



AN-2016 アプリケーション・ノート

ADuM4136 絶縁型ゲート・ドライバと LT3999 DC/DC コンバータを使用して 1200V SiC パワー・モジュールを駆動

著者：Juan Carlos Rodriguez、Martin Murnane

はじめに

電気自動車、再生可能エネルギー、エネルギー貯蔵システムなどの電力システム開発の成功は、効率的な電力変換方式を実装できるかどうかにかかっています。パワー・エレクトロニクス・コンバータの中心部には、専用の半導体デバイスと、これらの半導体のオンとオフをスイッチングする機能があります。このスイッチングはゲート・ドライバによって行われます。

炭化ケイ素 (SiC) 半導体や窒化ガリウム (GaN) 半導体などの最先端の広帯域デバイスは、600V～2000V の高電圧定格、低チャンネル・インピーダンス、メガヘルツ範囲までの高速スイッチング周波数など、能力が向上しています。これらの能力のため、例えば伝播遅延の短縮や非飽和検出による短絡保護の向上など、ゲート・ドライバに求められる条件は厳しくなります。

このアプリケーション・ノートでは、ADuM4136 ゲート・ドライバの利点について説明します。

ADuM4136 は、最大 4A の出力駆動能力、150kV/μs の最大コモンモード過渡耐圧 (CMTI)、非飽和保護を含む高速障害管理機能を備えるシングルチャンネル・デバイスです。

ADuM4136 の能力を示すために、Stercom Power Solutions GmbH との協力の下、SiC パワー・デバイス用のゲート・ドライバ・ユニット (GDU) を開発しました (図 1 を参照)。このボードは、LT3999 パワー・ドライバを使って実装されるプッシュプル・コンバータをベースとする絶縁型バイポーラ電源から電力を供給されます。この高電圧、高周波数のモノリシック DC/DC 変換ドライバは、プログラマブル電流制限機能付き 1A デュアル・スイッチ、最大 1MHz の周波数同期、2.7V～36V の広い動作電圧範囲、1μA 未満のシャットダウン電流を特長としています。

このソリューションのテストは、-10V および +20V の最大定格ゲート・ソース電圧で 1200V のドレイン・ソース・ブレイクダウン電圧、22.5mΩ のチャンネル抵抗 (代表値)、100A のパルス・ドレイン電流能力を備える、SiC 金属酸化物半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) パワー・モジュール (F23MR12W1M1_B11) を使って実施しました。

このアプリケーション・ノートでは、このソリューションで発生するデッド・タイムを評価し、GDU に発生する全伝播遅延を計算します。また、非飽和検出機能をテストして、過負荷および短絡条件から SiC デバイスを保護できることを確認します。

ソリューションの高速応答は、テスト結果によって検証されます。

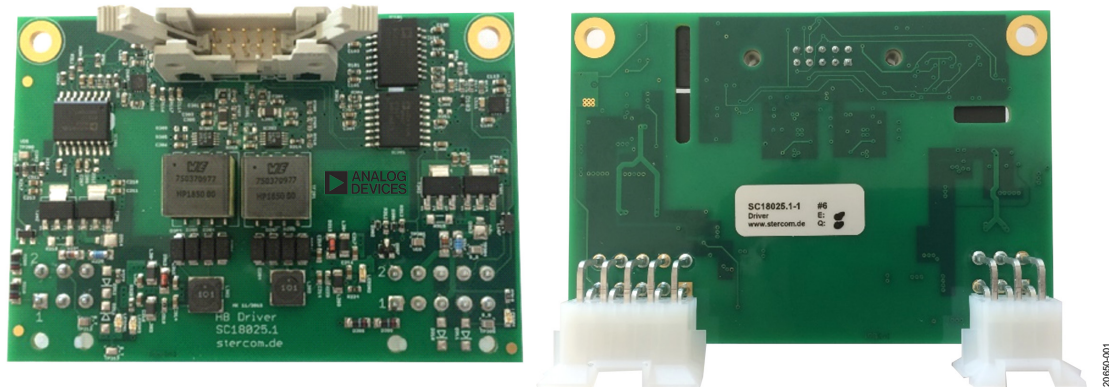


図 1. GDU

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

Rev. 0

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイセズ株式会社

本 社／〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル 10F
電話 03 (5402) 8200
大 阪営業所／〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー 10F
電話 06 (6350) 6868
名古屋営業所／〒451-6038 愛知県名古屋市中区牛島町 6-1 名古屋ルーセントタワー 38F
電話 052 (569) 6300

目次

はじめに	1
改訂履歴	2
テスト・セットアップ	3
テスト結果	4
デッド・タイムと伝搬遅延	4
非飽和保護の機能	6
回路図	9
まとめ	12

改訂履歴

~~7/2019~~-Revision 0: 初版

テスト・セットアップ

ここで報告するテストのセットアップ全体を図 2 に示します。高電圧 DC 入力電源 (V1) をパワー・モジュールの両端に配置します。1.2mF の薄型デカップリング・コンデンサ・バンク (C1) を入力の高電圧の両端に追加します。出力段は 38μH インダクタ (L1) で、非飽和保護テスト中にパワー・モジュールのハイサイドまたはローサイドに接続できます。表 1 に、このテスト・セットアップの電力部品のまとめを示します。

