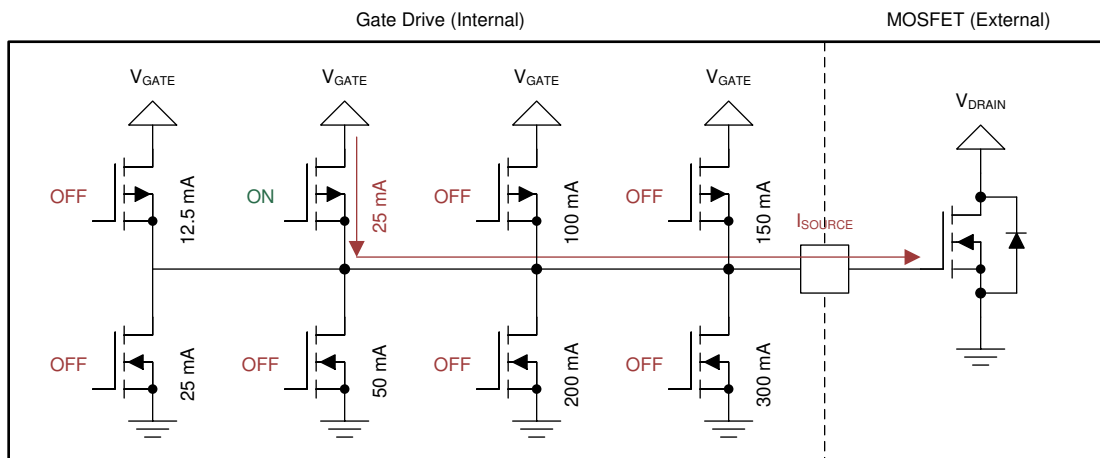


図 7. 各種 IDRIVE 設定

IDRIVE 機能を実装する第 2 の方法では、スイッチの代わりに電流源を使用します。この実装方法は、外部 MOSFET の V_{DS} スルーレートをデバイス、電圧、温度全体にわたってきわめて精密かつ確実に制御する必要があるアプリケーションに使用されます。単純な電流源として機能するように飽和領域のスイッチを適切なサイズに調整することも可能ですが、前述の要因による変動は残ります。この変動を解消するため、スイッチの代わりに電流源を使用します (図 8 を参照)。このアーキテクチャは、EMI に敏感なアプリケーションまたは特定のスルーレートでのシステム性能に左右されるアプリケーションで特に重要です。

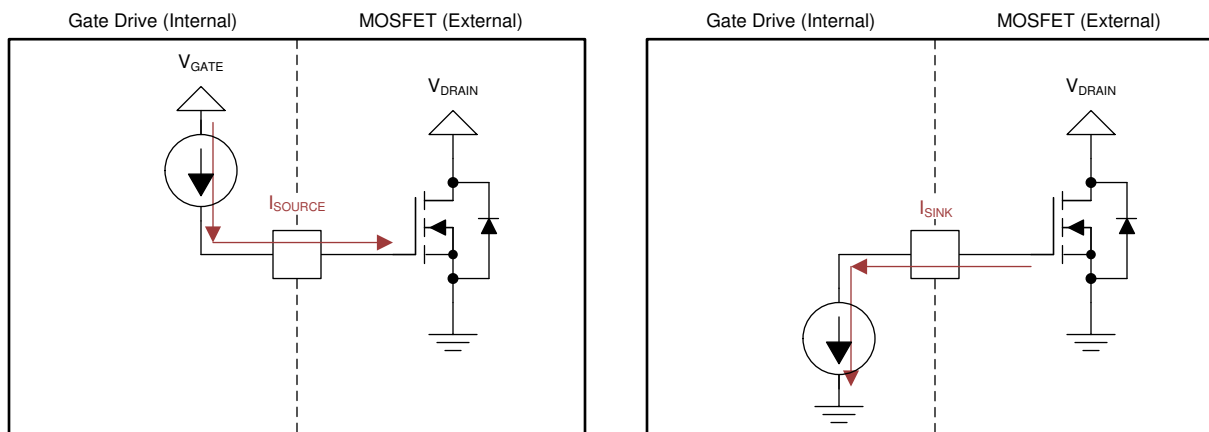


図 8. 電流源 IDRIVE 方式

スイッチ方式 (図 7) と同様に、複数の電流源を使用してゲート駆動レベルを調整することもできます。

2.2 TDRIVE の実装

TI のスマート・ゲート・ドライバは、IDRIVE のスルーレート制御に加えて TDRIVE 機能も実装しています。TDRIVE は、ハイサイド・スイッチングとローサイド・スイッチングの間のデッドタイムを最適化し、 dV/dt ターンオンに対して保護し、MOSFET のゲートへの過剰な電流を監視する内部ゲート駆動ステート・マシンで構成されます。このステート・マシンを使用すると、外付け部品を最小限に抑えながら、堅牢で保護された高効率のモータ・ドライブ・システムを設計できます。

このセクションでは、TDRIVE ステート・マシンの各種構成要素と、その実装方法について述べます。

2.2.1 MOSFET ハンドシェーク

IDRIVE ステート・マシンは、外部 MOSFET をローサイドからハイサイド (またはその反対) に切り換える際の内部ハンドシェーク機能を内蔵しています。このハンドシェーク機能は、外部 MOSFET にクロス・コンダクション (貫通とも呼ぶ) 期間が生じないように設計されています。

クロス・コンダクション (図 9 を参照) は、ハイサイド MOSFET とローサイド MOSFET の両方が同時にオンになると発生します。電源とグラウンドの間に低インピーダンスの経路が形成されるためです。この経路が大電流を流し、外部 MOSFET または電源に損傷を与える可能性があります。

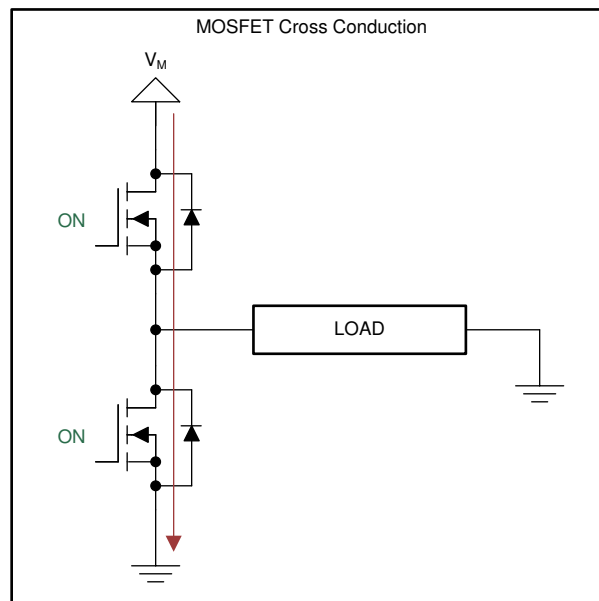


図 9. クロス・コンダクションの例

クロス・コンダクション (貫通) は、ローサイドからハイサイド (またはその反対) へのスイッチング時にもっともよく発生します。入力信号が受信されてから外部 MOSFET がオフになるまでに、MOSFET の内部伝搬遅延時間とスルーレートに関連して遅延が生じます。この遅延期間が経過する前に反対側の MOSFET がオンになると、クロス・コンダクションが発生する可能性があります。この問題を回避する簡単な方法は、反対側の MOSFET がオンになる前にタイミング期間を追加することです (図 10 を参照)。この期間をデッドタイムと呼びます。デッドタイムが長いと、ダイオードの導通損失に起因してモータ・ドライバの効率が低下します。

