

Design Guide: TIDA-020065

車載用スマートヒューズのリファレンス デザイン

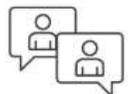


概要

このリファレンス デザインは、標準的な溶断式ヒューズの交換に伴う一般的な課題を克服するのに役立ちます。このデザインは、ハイサイド スイッチ コントローラ TPS1213-Q1、電流センス アンプ INA296B-Q1、1 個のマイコンを実装しており、 I^2t (電流の 2 乗と時間の積。ヒューズと同様、一定のエネルギー量に達したときに接続を強制的にオフにする) 過電流保護を実現するほか、低消費電力モードを通じて消費電力を最小化し、抵抗性、静電容量性、誘導性の各負荷を駆動することができます。このデザインは、双方向電流センスなど多くの構成オプションを搭載しているため、エンジニアは大電流スマートヒューズ アプリケーション向けのさまざまなテストを実行できます。

参照情報

| | |
|----------------------------|------------|
| TIDA-020065 | デザイン フォルダ |
| TPS1213-Q1, INA296B-Q1 | プロダクト フォルダ |
| LM74704-Q1, TPS7B81-Q1 | プロダクト フォルダ |
| TPS22919-Q1, MSPM0L1306-Q1 | プロダクト フォルダ |



テキサス・インスツルメンツの E2E™ サポート エキスパートにお問い合わせください。

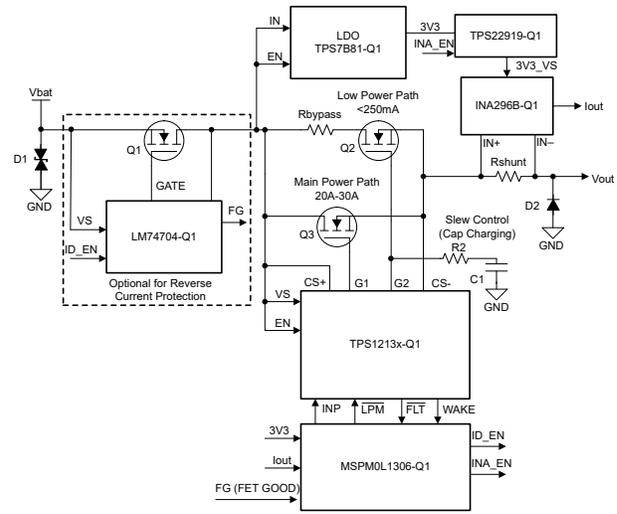


特長

- MSPM0L1306-Q1 によるソフトウェア ベースの I^2t ヒューズ アルゴリズム
- 容量性負荷を駆動するためのゲート スルーレート制限回路によって、スタートアップ時の制御されていない突入電流を防止
- 低消費電力モードの消費電流: 38 μ A (MSPM0L1306-Q1 を除外した値)
- 設定可能な自動負荷ウェークアップ
- 逆電流および逆極性保護
- 双方向または単方向電流検出

アプリケーション

- 12V、48V パワー ディストリビューション ボックス
- ゾーン制御モジュール



1 システムの説明

TIDA-020065 車載用スマートヒューズのリファレンス デザインは、パワー ディストリビューション ボックスおよびゾーン制御モジュール システムを対象としています。自動車がドメイン ベース アーキテクチャからゾーン ベース アーキテクチャに移行するに従って、これらのシステムは一般的な溶断式ヒューズを半導体設計に置き換えることで、以下を実現することを目指しています。

1. リセット可能なヒューズ。もはや簡単にアクセスできる場所にヒューズを配置する必要がないため、ケーブル配線を最適化できます。
2. 温度範囲全体にわたる時間電流特性の改善。一般的な溶断式ヒューズに比べてデバイス間のばらつきが小さいため、ハーネス ケーブルの直径を最適化でき、コストを低減できます。

しかし、溶断式ヒューズの置き換えには、以下の課題があります。

1. 過負荷および短絡イベント時のワイヤ ハーネスの保護と、ピーク負荷過渡イベント時の誤動作の防止を両立する。
2. 負荷バルク コンデンサの充電中の制御されていない突入電流から FET を保護する。
3. 電力を負荷に常時供給する際の、キーオフ状態の半導体の消費電力を低減する。

TIDA-020065 の目的は、大電流負荷に関連するこれらの課題にシステム レベルで対処する方法を提示することです。このリファレンス デザインでは、駆動状態ではメイン パワー パスを駆動し、キー オフ状態では低消費電力パスを駆動するため、TPS1213-Q1 デバイスを使用しています。このリファレンス デザインは、負荷電流を検出する INA296B3-Q1 デバイスも使用しているため、MSPM0L1306-Q1 はソフトウェア ベースの I^2t アルゴリズムを実行してヒューズの動作を再現できます。

1.1 用語

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| SC | 短絡 |
| ECU | 電子制御ユニット |
| FET | 電界効果トランジスタ |
| MOSFET | 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ |
| I^2t | 電流の 2 乗と経過時間の積 |
| I_{nom} | 電流定格の公称値 |
| INP | TPS1213-Q1 の外部 FET 制御入力 |
| nLPM | TPS1213-Q1 の低消費電力モード入力 |
| WAKE | TPS1213-Q1 の自動負荷ウェークアップ インジケータ |
| nFLT | TPS1213-Q1 のフォルト インジケータ |
| I_{Lwu} | 負荷ウェークアップ スレッショルド電流 |
| ADC | アナログ / デジタル コンバータ |
| GPIO | 汎用入出力 |
| PWM | パルス幅変調 |
| EMI | 電磁干渉 |
| CE | 伝導放出 |
| RE | 放射放出 |
| EUT | 被試験機器 |

1.2 主なシステム仕様

表 1-1. 主なシステム仕様

| 記号 | パラメータ | 仕様 | 詳細 |
|-------------------|-------------------|-------------|---|
| V_{BAT} | 入力電圧範囲 | 4V~40V | 12V DC 入力。動作電圧範囲全体を使用するには、入力および出力コンデンサを交換する必要があります。 |
| $I_{out,max}$ | 最大負荷電流 | 57A | コネクタの定格は 57A です。 |
| t_{charge} | 容量プリチャージ時間 | 10ms | — |
| I_{SC} | 短絡スレッショルド | 約 100A | — |
| t_{SC} | 短絡応答時間 | < 6 μ s | — |
| I_{LWU} | 負荷ウェークアップ スレッショルド | 約 200mA | — |
| $I_{Sense Range}$ | 電流検出範囲 | 0A~66A | 単方向電流検出の構成。逆電流を許容するには、LM74704-Q1 の部品を取り外す必要があります。 |

2 システム概要

2.1 ブロック図

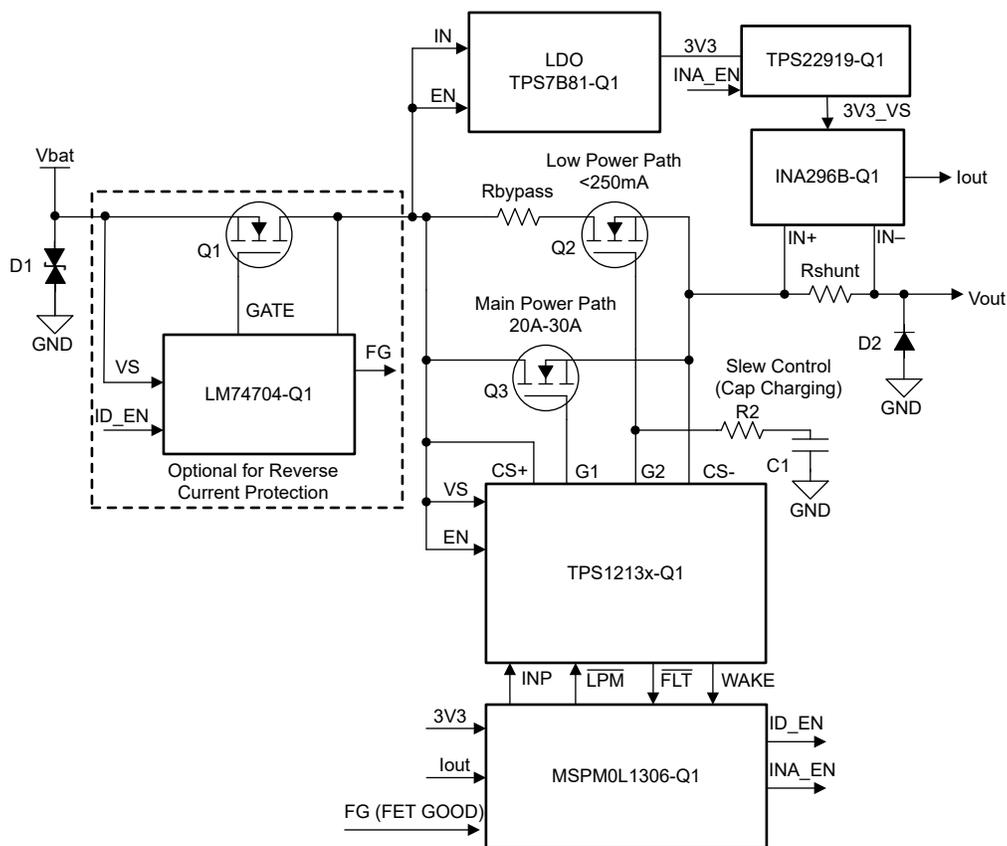


図 2-1. TIDA-020065 のブロック図

2.2 設計の考慮事項

TPS1213-Q1 ハイサイド スイッチ コントローラは、nLPM および INP 制御入力を使用して、外部メイン パワー パス FET と外部低消費電力パス FET を駆動できます。nLPM と INP を使用して低消費電力パス FET とメイン パワー パス FET を制御する方法については、表 2-1 を参照してください。