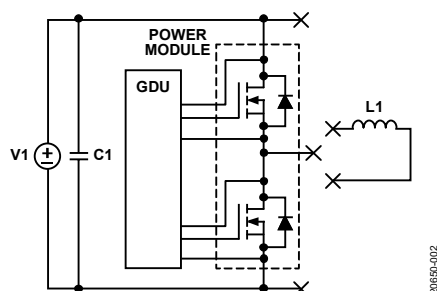


図 2. テスト・セットアップ図

表 1. 試験構成の電力部品

Components	Value
V1	0 V to 1000 V
C1	1.2 mF
SiC Power Module (FF23MR12W1M1_B11)	1200 V, 23 mΩ
L1	38 μH

表 2. テスト・セットアップ機器

Equipment	Manufacturer	Part Number
Oscilloscope	Rohde & Schwarz	HMO3004, 500 MHz
DC Power Supply	Komerici	QJE3005EIII
Gate Driver Unit (GDU)	Stercom	SC18025.1
Pulse Wave Generator	IB Billmann	PMG02A
Digital Multimeter (DMM)	FLUKE	Fluke 175
High Voltage Differential Probe	Testec	TT-SI 9010
AC Rogowski Current Probe	PEM	CWT mini

図 4 に示す GDU は、パルス波ジェネレータからスイッチング信号を受信します。これらの信号は内蔵されたデッド・タイム発生回路に渡されます。この回路は [LT1720](#) 超高速デュアル・チャンネル・コンパレータを使って実装され、その出力は 2 個の ADuM4136 デバイスに供給されます。ADuM4136 ゲート・ドライバは、パワー・モジュール内の 2 個の SiC MOSFET のゲート端子に絶縁信号を供給し、ドレイン端子から絶縁信号を受信します。ゲート・ドライバの出力段には、外部 5V DC 電源から電力を供給される [LT3999](#) DC/DC ドライバを使って構築されるプッシュプル・コンバータにより、絶縁された電力が供給されます。SiC モジュールの温度計測は、[ADuM4190](#) 高精度絶縁アンプを使って行われます。ADuM4190 は、[LT3080](#) 低ドロップアウト (LDO) リニア・レギュレータによって電力を供給されます。

図 3 に、実験のセットアップを示します。表 2 に、非飽和保護テストに使用した機器を示します。

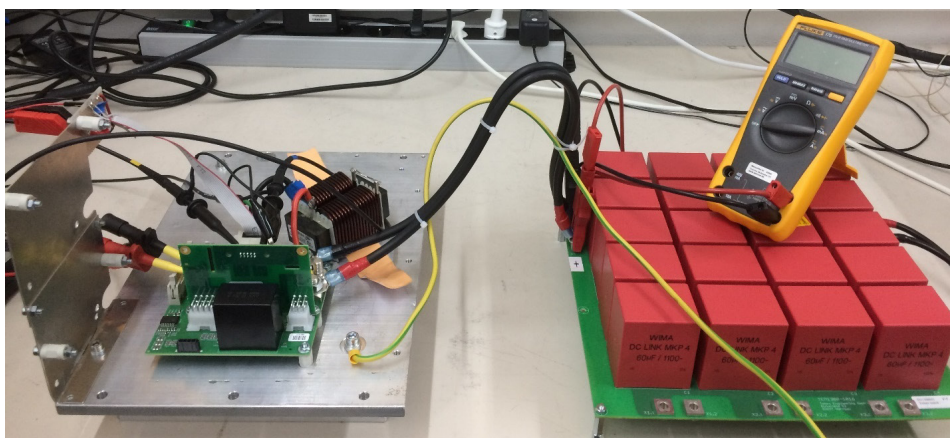


図 3. 試験装置のセットアップ

テスト結果

デッド・タイムと伝搬遅延

GDU は、ハイサイドおよびローサイド SiC MOSFET のターンオンまたはターンオフ時にハーフブリッジ・パワー・モジュール内で短絡が起きるのを防ぐために、ハードウェア・デッド・タイムを発生させます（図 4 を参照）。遅延される PWM_B 信号は、この文書では PWM_B_D として示されていることに注意してください。伝搬遅延テストでは、GDUPWM_B 信号への（アクティブ・ロー）入力によって励起される、下側ドライバのシグナル・チェーン上でデッド・タイムを測定します。デッド・タイムは、抵抗コンデンサ（RC）フィルタと LT1720 超高速コンパレータを使って発生させます。図 5～図 8 に、伝搬遅延テストの結果を示します。図 5～図 8 に示した信号の説明は、表 3 を参照してください。

表 3. オシロスコープ信号の説明（ローサイド・ドライバ）

Symbol	Signal Function	Channel Number
VGS_B	MOSFET gating	2
PWM_B_D	After comparator	3
PWM_B	Input to GDU	4

PWM_B 入力信号がローになると、コンパレータは遅延された PWM_B_D 出力ステートをハイからローに変更します。デッド・タイムは RC 回路によって決まります（約 160ns、図 5 を参照）。