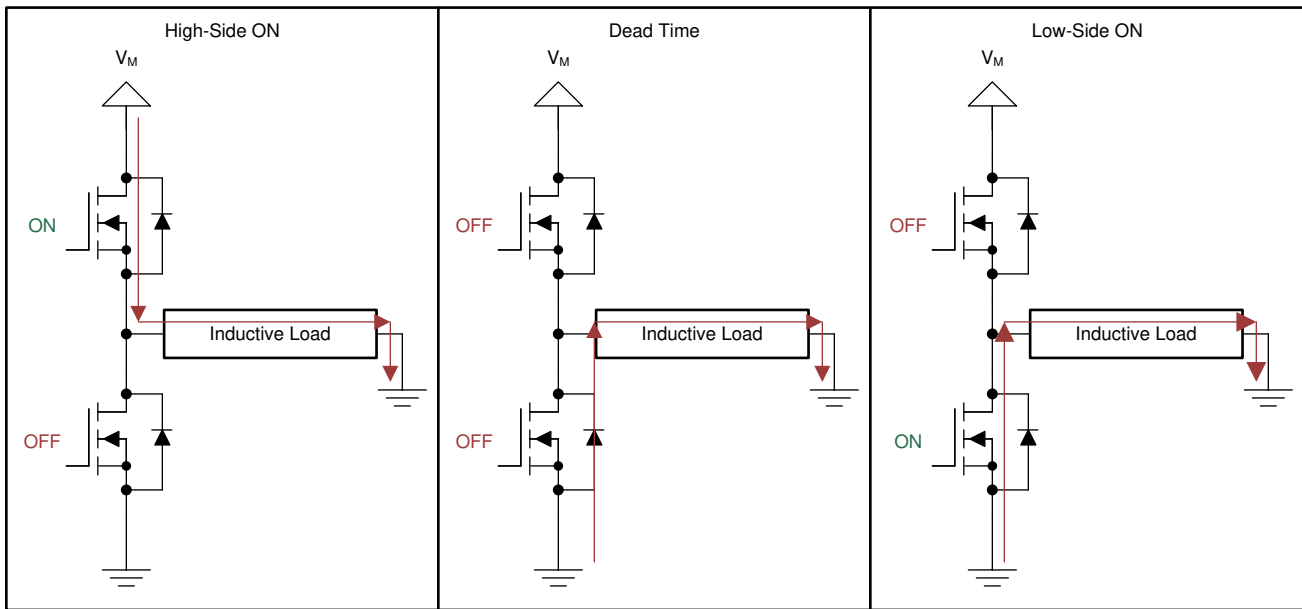


図 10. デッドタイムの例

内部ハンドシェイク機能は、外部 MOSFET の V_{GS} モニタ (図 11) を使用して、一方の MOSFET をオフにしてから他方の MOSFET をオンにできるタイミングを決定します。このハンドシェイク機能により、システムはクロス・コンダクションのリスクを伴わずに、最適化されたデッドタイムをシステムに挿入できます。

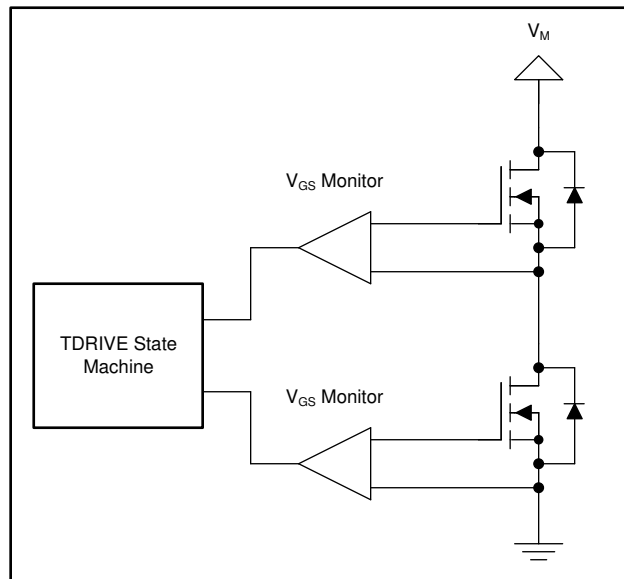


図 11. V_{GS} モニタの例

2.2.2 ゲート駆動タイマ

$TDRIVE$ ゲート駆動タイマを使用すると、MOSFET のゲートの短絡や MOSFET の V_{GS} クランプの不測のターンオンといった異常事態に際して、スマート・ゲート・ドライバと MOSFET のゲートに流れる大きなピーク電流を一定期間に確実に制限できます。この概念を以下に説明します (図 12 を参照)。

1. スマート・ゲート・ドライバが、MOSFET のゲートをオンにするコマンドを受信します。
2. すると強力な電流源が外部 MOSFET のゲートに印加されて、ゲート電圧が上昇し始めます。
3. t_{DRIVE} 期間を過ぎてもゲート電圧が上昇していない場合 (MOSFET のゲート短絡またはゲートの過電流状態を示す)、スマート・ゲート・ドライバはゲート駆動フォルト信号を発行し、ゲート駆動を停止し、外部 MOSFET とゲート・ドライバを保護します。
4. ゲート駆動フォルトが発生していない場合、 T_{DRIVE} 期間を過ぎると、スマート・ゲート・ドライバは適切なゲート電圧を維持するために小さな電流源をオンにし、内部消費電流を低減させます。