表 2-1. TPS1213-Q1 の INP と nLPM の真理値表

| パラメータ | INP (Low) | INP (High) |
|-------------|--|---|
| nLPM (Low) | nLPM を Low にプルすると、TPS1213-Q1 は強制的に低消費電力モードに入り、低消費電力パス FET (Q3) が駆動され、自動負荷ウェークアップが有効化されます。 | nLPM を Low にプルすると、TPS1213-Q1 は強制的に低消費電力モードに入り、低消費電力パス FET (Q3) が駆動され、自動負荷ウェークアップが有効化されます。 |
| nLPM (High) | nLPM を High にプルすると、TPS1213-Q1 は強制的にアクティブ モードに入ります。INP を Low にプルすると、メイン パワー パスの FET (Q2) がターンオフします。 | nLPM が High の場合、INP を High にプルすると、メイン パワー パス (Q2) がターンオンします。 |

車両の状態について議論する場合、低消費電力パスを使用することは、車両を駐車 (キーオフ) モードにして消費電力を最小化することと似ています。車が走行しているとき、ECU は通常動作を行う必要があるため、より大きな電流負荷をサポートおよび保護するためにメイン パスが使われます。TPS1213-Q1 は、構成可能な負荷ウェークアップ スレッシュホールドを、負荷電流が上回った際に、低消費電力モードからアクティブ モードに素早く移行するため、自動負荷ウェークアップ機能も備えています。すべての部品は、低消費電力モード動作時に I_Q が最小化されるように選択されています。低消費電力モードで INA296B-Q1 を無効化し、システムの I_Q をさらに低減するため、TPS22919-Q1 ロード スイッチを使用しました。

大きな突入電流を発生させる容量性負荷に備えて、低消費電力パスのゲートにゲート スルーレート制限回路が追加されているため、起動時にゲートをゆっくりと High に駆動することで、負荷コンデンサを充電できます。この方法を使って負荷コンデンサをプリチャージすることで、このリファレンス デザインで定義されている各種時間電流特性によって、突入電流が制限され、誤シャットダウンが防止されます。

I^2t ヒューズ アルゴリズムを実装するため、INA296B-Q1 および MSPM0L1306-Q1 デバイスを選択しました。INA296B-Q1 は高精度電流検出機能を備えており、その出力は MSPM0L1306-Q1 の ADC ペリフェラルに入力されます。アクティブ モードの電流を常に監視することで、過負荷イベントが発生した際に、ソフトウェア ベースの I^2t ヒューズ アルゴリズムに従って出力が即座にシャットダウンされ、ワイヤ ハーネスと負荷が保護されます。このリファレンス デザインには TPS1213-Q1 による短絡保護機能も備わっています。TPS1213-Q1 はメイン FET の V_{DS} を監視し、ハードウェアで構成可能な値を V_{DS} が上回ると、フォルトを知らせます。

最後に、INA296B-Q1 は単方向と双方向の両方の電流検出機能を備えているため、抵抗性、容量性、誘導性負荷を含む各種の負荷にこのリファレンス デザインは適しています。TPS1213-Q1 を使うと、逆電流を監視できますが、電源に逆電流が流れるようにするには、LM74704-Q1 理想ダイオード制御を除去する必要があります。

2.3 主な使用製品

2.3.1 TPS1213-Q1 45V、低 I_Q 、車載用ハイサイドスイッチコントローラ、低消費電力モードおよび可変負荷ウェークアップトリガ付き

TPS1213-Q1 は、保護および診断機能を備えた、45V、低 I_Q スマートハイサイドドライバです。本デバイスは、動作電圧範囲が 3V~40V と広く、12V のシステム設計に理想的です。このデバイスは、最低 -40V の負の電源電圧に耐えられ、負荷を保護できます。

本デバイスは、2 つのゲートドライブを備えており、1 つはメインパスの MOSFET を駆動するための 1.69A ソースおよび 2A シンク能力、もう 1 つは低消費電力パスのための 165 μ A ソースおよび 2A シンク能力です。

LPM = Low の低消費電力モードでは、低消費電力パスの FET をオン状態に維持し、メイン FET をオフにします。このモードでは、デバイスが消費するのは、35 μ A (標準値) という小さい I_Q です。アクティブ状態に移行するための自動負荷ウェークアップスレッシュホールドは、ISCP/LWU ピンを使用して調整できます。EN/UVLO が Low のとき、 I_Q は 1 μ A (標準値) まで減少します。このデバイスは、動作モード (アクティブモード、低消費電力モード) を示すため、WAKE 出力ピンを備えています。

このデバイスは、MOSFET VDS センシング、または外付けの RSNS 抵抗を使用して、短絡保護を調整可能です。自動リトライおよびラッチオフフォルト動作は設定可能です。このデバイスは、SCP_TEST 入力の外部制御を使用した、内蔵の短絡コンパレータを診断する機能も備えています。本デバイスは、短絡、チャージポンプ低電圧、入力低電圧条件時のオープンドレイン出力のフォルト (FLT) を表示します。

TPS1213-Q1 は、19 ピンの VSSOP パッケージで供給されます。

2.3.2 INA296x-Q1 AEC-Q100、-5V~110V、双方向、1.1MHz、8V/ μ s、超高精度電流センスアンプ

INA296x-Q1 は、電源電圧に関係なく、-5V~110V の広いコモンモード電圧範囲にわたってシャント抵抗両端での電圧降下を測定できる超高精度の双方向電流センスアンプです。低いオフセット電圧 (最大値 $\pm 10\mu$ V)、小さいゲイン誤差 (最大値 $\pm 0.01\%$)、高い DC CMRR (代表値 166dB) の組み合わせにより、高精度の電流測定を実現します。INA296x-Q1 は、高電圧の双方向 DC 電流測定だけでなく、1.1MHz の高い信号帯域幅と高速なセトリングタイムを持つ高速アプリケーション (過渡検出および高速過電流保護など) 向けに設計されています。

INA296x-Q1 は 2.7V~20V 単電源で動作し、消費電流は 2.5mA です。INA296x-Q1 については、次のゲインを持つ 5 種類のバリエーションを提供しています。10V/V、20V/V、50V/V、100V/V、200V/V。複数のゲインオプションにより、利用可能なシャント抵抗値と広い出力ダイナミックレンジ要件の間で最適化を行えます。

INA296x-Q1 は -40°C~+125°C の動作温度範囲で仕様が規定されています。

3 システム設計理論

3.1 低消費電力モードに関する考慮事項

すべての部品は、低消費電力モード時の消費電流が $40\mu\text{A}$ 未満になるように選択されました。この静止電流は主に TPS1213-Q1 から成ります。TPS1213-Q1 は、低消費電力パスの FET を駆動する際に、 $35\mu\text{A}$ という小さい I_Q を消費します。INA296B-Q1 はイネーブルピンを持っていないため、低消費電力モードでの INA296B-Q1 の状態を制御するのに、TPS22919-Q1 ロードスイッチを使用しました。表 3-1 に、低消費電力モードでのすべてのデバイスの静止電流を示します。