SiC MOSFET がオフになって PWM_B 入力信号がハイになるときの PWM_B_D の遅延時間は、SiC MOSFET のターンオン時に測定される遅延時間と比較すると、ごくわずか（約 20ns）です（図 6 を参照）。PWM_B_D のデッド・タイムが発生してから VGS_B 信号がトグルするまでの遅延時間（ターンオン時とターンオフ時の両方）の測定結果を、図 7 と図 8 に示します。これらの短い遅延時間はそれぞれ 66ns と 68ns です。これらは ADuM4136 が発生させる遅延です。全伝搬遅延時間（デッド・タイム + 伝搬遅延）は、ターンオン時に約 226ns、ターンオフ時に約 90ns です。表 4 に、伝搬遅延時間の測定結果のまとめを示します。

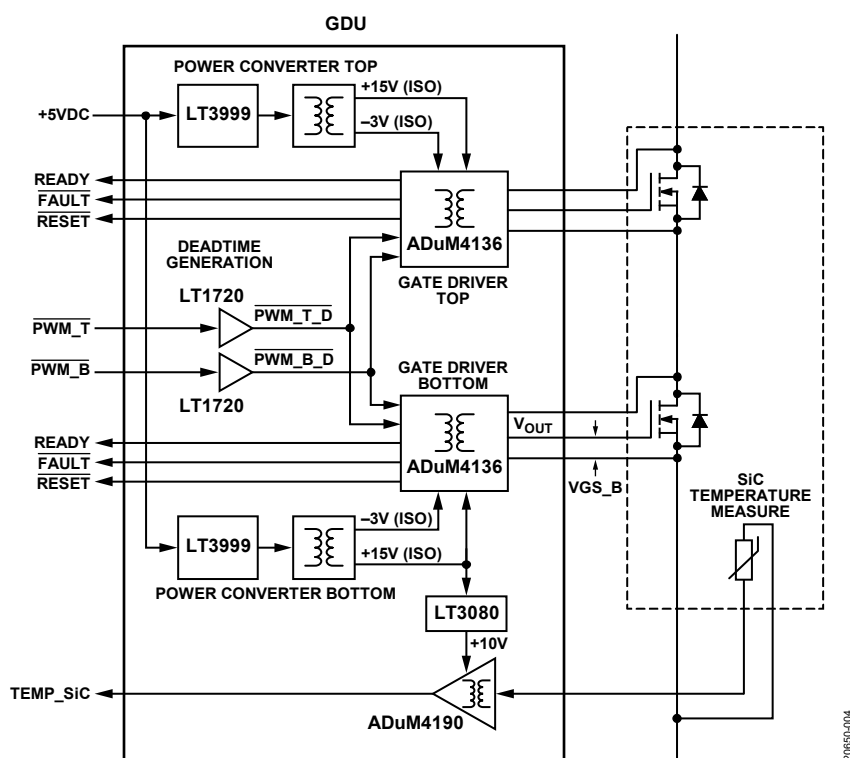


図 4. GDU のシグナル・チェーン

表 4. 伝搬遅延テスト、結果のまとめ

Event	Toggled Signal, High-Low	Toggled Signal, Low-High	Dead Time (ns)	Driver Delay Time (ns)	Total Propagation Delay Time (ns)
Device Turned On	PWM_B, PWM_B_D	Gate Signal	160	66	226
Device Turned Off	Gate Signal	PWM_B, PWM_B_D	22	68	90