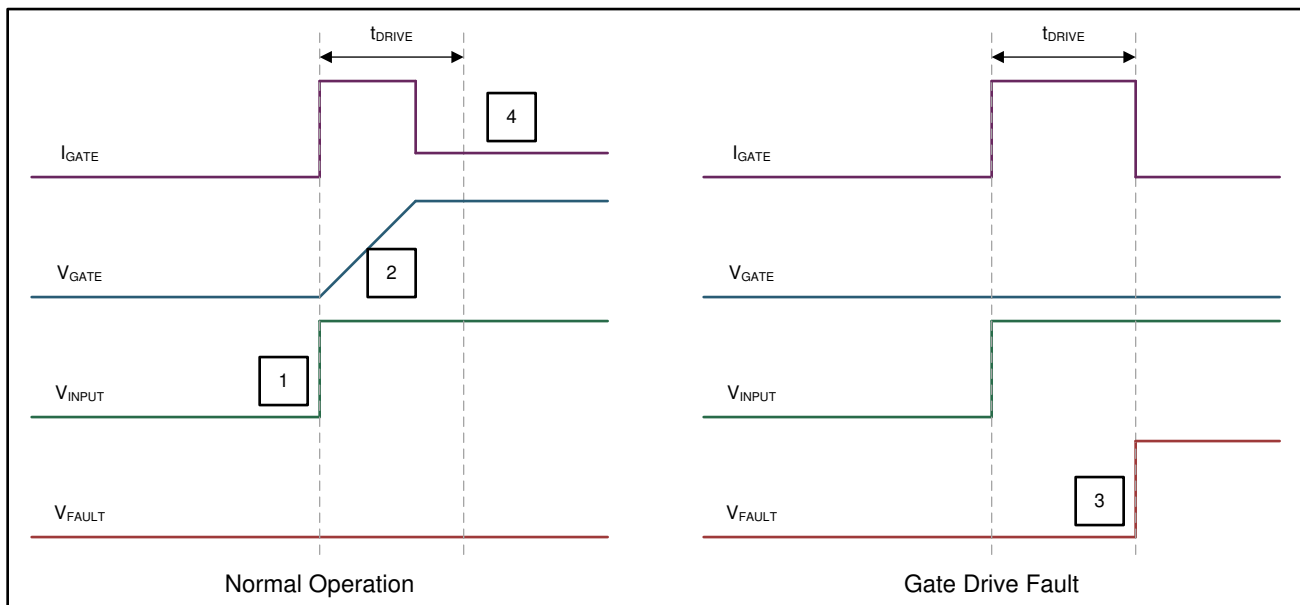


図 12. $TDRIVE$ の例

2.2.3 強いゲート・プルダウン

内部 *TDRIVE* ステート・マシンは、クロス・コンダクションおよびゲート過電流保護機能に加えて、*dV/dt* ターンオンを防止する機構も備えています。

dV/dt ターンオンは、ハイサイド MOSFET を急速にオンさせると生じる可能性があるシステム上の問題です。スイッチ・ノードをローからハイに急速に変化させると (図 13)、その変化が、寄生ゲート・ドレイン間容量 (C_{GD}) を経由してローサイド MOSFET のゲートに結合する可能性があります。この結合によってローサイド MOSFET のゲート・ソース間電圧が上昇し、その電圧がローサイド MOSFET の閾値電圧 (V_{th}) を上回るとローサイド MOSFET がオンする可能性があります。ハイサイド MOSFET がオンしている間にローサイド MOSFET がオンすると、クロス・コンダクションが発生します。

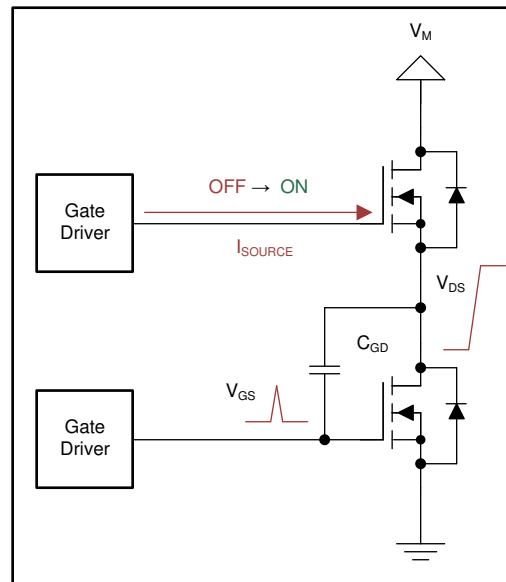


図 13. *dV/dt* の例

この状況を回避するため、スマート・ゲート・ドライバの *TDRIVE* ステート・マシンは、ハイサイド MOSFET をオンに遷移させている間、ローサイド MOSFET の強いゲート・プルダウンを有効にします (図 14)。このプルダウンは、ローサイド MOSFET のゲートに結合する電荷を逃がすための経路として機能します。

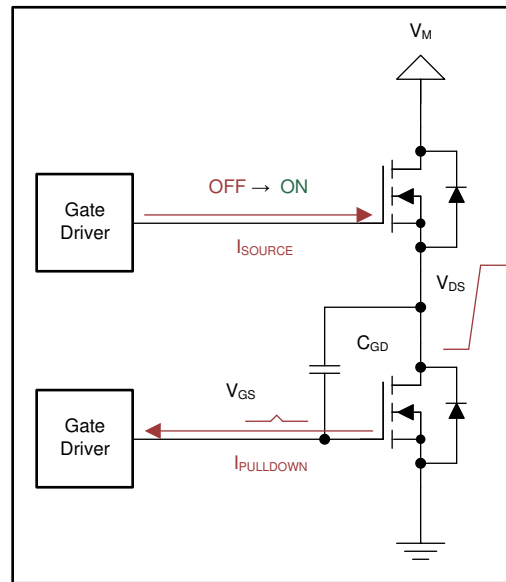


図 14. TDRIVE のプルダウン

3 システムの利点

スマート・ゲート・ドライバの IDRIVE および TDRIVE 機能により、効率性、柔軟性、堅牢性に優れたモータ・ゲート・ドライバ・ソリューションが実現できます。このセクションでは、これらの機能がもたらすシステムレベルの重要な利点について特に重点的に説明します。

3.1 スルーレート制御

IDRIVE 機能を使用すると、外部部品をシステムに追加することもシステムから除去することもしないで、いつでも V_{DS} スルーレートを調整できます。この機能を使用するとシステム設計者は、効率、放射妨害波性能、ダイオードの逆回復誘導スパイク、 dV/dt ターンオンを考慮して MOSFET のスイッチング性能を微調整できます。

図 15 の重ね描きプロットは、TI のスマート・ゲート・ドライバの IDRIVE 設定の調整が V_{DS} スルーレートにもたらす効果を示しています。MOSFET の V_{DS} は 24V から 0V へと変化しており、IDRIVE を 7 レベル (10mA、20mA、30mA、40mA、50mA、60mA、70mA) のゲート・ソース電流にわたって調整するにしたがって、スルーレートは低下します。

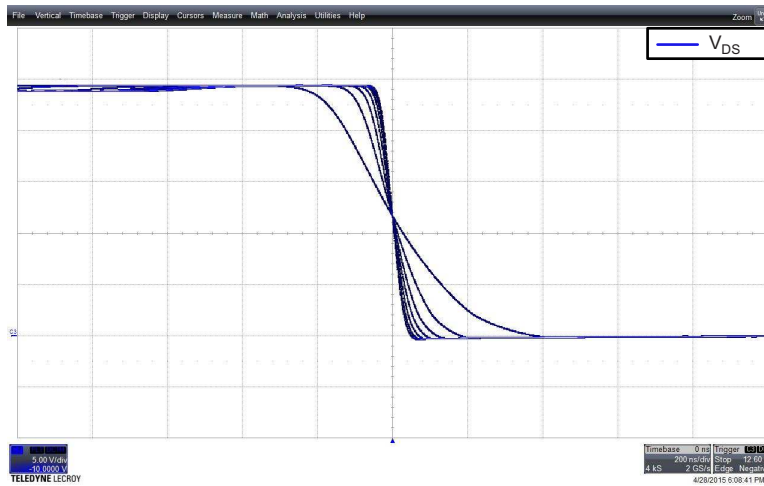


図 15. 全 IDRIVE 設定にわたる V_{DS} の重ね書きプロット

下図に、MOSFET をオンにする際の MOSFET のその他の信号を示します。 V_{DS} が変化する際の、スマート・ゲート・ドライバから供給される電流と外部 MOSFET のミラー領域の関係が明確に示されています。

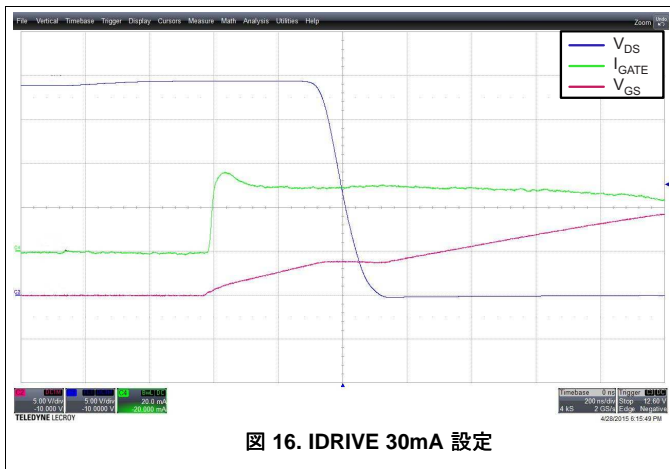


図 16. IDRIVE 30mA 設定



図 17. IDRIVE 60mA 設定

1.4 で述べたように、ほぼ理想的な電流源と正確な MOSFET Q_{GD} パラメータを利用すれば、 V_{DS} スルーレートを近似計算できます。式 9 に、各種 IDRIVE 設定に対する V_{DS} スルーレートの計算値と測定値の比較を示します。これらの計算では、直列ゲート抵抗とその他の非理想性の影響は最小限であると仮定しています。