表 3-1. 部品の静止電流

| デバイス | I_Q (低消費電力モード) |
|--------------------------|--------------------|
| TPS1213-Q1 | $35\mu\text{A}$ |
| INA296B-Q1 | 該当なし |
| TPS22919-Q1 | $0.002\mu\text{A}$ |
| TPS7B81-Q1 | $2.7\mu\text{A}$ |
| LM74704-Q1 | $1\mu\text{A}$ |
| MSPM0L1306-Q1 (スタンバイモード) | $1.4\mu\text{A}$ |

図 3-1 に、TPS1213-Q1 の回路図を示します。低消費電力モードでは、LM74704-Q1 は無効化されるため、内部 FET ダイオード (Q1) の導通により、約 0.7V の出力電圧降下が見込まれます。

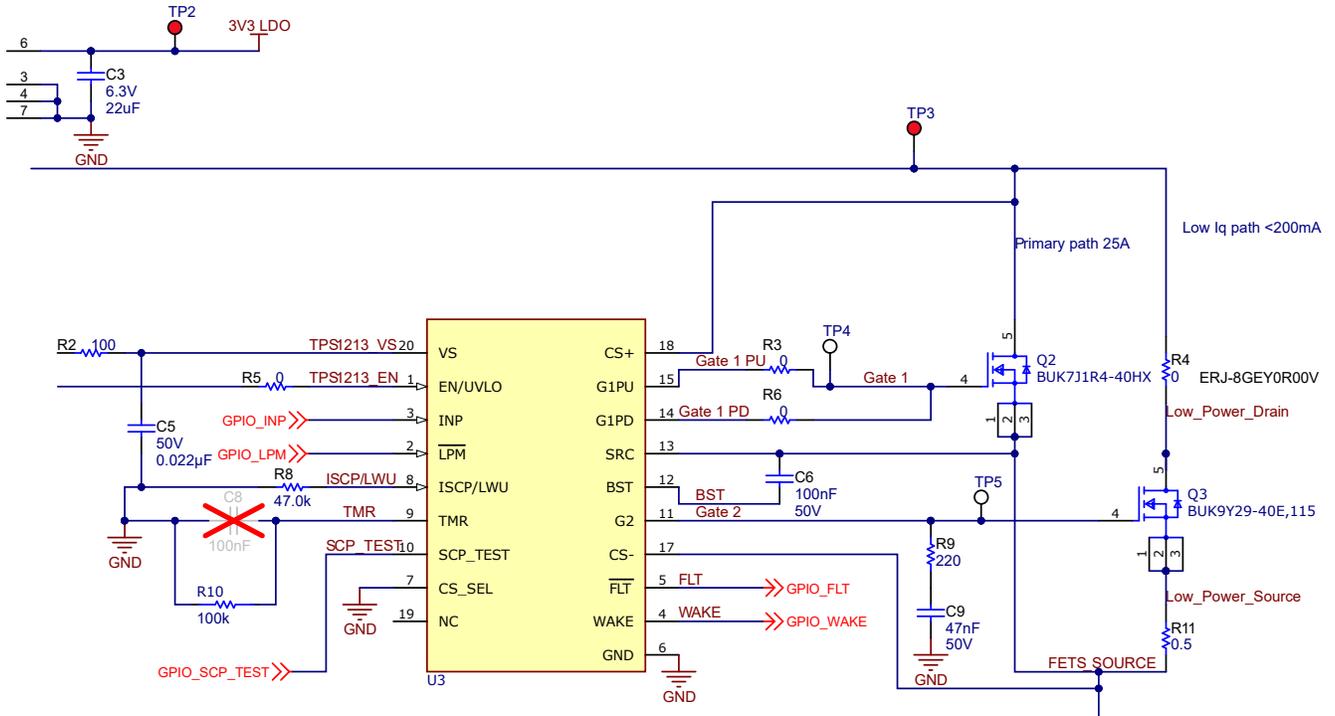


図 3-1. TPS1213-Q1 の回路図

負荷ウェークアップトリガ スレッショルド (この設計では 200mA) を選択するには、次の 式 1 を使います。

$$R_{\text{BYPASS}}(\Omega) = \frac{(2\mu\text{A} \times R_{\text{ISCP}} + 19\text{mV})}{I_{\text{LWU}}} - R_{\text{DSON_BYPASS}} \quad (1)$$

ここで、

- R_{ISCP} (R_8) は、式 5 を使って設定された短絡スレッショルドに基づいて選択される抵抗です。
- I_{LWU} は負荷電流ウェークアップ スレッショルドの目標値です。
- $R_{\text{DSON_BYPASS}} = 25.8\text{m}\Omega$ です。
- R_{BYPASS} は、負荷を短絡した状態で電源を投入した際の Q_3 の電流とストレスを制限するのにも役立ちます。

ハイサイド抵抗とローサイド抵抗のどちらが必要とされているかによって、 R_{BYPASS} として R_4 と R_{11} のどちらかを使用できます。

リリース前の TPS1213-Q1 シリコンの場合、式 1 の代わりに 式 2 を使います。

$$R_{\text{BYPASS}}(\Omega) = \frac{(2\mu\text{A} \times R_{\text{ISCP}} + 10\text{mV})}{I_{\text{LWU}}} - R_{\text{DSON_BYPASS}} \quad (2)$$

3.2 プリチャージ回路に関する考慮事項

起動時に容量性負荷によって生じる過剰な突入電流を制御するため、低消費電力パス用ゲートドライバ (G_2) に RC 回路を追加しました。外付けコンデンサ C_9 (C_g) はゲートターンオン スルーレートを小さくし、突入電流を制御します。

式 3 と 式 4 を使用して、10ms のプリチャージ時間仕様を設定しました。

$$C_g = \frac{C_{\text{Load}} \times I_{(G)}}{I_{\text{Inrush}}} \quad (3)$$

$$I_{\text{Inrush}} = \frac{C_{\text{Load}} \times V_{\text{BAT}}}{T_{\text{Charge}}} \quad (4)$$

ここで、

- $I_{(G)} = 165\mu\text{A}$ です。
- V_{BAT} は入力電圧を表します。
- I_{Inrush} はピーク突入電流の期待値を表します。
- T_{Charge} はプリチャージ時間の期待値を表します。

本システムは、MSPM0L1306-Q1 の制御によってこのプリチャージ状態に入ります。起動時、最初に低消費電力パスの FET が 15ms にわたってゆっくり駆動された後、本システムはアクティブ状態に遷移します。

注

プリチャージ時間を変更するため、 C_9 (C_g) を変更することもできますが、MSPM0L1306-Q1 は本システムを 15ms の間のみプリチャージ モードに維持します。

3.3 短絡保護

TPS1213-Q1 は設定可能な短絡保護機能を特長としています。 R_8 (R_{ISCP}) は SC 保護スレッショルドを設定します。この値は 式 5 を使って計算できます。

$$R_{\text{ISCP}}(\Omega) = \frac{I_{\text{SC}} \times R_{\text{DS(on)}} - 19\text{mV}}{2\mu\text{A}} \quad (5)$$

ここで、

- $R_{\text{DS(on)}} = 1.06\text{m}\Omega$

リリース前の TPS1213-Q1 シリコンの場合、式 5 の代わりに 式 6 を使います。

$$R_{ISCP}(\Omega) = \frac{I_{SC} \times R_{DS(on)} - 10mV}{2\mu A} \quad (6)$$

SC 保護スレッシュホールドとして 100A を設定するため、式 6 を使って R8 を 48k Ω と計算します。最も近い標準値である 47k Ω を選択しました。

C8 (C_{TMR}) を未実装のままにすると、6 μ s 未満の高速な SC 応答時間が選択されます。ただし、短絡応答時間を変更するには、式 7 を参照してください。

$$C_{TMR} = \frac{I_{TMR} \times t_{SC}}{1.1} \quad (7)$$

ここで、

- I_{TMR} は 80 μ A の内部プルアップ電流です。
- t_{SC} は短絡応答時間です。

R10 (R_{TMR}) は、SC イベント時のラッチオフ動作のために TMR ピンを Low にクランプする働きをします。同時に nFLT は Low をアサートするため、ユーザーは S2 または S3 を使ってラッチのクリアを試みる必要があります。ラッチオフ動作を自動再試行動作に変更するには、SC イベントからの自動回復について説明した 式 8 を参照してください。

$$t_{RETRY} = 22.7 \times 10^6 \times C_{TMR} \quad (8)$$

3.4 LM74704-Q1 対応

LM7404-Q1 のイネーブル状態は、常時オンにも、MSPM0L1306-Q1 によって制御されるようにも構成できます。図 3-2 は、R1 を実装すると、LM74704-Q1 が常に有効化されることを示しています。LM74704-Q1 のイネーブルは、MSPM0L1306-Q1 の GPIO 出力にも接続されています。R19 を実装すると、MSPM0L1306-Q1 は LM74704-Q1 のイネーブル状態を制御して、低消費電力モードでの I_Q を最小化できます。