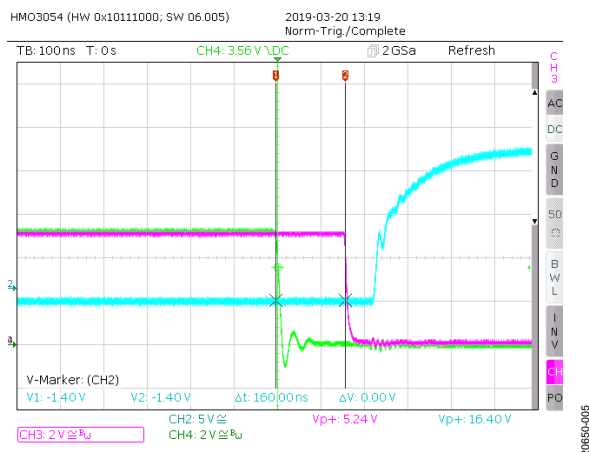


図 5. デッド・タイムの測定、デバイスのターンオン時

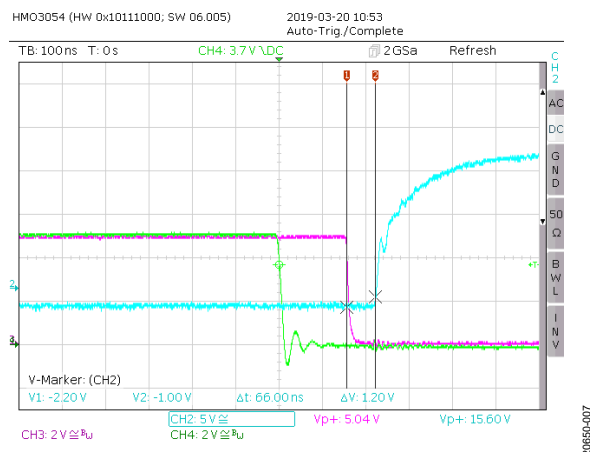


図 7. 遅延時間の測定、デバイスのターンオン時

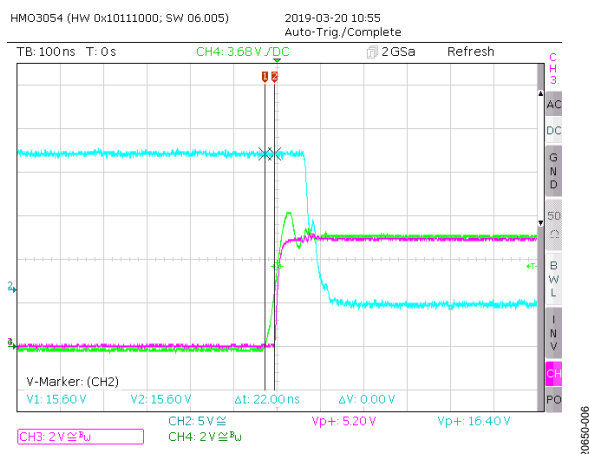


図 6. デッド・タイムの測定、デバイスのターンオフ時

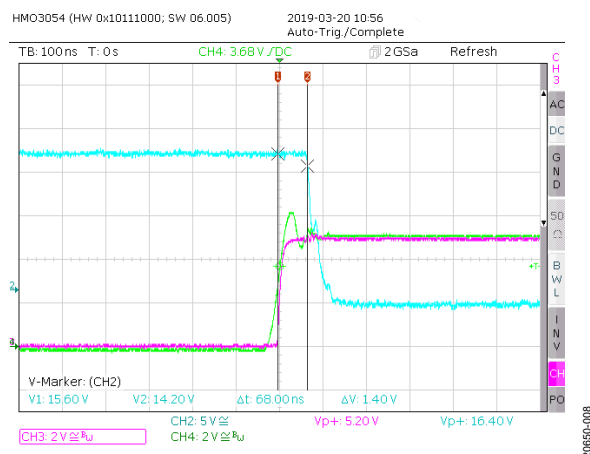


図 8. 遅延時間の測定、デバイスのターンオフ時

非飽和保護の機能

ADuM4136 IC には、駆動スイッチの高電圧短絡に対する非飽和保護の機能が内蔵されています。

このアプリケーションでは、各ゲート・ドライバは、DESAT ピンの電圧 (V_{DESAT}) が、8.66V~9.57V の範囲内 (代表値 9.2V) の非飽和リファレンス電圧レベル (V_{DESAT_REF}) を超えていないかをチェックすることにより、MOSFET のドレイン端子とソース端子間の電圧 (V_{DS}) を間接的に監視します。更に、 V_{DESAT} の値は、MOSFET の動作と、2 個の高電圧保護ダイオードと 1 個のツェナー・ダイオードで構成される外部回路によって決まります (表 6 と回路図のセクションを参照)。

V_{DESAT} の値は次式から計算できます。

$$V_{DESAT} = V_Z + 2 \times V_{DIODE_DROP} + V_{DS}$$

ここで、

V_Z はツェナー・ダイオードのブレイクダウン電圧、 V_{DIODE_DROP} は各保護ダイオードの順方向電圧降下です。ターンオフ時には、DESAT ピンは内部でローになり、飽和現象は発生しません。更に、MOSFET 電圧 (V_{MOSFET}) はハイであり、2 個のダイオードは逆バイアスされるため、DESAT ピンは保護されます。

ターンオン時には、DESAT ピンは 300ns の内部ブランキング時間後に解放され、2 個の保護ダイオードは順方向にバイアスされ、ツェナー・ダイオードはブレイクダウンします。このとき、 V_{DESAT} の電圧が V_{DESAT_REF} の値を超えるかどうかは、 V_{DS} の値によって決まります。

通常動作中は、 V_{DS} と V_{DESAT} の電圧はローのままになります。大きな電流が MOSFET を流れると、 V_{DS} の電圧が高くなり、 V_{DESAT} の電圧レベルは V_{DESAT_REF} を超えて上昇します。

この状態になると、ADuM4136 ゲート・ドライバの出力ピン (V_{OUT}) は 200ns の間ローになり、MOSFET を非飽和化します。また、2 μ s 以内に FAULT 信号が生成され、ゲート・ドライバ信号 (VGS) は直ちにロックされます。これらの信号は、RESET ピンによってのみアンロック可能です。

検出電圧レベルは V_{DS} の値によって異なり、ブレイクダウン電圧 V_Z の適切なツェナー・ダイオードを選択することにより、任意のレベルに設定できます。一方、非飽和領域の MOSFET 電流 (I_D) は、MOSFET メーカーのデータシートの説明に従って V_{DS} に基づいて推定できます。

表 6. 非飽和保護テストの計算条件

Test	Zener Breakdown Voltage, V_Z (V)	Detection Voltage Level, V_{DS} (V)	Detection Current Level, I_D at 25°C (A)	Detection Current Level, I_D at 125°C (A)
Low-Side	5.1	3.27	116	95
High-Side	4.3	4.07	140	110

ハイサイドとローサイドの両 MOSFET について、ゲート・パルスを使用して 2 種類の非飽和保護テストを実施しました。それぞれのテストでは、異なるツェナー・ダイオードを選択することにより、異なる障害電流をテストしました。テストした電流レベルを表 6 にまとめています。ここでは最大 $V_{DESAT_REF} = 9.57V$ (最大)、公称 $V_{DIODE_DROP} = 0.6V$ と仮定します。