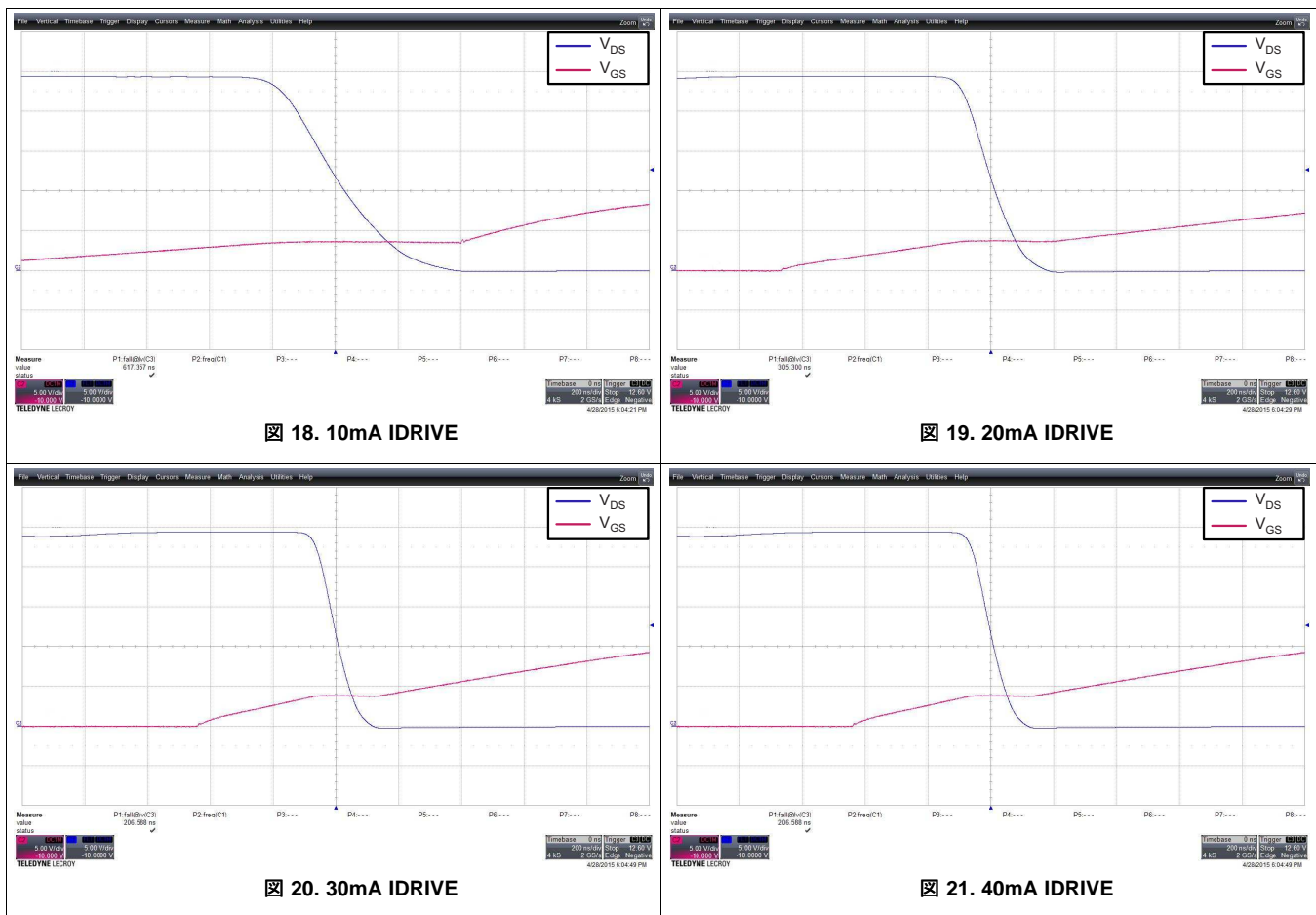
$$t_{SLEW} = Q_{GD} / I_{SOURCE} \tag{9}$$

表 2. IDRIVE とスルーレートの関係

MOSFET の Q_{GD} 標準値 (nC)	IDRIVE 設定 (mA)	スルーレート計算値 (ns)	スルーレート測定値 (ns)	近似誤差 (%)
8	10	800	617	23
8	20	400	305	24
8	30	267	206	23
8	40	200	158	21
8	50	160	128	20
8	60	133	109	18
8	70	114	97	15

理想計算では若干の誤差があるものの、これらの値を使用することでシステム設計者は近似スルーレートで設計を行い、試作段階でシステムを微調整できます。MOSFET の Q_{GD} の精度は、計算精度に大きく影響します。