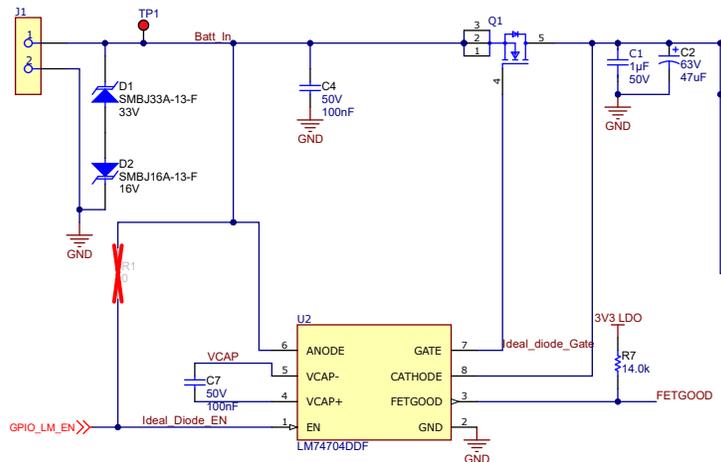


図 3-2. LM74704-Q1 のイネーブルの接続

注意

R1 と R19 を同時に実装しないでください。

3.5 ヘッダー

各種テスト条件に対応するため、複数の構成オプションがこのリファレンス デザインに追加されました。

3.5.1 INA296B-Q1 構成用ヘッダー

J3 と J4 はどちらも INA296B-Q1 の基準電圧を設定します。したがって、各種電流検出構成に応じて、表 3-2 に従ってジャンパを設定できます。図 3-3 に、INA296B-Q1 の回路図を示します。

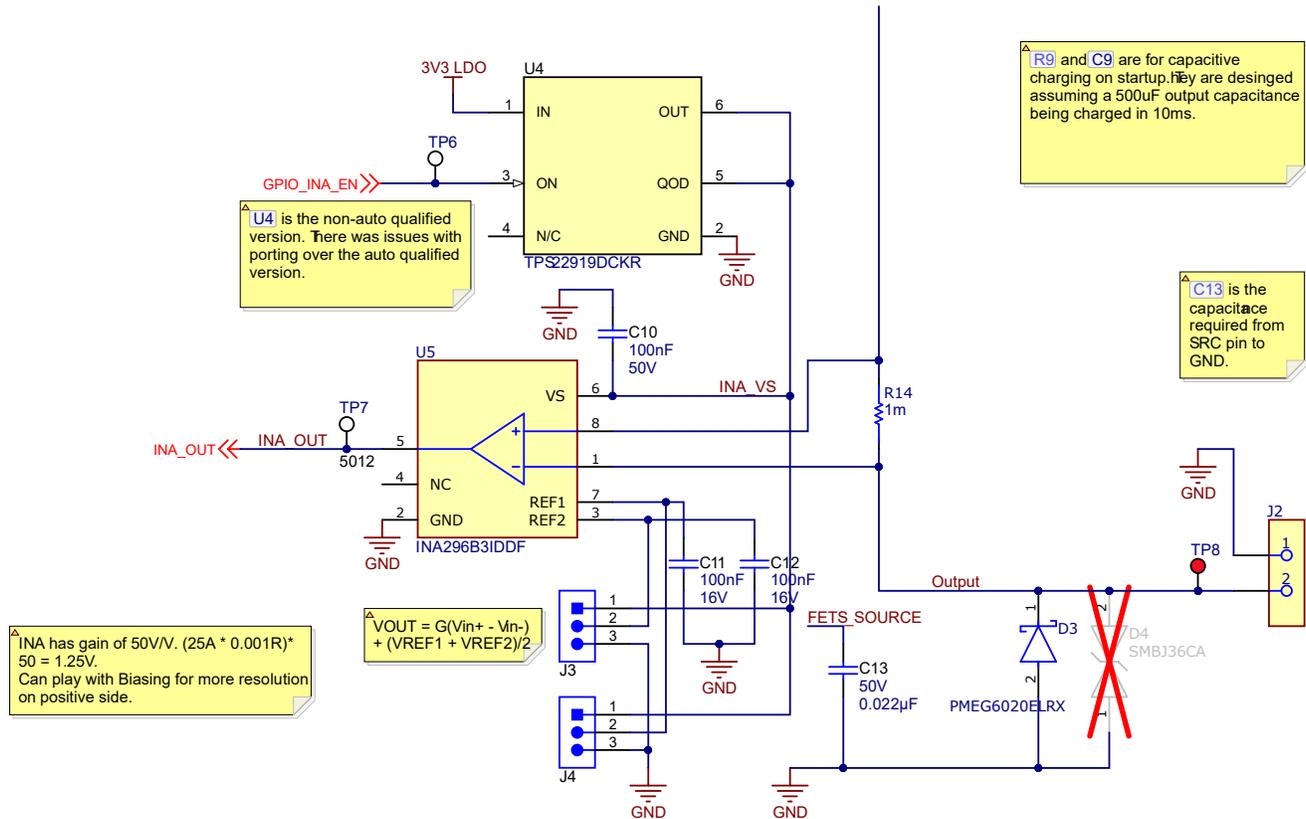


図 3-3. INA296B-Q1 の回路図

表 3-2. INA296B-Q1 構成

| J3 の設定 (V _{REF1}) | J4 の設定 (V _{REF2}) | 構成 |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| GND | GND | 単方向電流検出 (0A~66A) |
| GND | 3V3 | 双方向電流検出 (-33A~33A) |
| 3V3 | GND | 双方向電流検出 (-33A~33A) |
| 3V3 | 3V3 | 単方向逆電流検出 (-66A~0A) |

$$V_{OUT,INA} = G(V_{IN+} - V_{IN-}) + \frac{V_{REF1} + V_{REF2}}{2} \quad (9)$$

ここで、

- V_{OUT,INA} は電流検出出力です。
- V_{IN+} - V_{IN-} はシャント抵抗 R14 の両端の電圧降下です。
- G は電流検出アンプのゲインです (G = 50)。

注

TIDA-020065 ソフトウェアは逆電流監視用のロジックを特に何も備えていません。ソフトウェア ベースの I²t アルゴリズムは、順方向電流オプションの場合にのみ正しく動作します。

3.5.2 TPS1213-Q1 構成用ヘッダー

TPS1213-Q1 をテストするため、MSPM0L1306-Q1 とは別に複数のヘッダーが追加されました。

表 3-3. TPS1213-Q1 のジャンパ構成

| ジャンパ | ピン | 構成 | 説明 |
|------|----------|-----|---|
| J5 | INP | 3V3 | LPM = 3V3 の場合、メイン パワー バスの FET (Q2) をターンオンします。 |
| | | GND | LPM = 3V3 の場合、メイン パワー FET (Q2) をターンオフします。 |
| J6 | LPM | 3V | TPS1213-Q1 を強制的にアクティブ モードに設定します。これにより、低消費電力バスの FET (Q3) が無効化され、INP ピン (J5) を設定することで、メイン パワー バスの FET (Q2) をオンまたはオフに切り替えることができます。 |
| | | GND | TPS1213-Q1 を強制的に低消費電力モードに設定すると、低消費電力バスの FET (Q3) がターンオンし、メイン パワー バスの FET (Q2) が無効化されます。 |
| J8 | SCP_TEST | 3V3 | 短絡保護の診断に使用されます。この設定により、TPS1213-Q1 内の短絡フラグが強制的に立ちます。 |
| | | GND | TPS1213-Q1 内の短絡フラグが解除されます。 |

注意

MSPM0L1306-Q1 がフラッシュ書き込み済みであり、かつ基板に実装されている場合、J5、J6、J8 の使用は推奨しません。使用する場合、MSPM0L1306-Q1 の損傷を防止するため、J7 を使って nRST を GND に接続します。

3.6 ソフトウェアに関する考慮事項

図 3-4 に、TIDA-020065 の動作を最もよく表しているステート マシンを示します。最初に、MCU が起動し、プリチャージモードに移行して、15ms にわたって負荷コンデンサを充電します。この 15ms の期間が経過した後、nLPM を High にプルすることで、本システムはアクティブ モードに遷移します。