ローサイドのテスト

ローサイドの非飽和保護テストは、室温 25°C で入力電圧 (V_1) を 100V から 800V まで変化させて実施しました (図 9 を参照)。

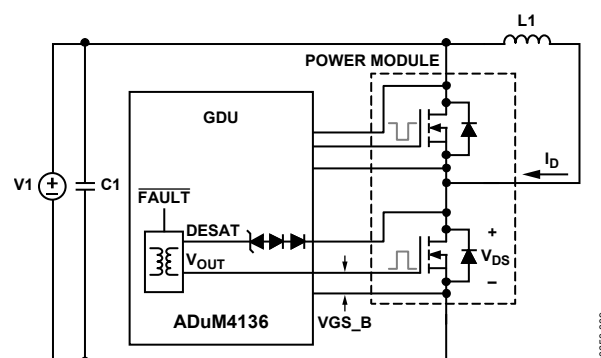


図 9. ローサイドの非飽和保護テスト

図 10~図 17 に、ローサイドの非飽和保護テストの結果を示します。表 5 に、図 10~図 17 に示した信号の説明を示します。

表 5. オシロスコープ信号の説明 (ローサイド・テスト)

Channel Number	Signal Name
1	FAULT
2	V_{DS}
3	I_D
4	VGS

図 16 と図 17 では、25°C では約 125A の電流に対して非飽和保護がトリガされ、障害ステータス・ピンは約 1.34 μ s の遅延後にローにトリガされています。

パワー・モジュールのハイサイドについても同様のテストを実施しました。これらのテストでは、25°C では約 160A の電流に対して非飽和保護がトリガされ、障害ステータス・ピンは 1.32 μ s 後にローにトリガされています。

ローサイド・テストとハイサイド・テストの結果、このゲート駆動ソリューションは、設定値に近い電流レベルでは 2 μ s 未満の高速で非飽和検出を通知できることがわかりました (表 4 を参照)。