以下の画面プロットは、表 2 に示す測定に関するものです。



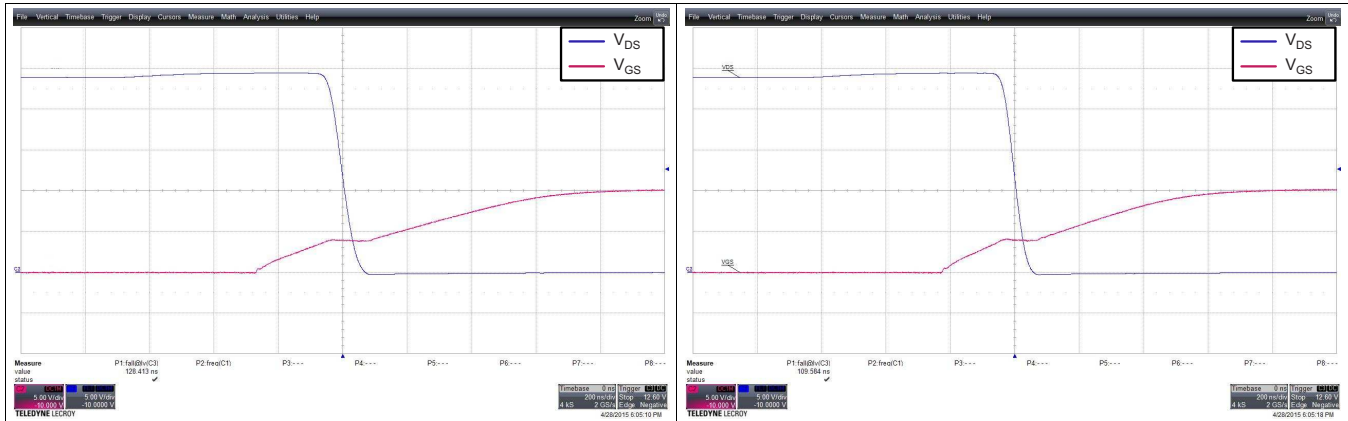


図 22. 50mA IDRIVE

図 23. 60mA IDRIVE

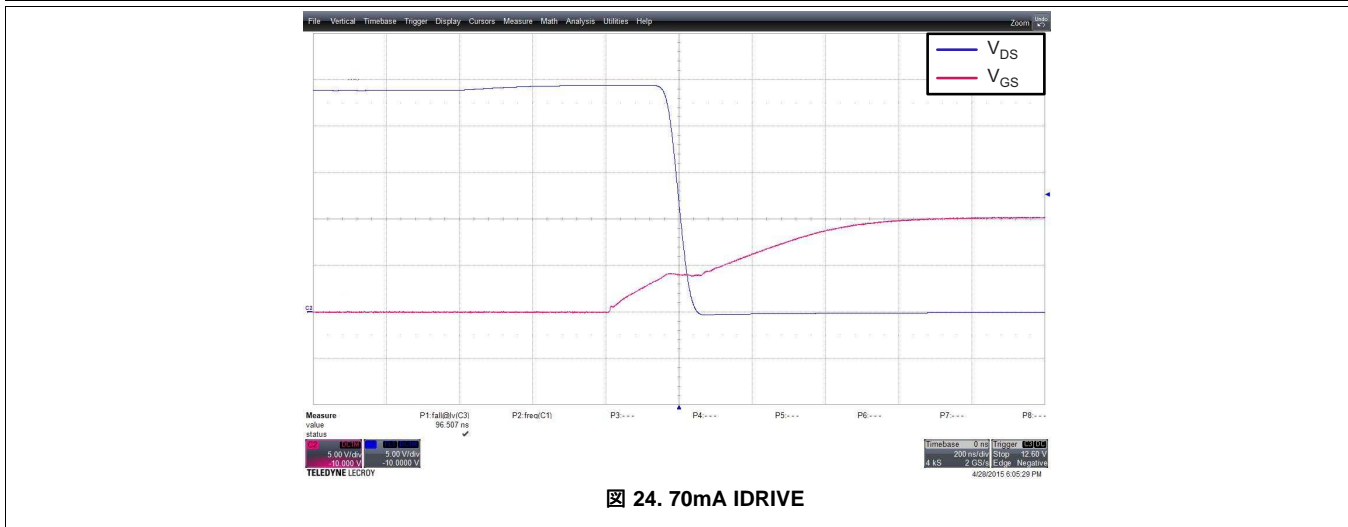


図 24. 70mA IDRIVE

3.2 BOM の削減

スマート・ゲート・ドライバを使用すると、システムの柔軟性を高めるだけでなく、システムの BOM (部品点数) と必要な基板面積を削減することもできます。図 25 に、パワー MOSFET を駆動するための一般的な構成を示します。

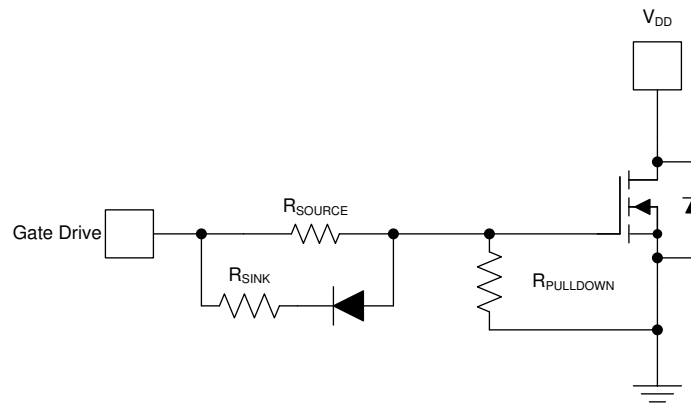


図 25. 一般的なゲート・ドライバ構成

R_{SOURCE} および R_{SINK} 抵抗を使用して、ゲート・ドライバと MOSFET ゲートの間のインピーダンスを手動で調整します。ダイオードを使用することで、立ち上がりと立ち下りの V_{DS} スルーレートを個別に調整できます。 $R_{PULLDOWN}$ 抵抗により、ゲート・ドライバがアクティブでない場合でも MOSFET を確実にオフに維持できます。

スマート・ゲート・ドライバの IDrive および TDrive 機能により、3 相ハーフブリッジ設計のスルーレート制御とゲート・プルダウンのための最大 24 の受動部品が不要になります。

3.3 システム保護

最後に、TDrive ステート・マシンは外部パワー MOSFET をインテリジェントに駆動することで追加のシステム保護を実現します。

3.3.1 スイッチングの保護とデッドタイムの最適化

2.2 で述べたように、MOSFET の V_{GS} 電圧を監視することで、スマート・ゲート・ドライバはスイッチング MOSFET システムに最適な長さのデッドタイムを挿入できます。 V_{GS} モニタにより、ハーフブリッジの指定された MOSFET をオンにする前に、反対側の MOSFET を確実にオフにできます。

この手法は、クロス・コンダクション (貫通) の発生を防止するだけでなくダイオード導通期間も短縮できるため、システム性能面でも有利です。MOSFET の内部ボディ・ダイオードの導通損失は通常、一般的な MOSFET の導通損失よりも大きく、システム全体の効率を低下させるためです。

3.3.2 dV/dt ターンオンの防止

TDrive ステート・マシンには、外部ハーフブリッジのクロス・コンダクションを引き起こす可能性がある dV/dt ターンオンを防止する働きがあります。スマート・ゲート・ドライバは、ハイサイドの V_{DS} を上昇させる際にローサイド MOSFET の強いプルダウンを有効にすることで、ローサイド MOSFET のゲート・ドレイン間の寄生容量 (C_{GD}) を介して結合する寄生電荷を逃がす低インピーダンス経路を設けることができます。この低インピーダンス経路によって、ローサイド MOSFET のゲート・ソース間電圧の上昇を防止できます。ゲート・ソース間電圧が上昇すると、オフにしているはずの MOSFET がオンになる可能性があります。

TDrive ステート・マシンは、スイッチング期間が終わると強いプルダウンを無効にし、外部ローサイド MOSFET のゲート・ドレイン間が短絡したとしてもスマート・ゲート・ドライバまたはシステムが容易には損傷しないように、弱いプルダウンに変更します。大電流期間を制限することで、スマート・ゲート・ドライバは自分自身の損傷を防ぐと同時に、システムに対するさらなる損傷を制限できます。

3.3.3 MOSFET ゲート・フォルト検出

スマート・ゲート・ドライバは、IDrive によりスルーレートを柔軟に調整できるだけでなく、TDrive ステート・マシンによって外部 MOSFET のゲートのフォルト条件を検出できます。

スマート・ゲート・ドライバは、外部パワー MOSFET への電圧を監視し電流を管理することで、MOSFET のゲートに異常事象 (部分的な短絡、完全な短絡) が発生したことを検出および通知できます。2.2 に、詳細を示します。

3.4 EMI の最適化

電磁干渉 (EMI) のおもな要因のひとつは、パワー MOSFET のスイッチングで生じる高周波ノイズです。電力段により生成される矩形電圧波形は、グラウンドと電源電圧間のクリーンな振幅信号が理想ですが、ほとんどの場合そうなりません。MOSFET のパッケージと PCB レイアウトの寄生素子が、スイッチング出力にリングングを生じさせるアンダーシュートおよびオーバーシュート電圧の原因となる可能性があります。この寄生リングングは、1MHz よりはるかに高い周波数で (しばしば、ノイズの影響を受けやすい周波数帯で直接) 発生する可能性があります。また、MOSFET のスイッチングの基本エッジレートが、高い周波数帯域のノイズに変換される可能性もあります。