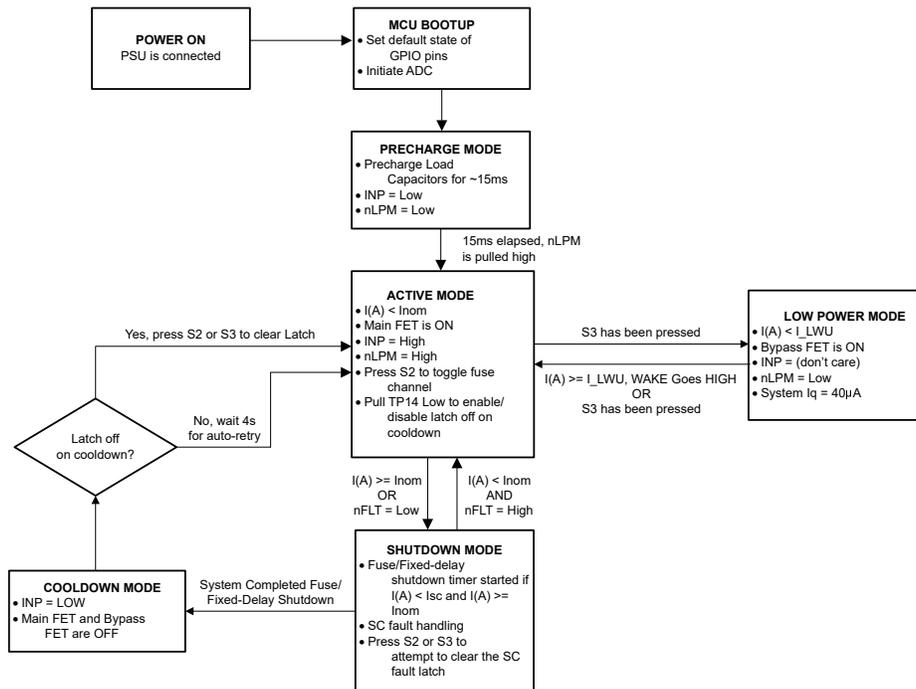


図 3-4. TIDA-020065 のステート マシン

アクティブ状態では、最大 30A の負荷に対応するメイン FET が駆動されます。S3 を押すと、本システムをアクティブモードから低消費電力モードに遷移させることができます。S2 を使うと、設定された時間電流ヒューズ特性を切り替えることもできます。

MSPM01306 の ADC パリフェラルは、アクティブ モードの出力電流を定期的に監視するため、100 μ s ごとにサンプリングを行います。過負荷電流が検出されると、本システムは即座にアクティブ モードからシャットダウン モードに遷移します。電流パルスがアクティブである期間の長さとそのパルスの高さに応じて、ソフトウェアは、設定された時間電流特性を使用して、[図 3-5](#) に示す電流範囲にわたって、ワイヤ ハーネスと負荷を保護します。

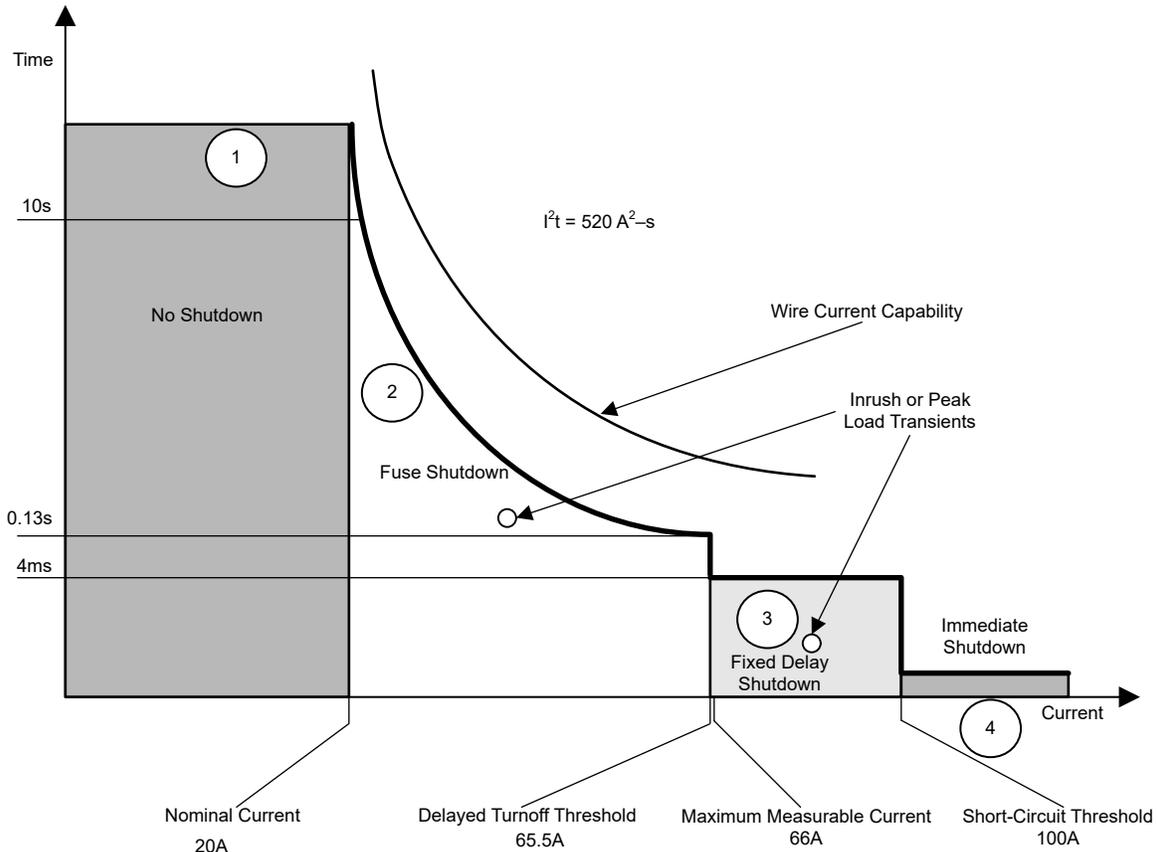


図 3-5. TIDA-020065 の時間電流特性

ソフトウェアの I^2t アルゴリズムは、実際の溶断式ヒューズの挙動を再現します。つまり、ピーク負荷過渡またはその他の過電流がワイヤの電流能力を超え、車両の配線を損傷させる前に、出力が遮断されます。 I^2t アルゴリズムは、[式 10](#) によって最もよく説明されます。

$$t_{\text{Shutdown}} = \frac{I^2t}{I_{\text{Load}}^2 - I_{\text{Nom}}^2} \quad (10)$$

ここで、

- I^2t は溶断式ヒューズ定数です。
- I_{Nom} は、使用するヒューズ チャンネルの電流定格の公称値です。
- t_{Shutdown} は、過電流が検出された際のヒューズのシャットダウン時間の期待値です。

実際のヒューズをより的確にシミュレートするため、ADC サンプルが取得されるたびに、 I_{load} の測定値から I_{nom} を減算します。この追加により、スマートヒューズは I_{nom} スレッショルドで動作でき、通常の負荷過渡によって誤ってシャットダウンすることを回避できます。

監視可能な電流の最大値 (この設計では 66A) までしか I^2t アルゴリズムを実行できないという制限を回避するため、SC スレッショルドまでは一定時間で出力をシャットダウンするための固定遅延シャットダウン スレッショルドが追加されています。この設計では、固定遅延シャットダウン時間として 4ms が選択されていますが、本システムで許容される電流パルスに応じてこの時間を設定してください。

ヒューズ シャットダウンと固定遅延シャットダウンのどちらかが発生すると、本システムはクールダウン モードに移行します。このモードでは、INP が Low にプルされ、本システムは過負荷イベントから回復できます。デフォルトでは、MSPM0L1306-Q1 は出力を回復させるため、自動的に 4s 以内に再び INP を High にプルします。その一方で、TP14 を Low にプルすることで、クールダウン モードでラッチオフ動作を行うようにソフトウェアを構成することもできます。その場合、S2 または S3 を押すことでユーザー入力が受信されるまで、出力は無期限にオフ状態に維持されます。この挙動を溶断型ヒューズと比較すると、溶断型ヒューズの場合、交換が必要である一方、この設計の場合、リセット可能な過電流保護が実現できることがわかります。より現実的なアプリケーションでは、ワイヤ ハーネスを冷却するのに十分な時間が確実に経過するように、ソフトウェアは車両の配線の熱的条件を考慮します。

即時にシャットダウンを行うには、TPS1213-Q1 の短絡保護機能が使用されます。ハードウェア障害が検出されたことを MSPM0L1306-Q1 に知らせるため、nFLT が Low にプルされます。この状態で S2 または S3 を押すと、INP がトグルされ、TPS1213-Q1 の SC 保護ラッチがクリアされます。