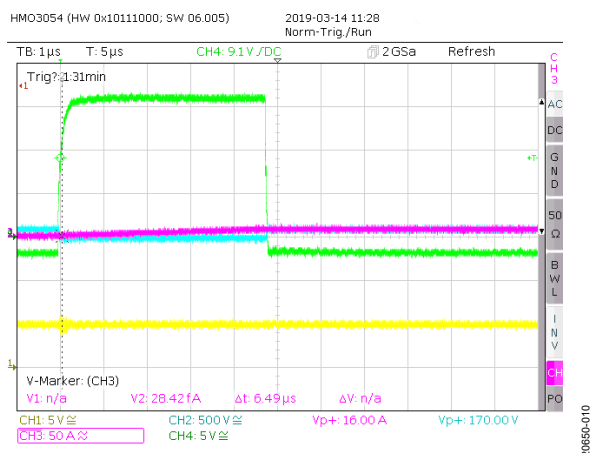


図 10. ローサイドのテスト、V1 = 100V、障害なし

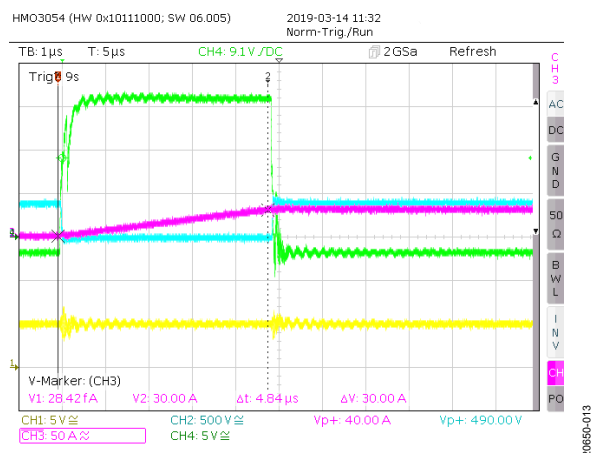


図 13. ローサイドのテスト、V1 = 400V、障害なし

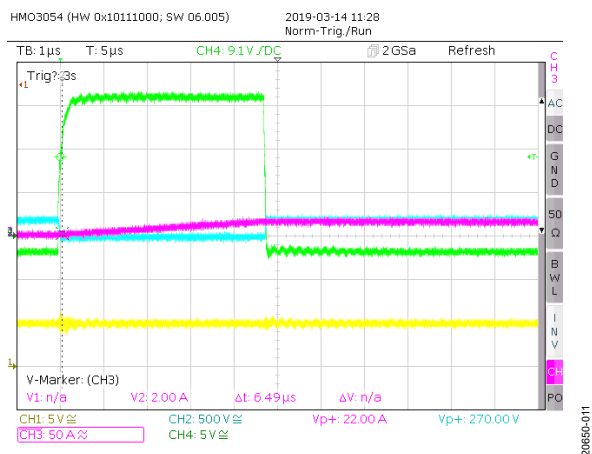


図 11. ローサイドのテスト、V1 = 200V、障害なし

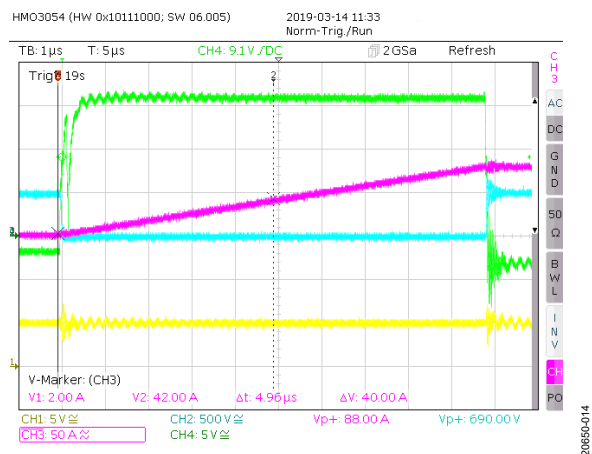


図 14. ローサイドのテスト、V1 = 500V、障害なし

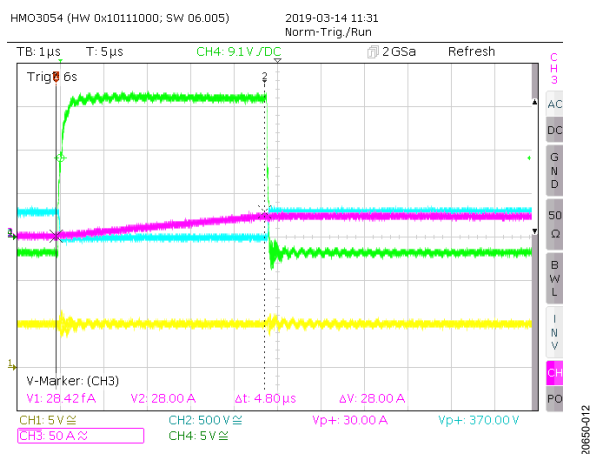


図 12. ローサイドのテスト、V1 = 300V、障害なし

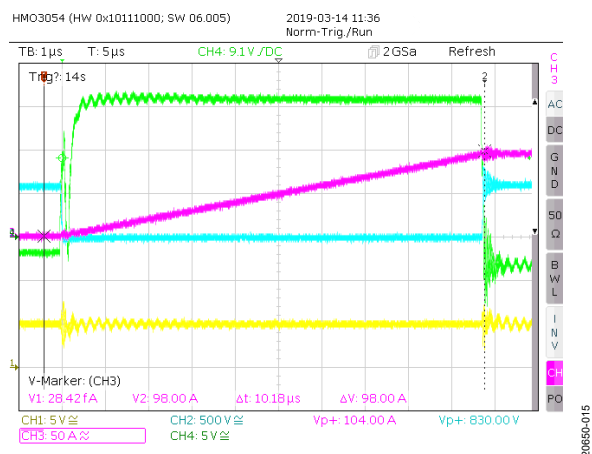