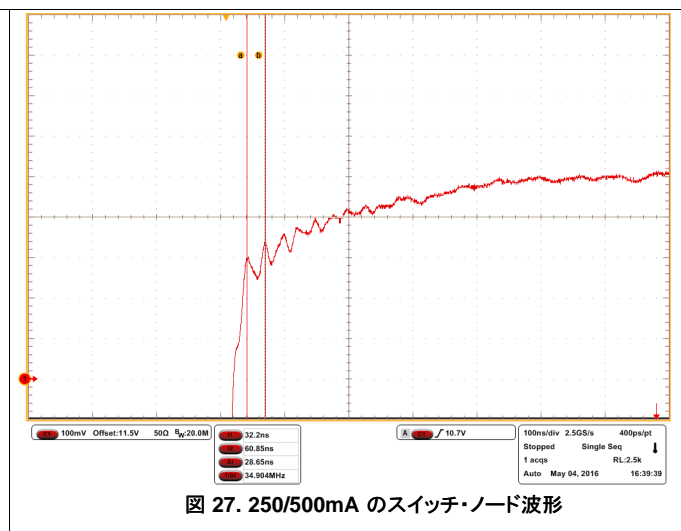
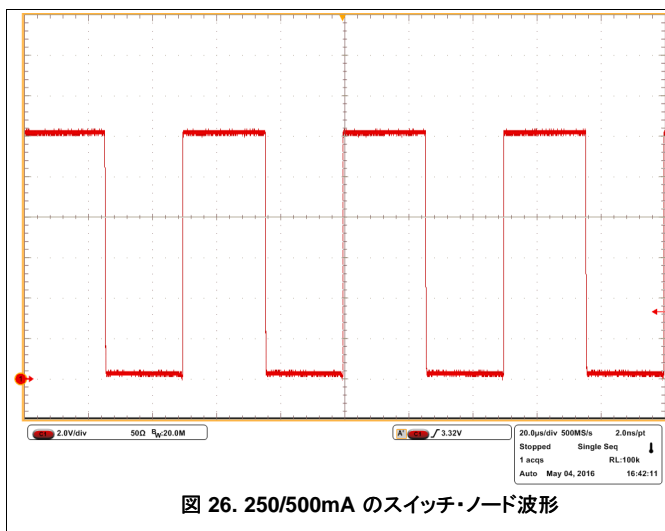
これらの寄生素子はレイアウトの改良、スナバ、設計の改良によって対応できますが、多くの場合、調整すべき重要な項目としてパワー MOSFET のスイッチング速度が挙げられます。IDRIVE には、レジスタの書き込みと 1 本の抵抗による設定のどちらかで MOSFET のスルーレートを簡単に制御できるという、モータ・ゲート駆動システムを調整するための理想的な方法が備わっています。これによりシステム設計者は、許容できる EMI レベルを維持しながら、効率の損失を最小限に抑えられる最適な設定を選択できます。

表 3 に示すデータは、スマート・ゲート・ドライバの IDRIVE 機能を実際に適用した結果に基づく例です。表 3 に、各種 IDRIVE 設定のスマート・ゲート・ドライバを使用した CISP 25 EMI エンジニアリング・スキャン (30~200MHz) のピーク測定値を示します。IDRIVE の電流設定を下げるにつれて、ピーク・スキャン測定値も下がっています。

表 3. EMI スキャン結果

IDRIVE 設定 (mA)	35MHz ピーク (dB μ V/m)	65MHz ピーク (dB μ V/m)	160MHz ピーク (dB μ V/m)
10/20	5	<0	<0
20/40	12	<0	<0
50/100	12	<0	<0
200/400	28	12	2
250/500	30	15	5

オシロスコープの出力波形を解析すると、より高い IDRIVE 設定で、スイッチ・ノードに高周波振動が引き起こされていることが分かります。図 26 に、信号全体を表示したオシロスコープの画面キャプチャを示します。この図では振動は明らかではありません。しかし、立ち上がりエッジの終盤を拡大すると (図 27)、EMI スキャンに存在する 35MHz の信号が観測されます。IDRIVE 設定を下げることによって、振動はほぼ完全に解消されます (図 28)。これは、実際のアプリケーションにおける IDRIVE アーキテクチャの使用方法の一例を示しています。図 29~図 33 に、30~200MHz の帯域全体にわたる発生源 EMI スキャン結果を示します。