3.6.1 ヒューズ チャンネルの定義

TIDA-020065 のソフトウェアには、4 種類のヒューズ チャンネルが実装されています。表 3-4 に、これらのチャンネルの時間電流特性を示します。

表 3-4. ヒューズ チャンネルの定義

| チャンネル数 | I_{NOM} (A) | I^2t (A2s) | ヒューズ シャットダウン後のクールダウン (s) | ソフトウェア電流制限 (A) | 固定遅延シャットダウンのパルス幅 (ms) | 固定遅延シャットダウン後のクールダウン (s) |
|--------|---------------|--------------|--------------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 15 | 340 | 4 | 65.5 | 4 | 4 |
| 2 | 20 | 520 | 4 | 65.5 | 4 | 4 |
| 3 | 25 | 1000 | 4 | 65.5 | 4 | 4 |
| 4 | 30 | 1500 | 4 | 65.5 | 4 | 4 |

すべてのチャンネルの即時シャットダウン スレッショルドは、ハードウェア部品によって 100A に固定されています。TPS1213-Q1 は、SC イベント時、ラッチオフ動作を行い、最速 (6 μ s 未満) でシャットダウンするように構成されています。

3.6.2 ソフトウェア機能

表 3-5 に、ソフトウェア機能に関連する部品の説明を示します。

表 3-5. ソフトウェア機能

| 部品 | 機能 | 説明 |
|------|------------------------------|---|
| S1 | MCU のリセット | S1 を押すと、nRST が Low にプルされます。これにより、MSPM0L1306-Q1 はリセットされます。 |
| S2 | ヒューズ チャンネルの切り替え | S2 を押すと、D9 がある回数減し、どのヒューズ チャンネルが使用されているかを示します。例: D9 が 2 回減する場合、本システムはヒューズ チャンネル 2 を使用しています。 |
| S3 | 電力モードの切り替え | 本システムを低消費電力モードからアクティブ モードへ遷移させます。 |
| TP13 | SCP_Test 診断 | TPS1213-Q1 の SCP_Test 入力ピンを切り替えるため、TP13 を GND にプルします。SCP_Test はデフォルトで Low であり、短絡保護の診断に使用されます。 |
| TP14 | クールダウン モードでのラッチ オフの有効化または無効化 | クールダウン時のラッチオフを有効化または無効化するには、TP14 を GND にプルします。TP14 はデフォルトで無効化されています。有効化されている場合、クールダウン時のラッチオフが有効化されていることを示すため、D9 が 2 回減します。過電流フォルトが発生した場合、ラッチをクリアし、出力を回復させるには、S2 または S3 を押します。無効化されている場合、クールダウン時のラッチオフが無効化されていることを示すため、D9 が 1 回減します。クールダウン時には、MSPM0L1306-Q1 は自動的に 4s 以内に出力を回復させます。 |

表 3-6 に示すように、このボードにはインジケータ LED も実装されています。

表 3-6. LED インジケータと説明

| LED | 名称 | 説明 |
|-----|------------------|---|
| D6 | 出力オン | 出力がオンであり、いかなるフォルトによってもシャットダウンされていないことを示します。D6 を有効化するには、J9 にジャンパを配置します。 |
| D7 | LPM オン | 本システムが低消費電力モードに入っていることを示します。D7 を有効化するには、J10 にジャンパを配置します。(低消費電力モードで電流測定を行う場合、J9 と J10 のジャンパを取り外します。) |
| D8 | フォルト検出 | 過電流が検出されたこと、または TPS1213-Q1 の nFLT ピンが Low になったことを示します。 |
| D9 | ヒューズ チャネル インジケータ | 使用されているヒューズ チャネルを示します。例: D9 が 2 回点滅する場合、本システムはヒューズ チャネル 2 を使用しています。 |
| D5 | nFLT Low | TPS1213-Q1 の nFLT ピンが Low になったことを示します。 |

3.7 オプションの出力 TVS ダイオード

D4 はオプションの TVS ダイオードのフットプリントです。

TVS ダイオードが必要な場合、TPS1213-Q1 と一緒に SMBJ36CA を使うことを推奨します。

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

4.1 ハードウェア要件

TIDA-020065 を評価するには、DC 電源と負荷が必要です。

4.2 ソフトウェア

TIDA-020065 ソフトウェアは MSPM0 SDK 1.10.0.05 を使って開発されました。

4.3 テスト構成

図 4-1 に、TIDA-020065 の代表的な構成を示します。入力 は DC 電源に接続され、出力は電子負荷に接続されています。

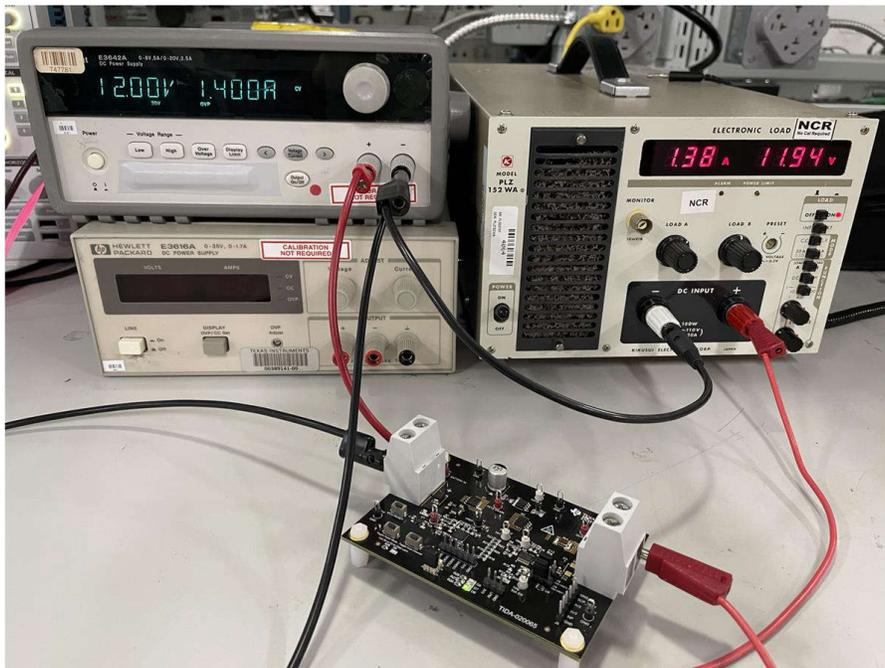


図 4-1. TIDA-020065 の代表的な構成

4.4 テスト結果

4.4.1 状態遷移

低消費電力モードとアクティブモード間の状態遷移のテスト構成には、LM53625xQEVM 降圧コンバータと、定電流モードに構成された 150W の電子負荷によるシンプルな車載 ECU のエミュレーションが含まれます。