図 15. ローサイドのテスト、V1 = 600V、障害なし



図 16. ローサイドのテスト、 $V1 = 800V$ 、障害検出



図 17. ローサイドのテスト、 $V1 = 800V$ 、
障害検出（ズームイン）

回路図

図 18～図 20 に、ADuM4136 ゲート・ドライバ・ボードの回路図を示します。

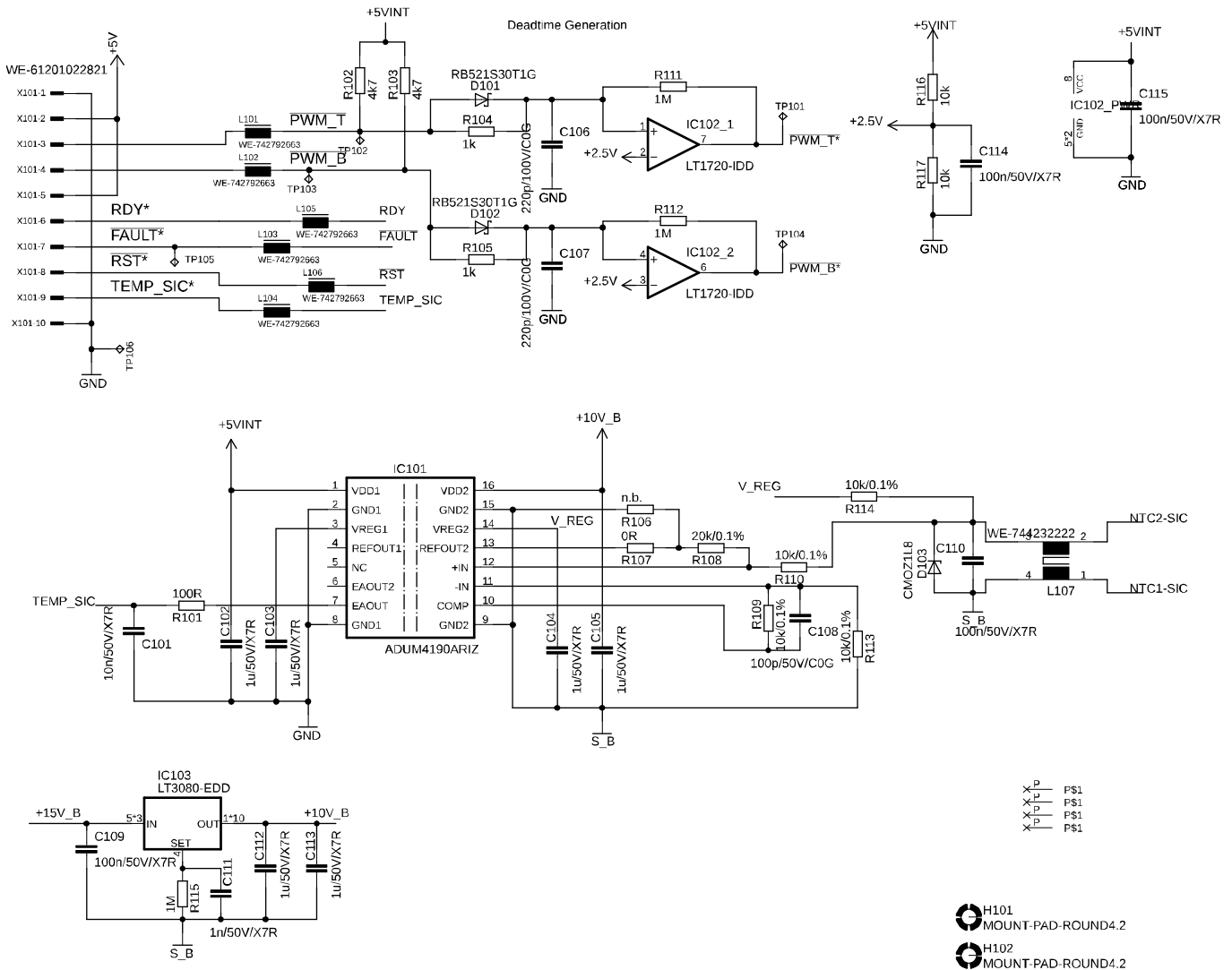


図 18. ADuM4136 ゲート・ドライバ・ボードの回路図（1 次側）

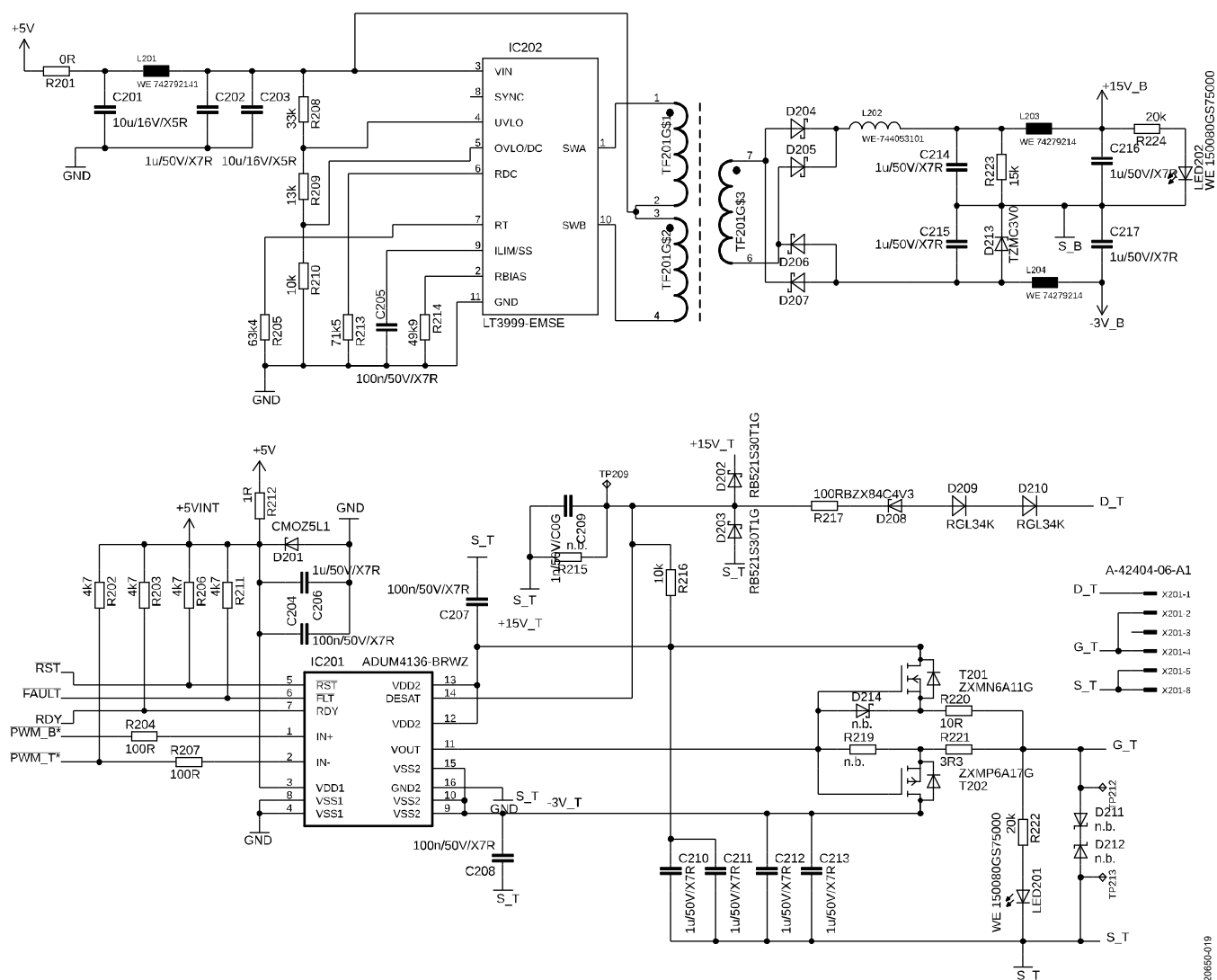


図 19. ADuM4136 ゲート・ドライブ・ボードの回路図（ハイサイドの絶縁された電力とゲート信号）

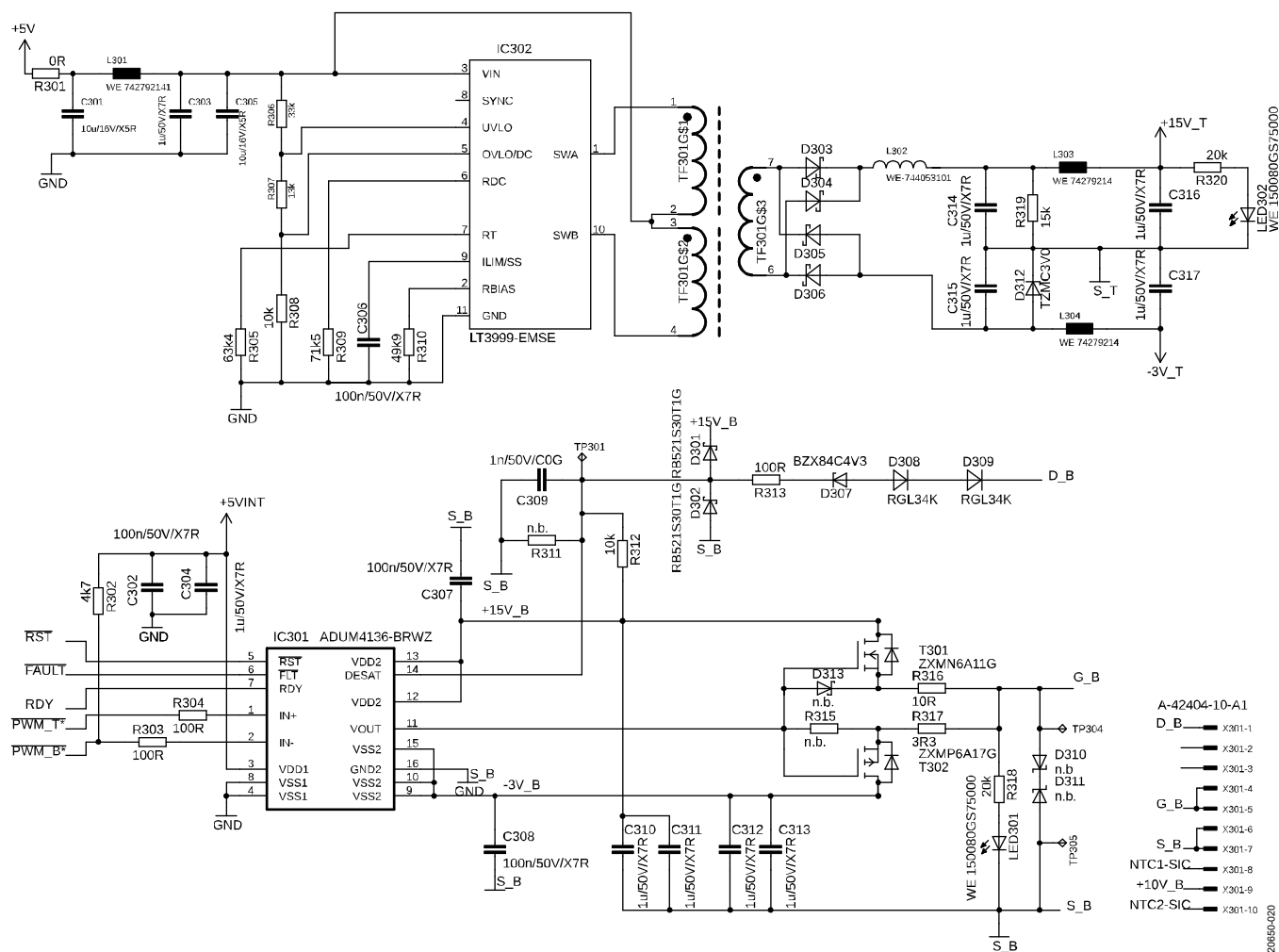


図 20. ADuM4136 ゲート・ドライブ・ボードの回路図（ローサイドの絶縁された電力とゲート信号）

まとめ

ADuM4136 ゲート・ドライバは、短い伝搬遅延と、非飽和保護による過電流障害の高速通知を特長とします。これらの利点と、適切な外部回路の設計を組み合わせれば、SiC および GaN 半導体デバイスなどの最先端の広帯域デバイスが提供する機能を活用するための厳しい条件を満たすことができます。

このアプリケーション・ノートのテスト結果は、超高速応答と非飽和保護による十分な障害管理を特長とするゲート・ドライブ・ソリューションを使って、高電圧条件で SiC MOSFET モジュールを駆動した場合に得られるデータを提供します。このゲート・ドライブ・ソリューションは、LT3999 を使って実装される低ノイズの小型パワー・コンバータによって電力を供給されます。LT3999 は低シャットダウン電流とソフトスタート機能により、十分な電圧レベルの絶縁された電力を提供します。