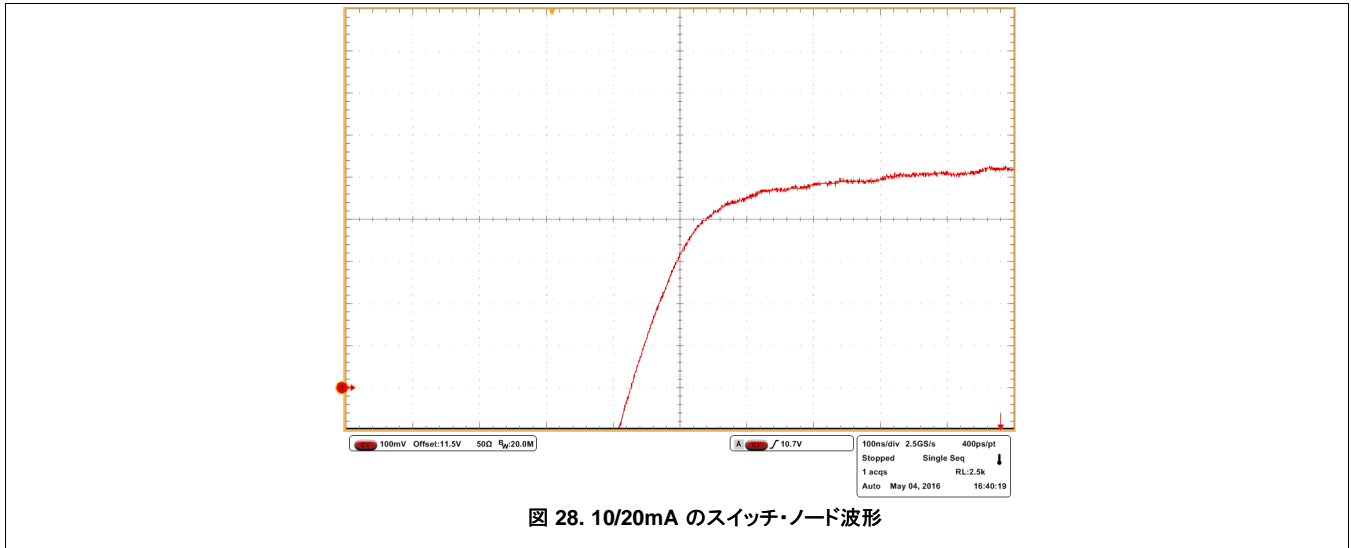


図 29～図 33 に、各 IDRIVE 設定での放射妨害波エンジニアリング・スキャン結果を示します。

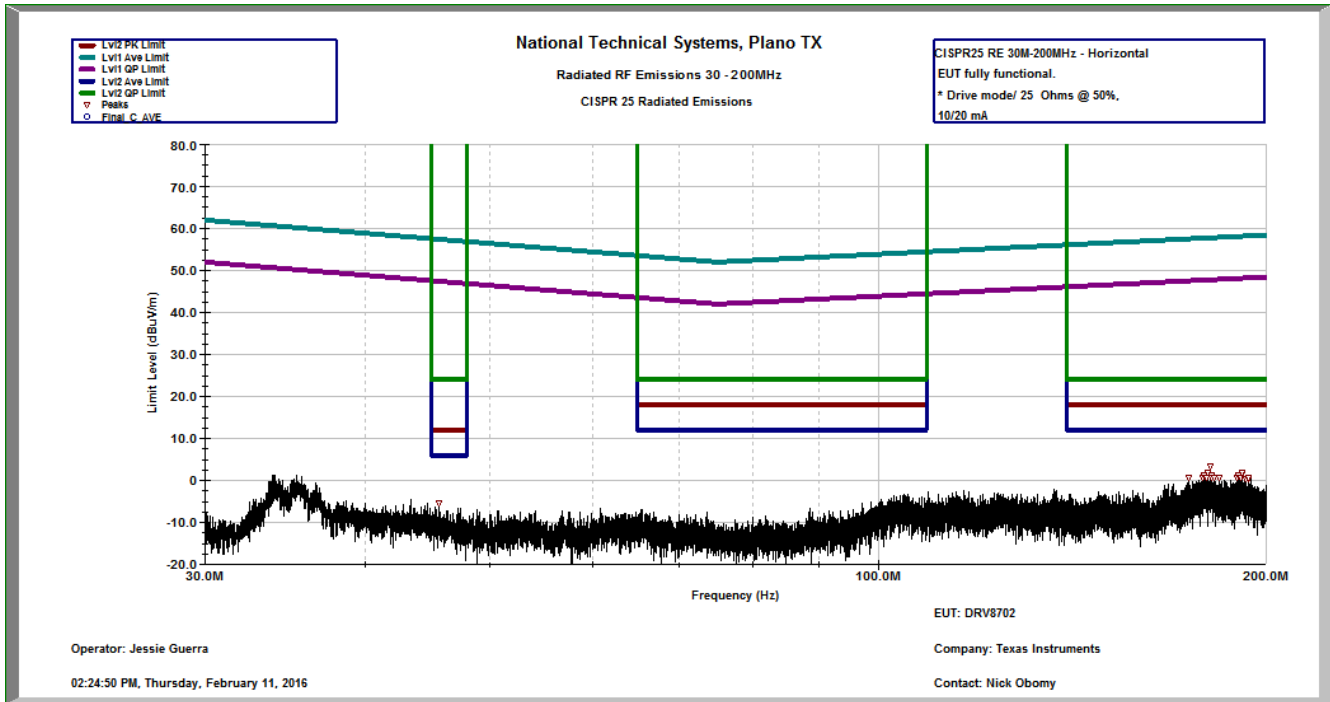


図 29. 10/20mA の EMI スキャン

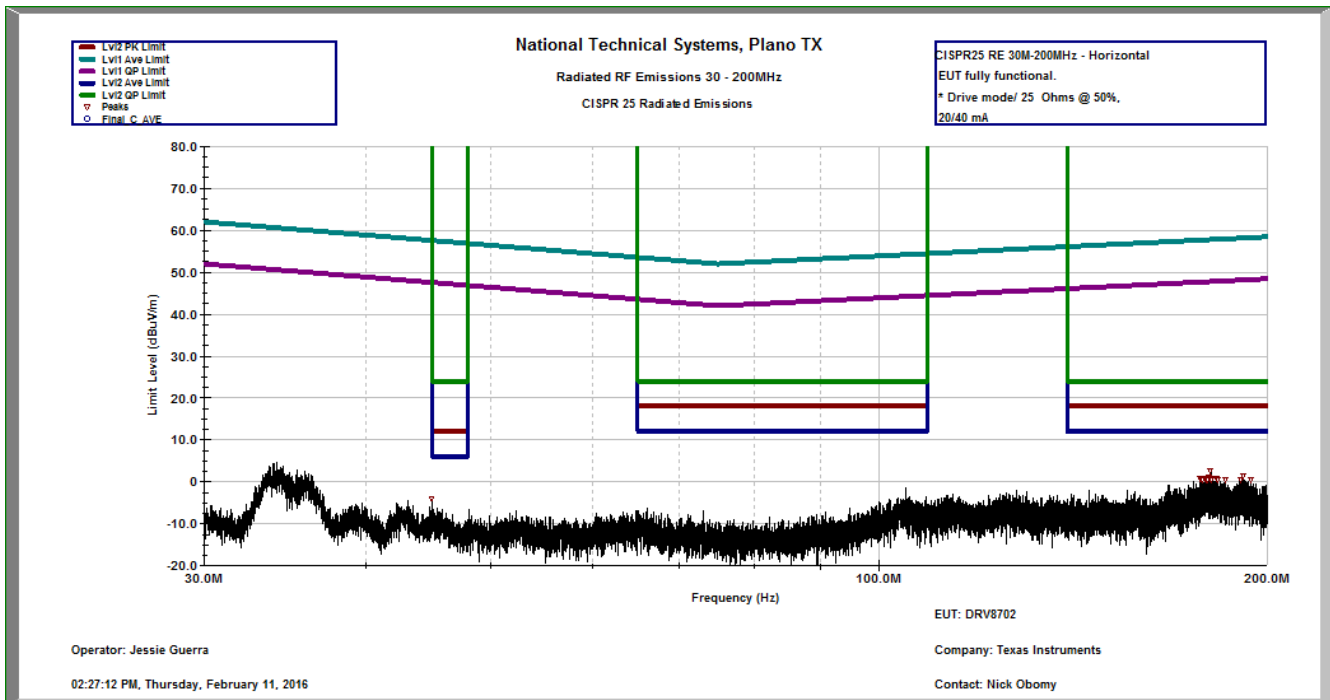


図 30. 20/40mA の EMI スキャン

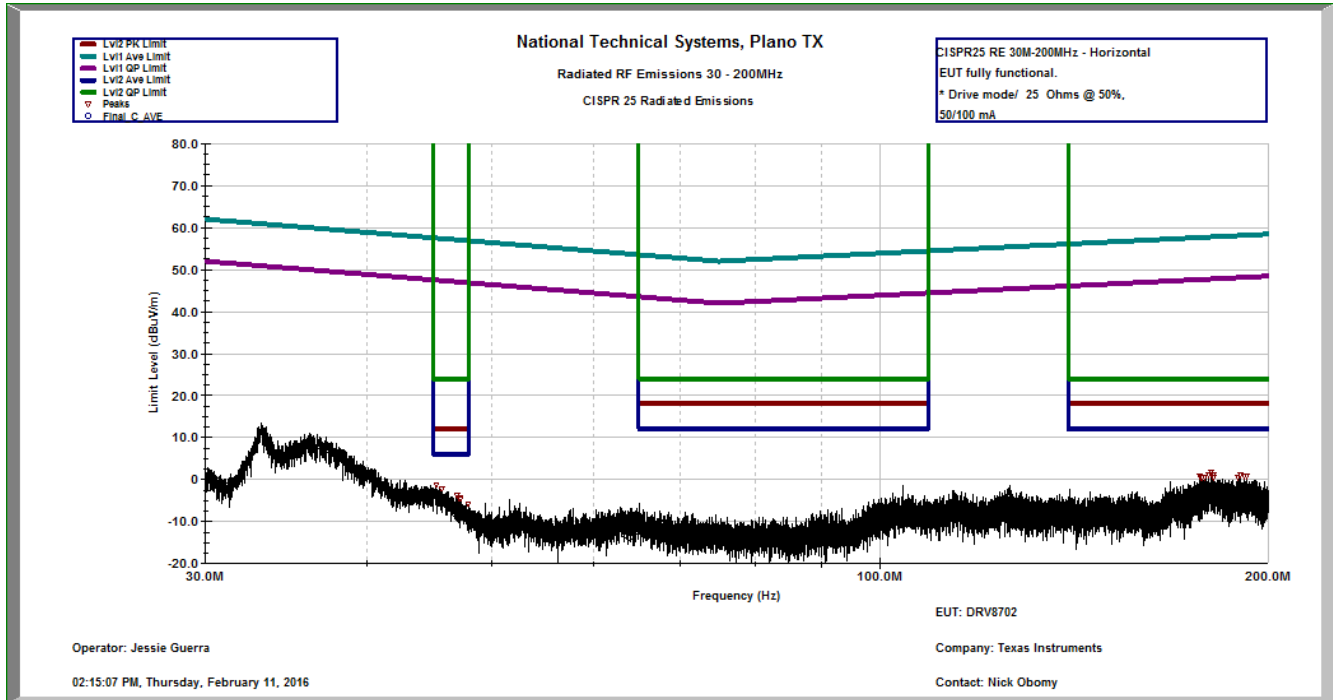


図 31. 50/100mA の EMI スキャン

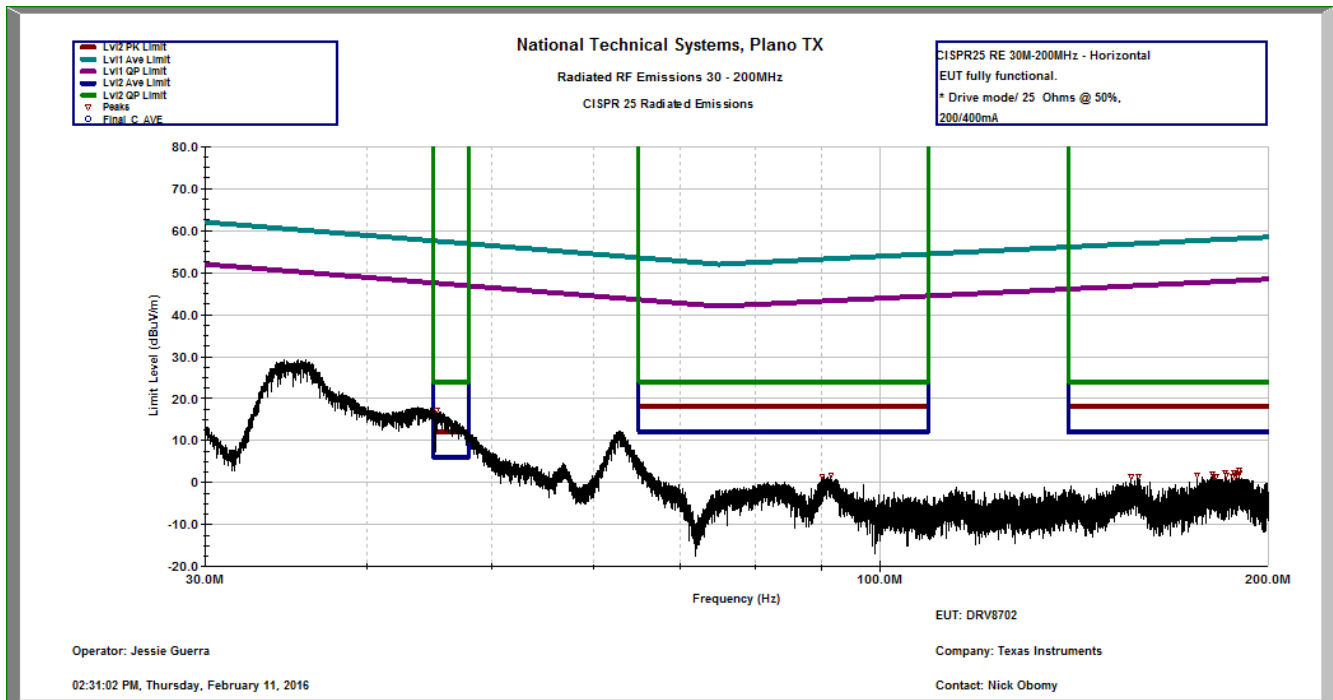


図 32. 200/400mA の EMI スキャン

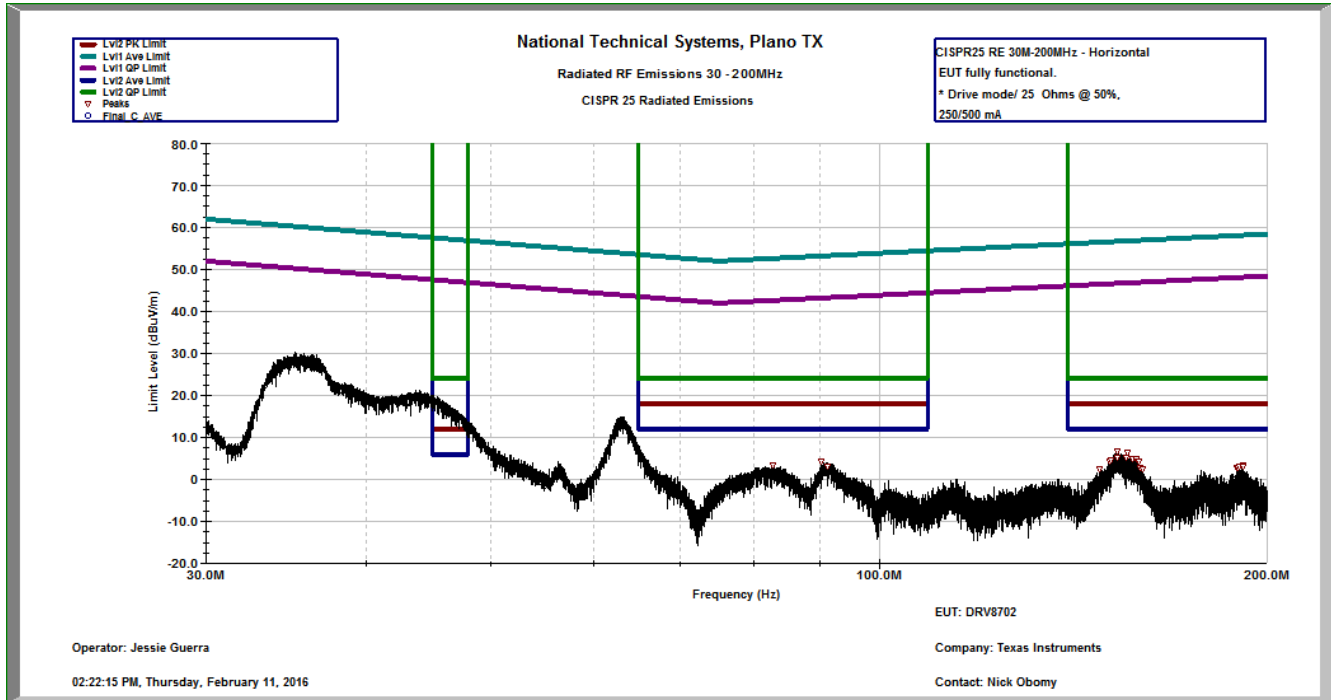


図 33. 250/500mA の EMI スキャン

改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

Revision B (January 2018) から Revision C に変更	Page
• 表 1 の仕様値を変更	4
• 1.5.2 の「6.9nC」を「44nC」に変更	8

Revision A (May 2016) から Revision B に変更	Page
• 用語を「スマート・ゲート・ドライバ」に更新	1

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が適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、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 (www.tij.co.jp/ja-jp/legal/termsofsale.html)、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。

Copyright © 2020, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

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が適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、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 (www.tij.co.jp/ja-jp/legal/termsofsale.html)、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。

Copyright © 2020, Texas Instruments Incorporated

日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社