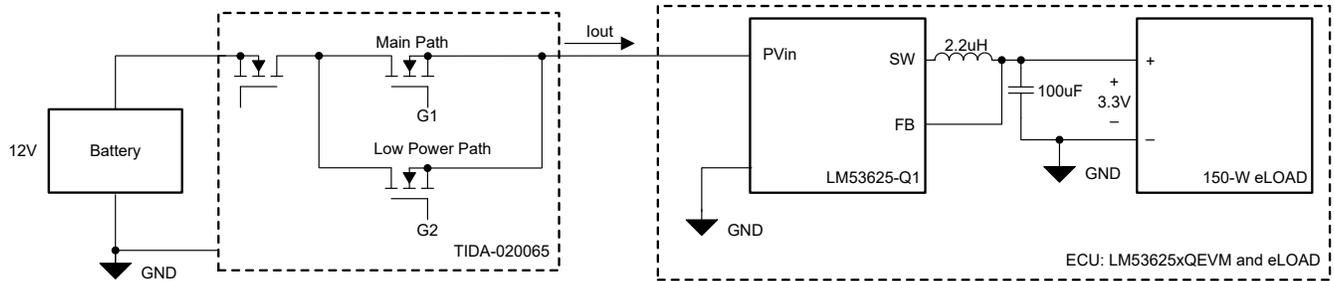


図 4-2. 状態遷移テストのブロック図

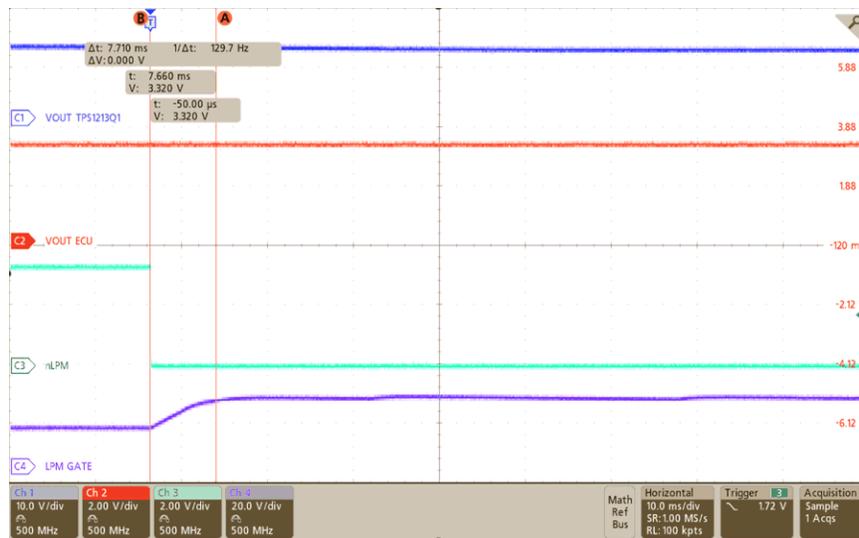


図 4-3. アクティブモードから低消費電力モードへ

図 4-3 では、S3 を押すことで、MSPM0L1306-Q1 による本システムの低消費電力モードへの移行がトリガされ、テストが開始されます。この状態では、nLPM と INP はどちらも Low にプルされ、メイン パスではなく低消費電力パスを駆動するように TPS1213-Q1 に信号が送られます。

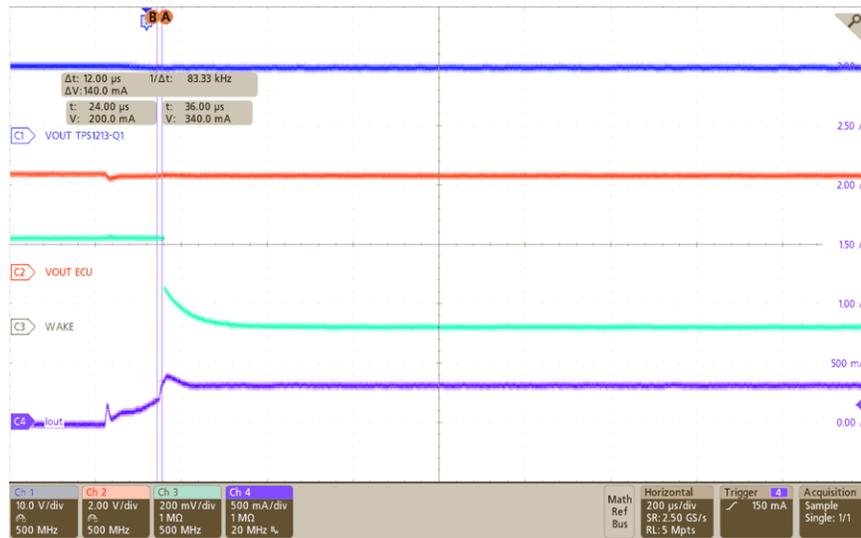


図 4-4. 自動負荷ウェークアップ

図 4-4 では、最初、本システムは低消費電力モードに入っていますが、電子負荷が作動し、200mA の自動負荷ウェークアップ スレッシュホールドを交差します。TPS1213-Q1 は、低消費電力パスを使用する状態からメイン パスを使用する状態に 12 μ s 未満で自動的に遷移します。同時に、WAKE 信号が Low をアサートし、システム全体をアクティブ モードに遷移させるように MSPM0L1306-Q1 に警告します。

4.4.2 低消費電力モードでのシステム I_Q

このテストでは、低消費電力モードの電流を測定するため、V_{BAT} 入力に電流計を直列に接続しました。出力には負荷を接続していません。図 4-5 は、MCU がない場合のシステム I_Q に相当し、図 4-6 は、MCU がある場合のシステム I_Q に相当します。



図 4-5. MCU がない場合のシステム I_Q

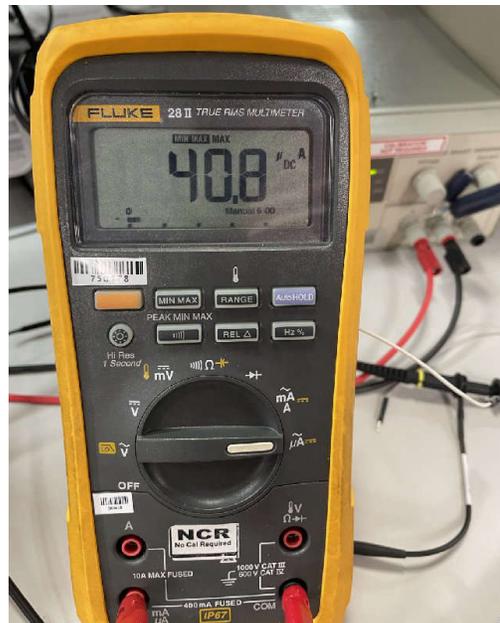


図 4-6. MCU がある場合のシステム I_Q

4.4.3 プリチャージ テスト

このテストでは、1000 μ F の容量性負荷に対する TIDA-020065 の応答を解析します。

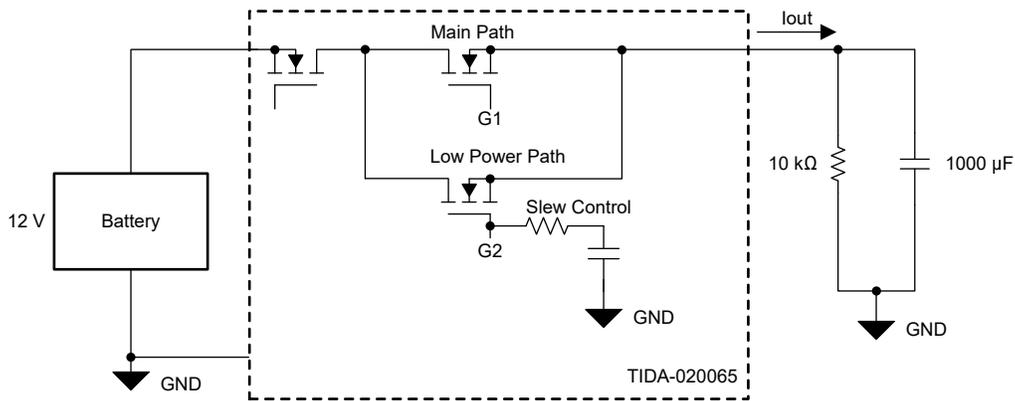


図 4-7. 静電容量充電テストのブロック図

図 4-8 に、電源投入時にシステムが即座にプリチャージモードに入る様子を示します。ハードウェアでは、低消費電力パスを低速で駆動するようにスルーレート制御が設定されているため、負荷コンデンサは 10ms で充電されます。これは、ピーク電流パルスが約 10ms 持続する理由を説明しています。15ms 後、MSPM0L1306-Q1 はメイン FET ゲート (G1) を駆動することで、本システムをアクティブモードに遷移させます。このテストで使用した電流プローブは 5A/V に固定されていたため、実際に測定されたピーク電流は約 1.3A でした。

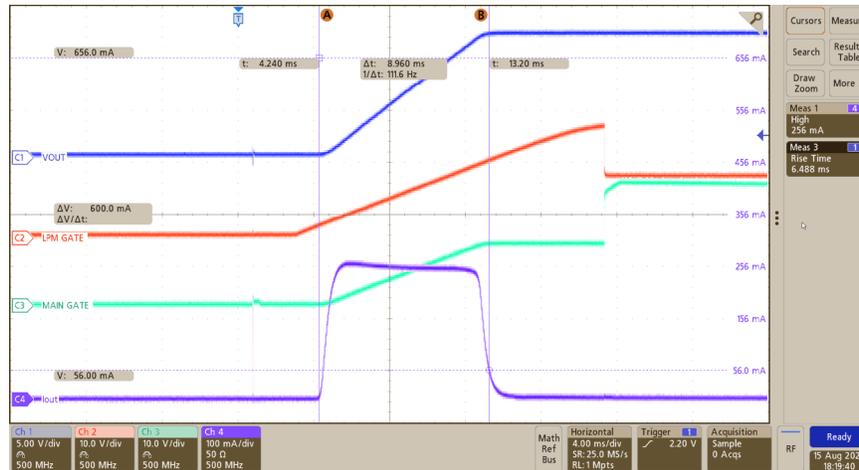


図 4-8. 1000 μ F 負荷のプリチャージ

4.4.4 過電流保護

ソフトウェア ベースの時間電流特性を検証するためのテスト構成には、LM53625xQEVM がバスから除かれていることを除き、同様の構成 (図 4-2 を参照) が含まれます。1000W の電子負荷を TIDA-020065 の出力に直接接続し、その負荷を定抵抗モードに設定します。

このテストでは、ヒューズ チャンネル 3 を使います。つまり、 $I_{nom} = 25A$ 、 $I^2t = 1000A^2s$ です。負荷に 36A の一定の過電流が流れた場合、シャットダウン時間は 1.49s と見込まれます。 I^2t アルゴリズムが INP をプルダウンし、出力をシャットダウンするのに 1.523s かかります。

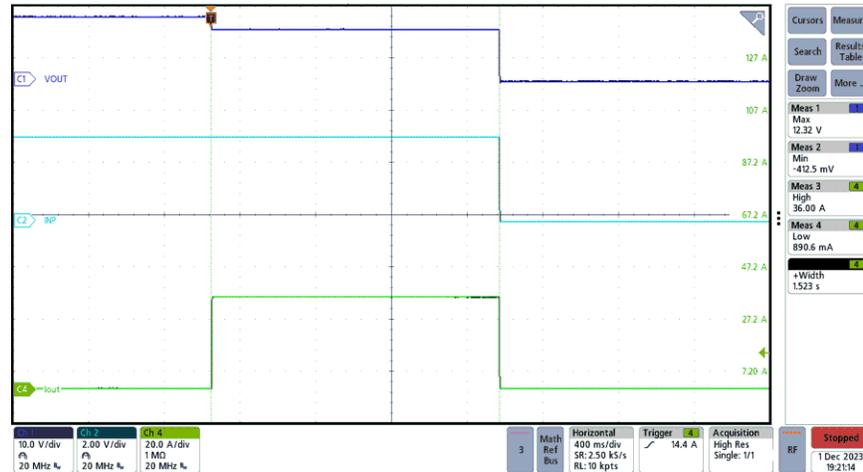


図 4-9. 過電流イベント ($I_{nom} = 25A$ 、 $I^2t = 1000A^2s$)

図 4-10 と 図 4-11 の両方は、それぞれヒューズ チャンネル 1 とヒューズ チャンネル 2 を使用した I^2t シャットダウン テストの結果を示しています。

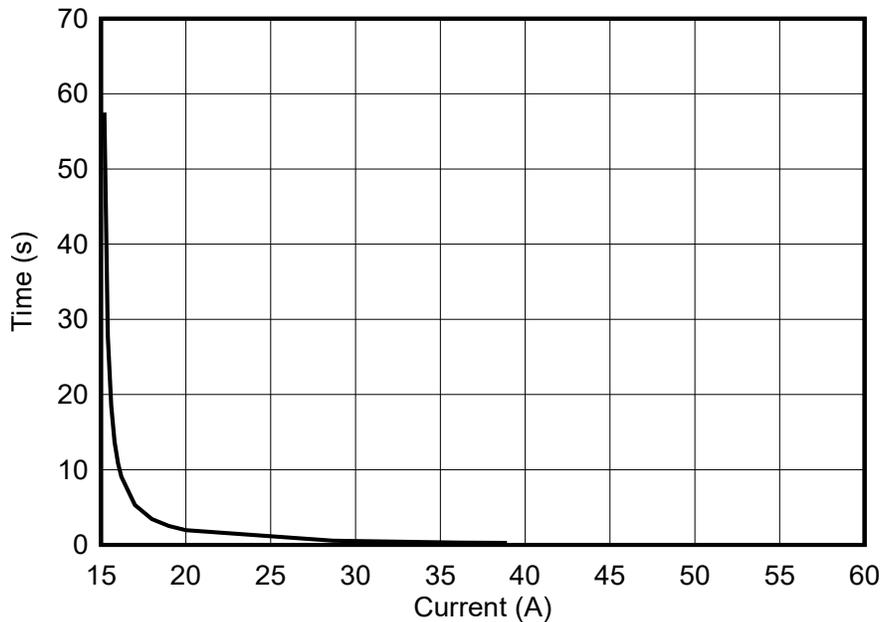


図 4-10. ヒューズ チャンネル 1 の I^2t テスト ($I_{nom} = 15A$ および $I^2t = 340A^2s$)

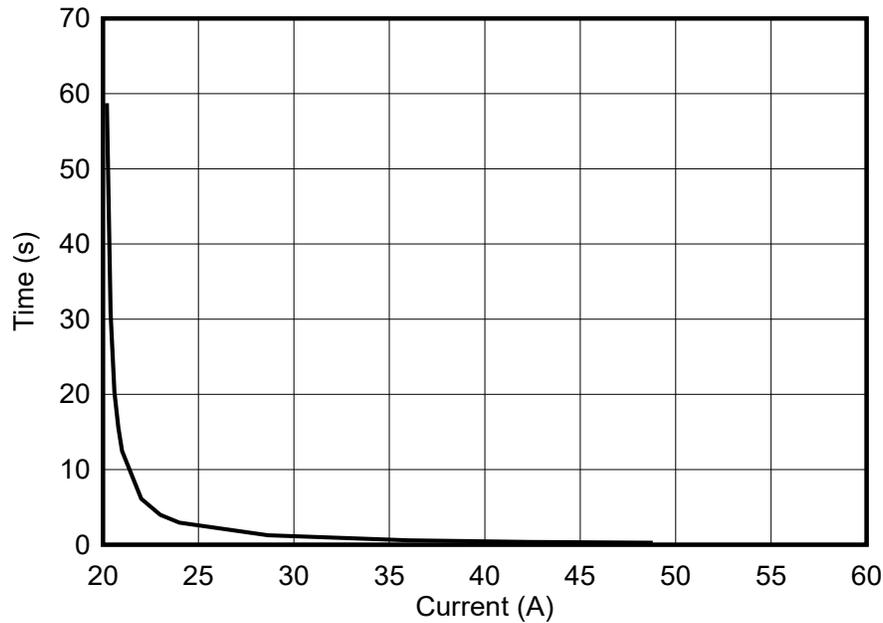


図 4-11. ヒューズ チャンネル 2 の I^2t テスト ($I_{nom} = 20A$ および $I^2t = 520A^2s$)

最大 65.5A の過電流に対するヒューズの I^2t 動作に加えて、固定遅延シャットダウンの挙動も示されています。

このテストでは、固定遅延スレッショルドをソフトウェアで 65.5A に設定しました。図 4-12 に示すように、65.5A のパルスはこの設計の監視可能な最大電流に近いため、パルスが 4ms の間アクティブになると、MSPM0L1306-Q1 は INP を Low にアサートし、出力をシャットダウンします。

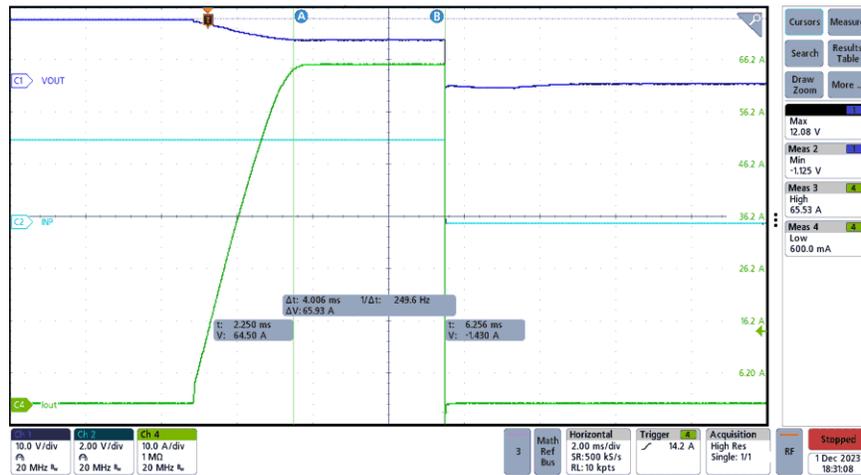


図 4-12. 固定遅延シャットダウン イベント

4.4.5 PWM 過電流

このテストの目的は、各種電流スパイクを受けた際の TIDA-020065 の挙動を示すことです。負荷が 20A、 I^2t 定数が $340A^2s$ 、 I_{nom} が 15A の場合、1.94s 以内にシャットダウンが発生すると見込まれます。その一方で、1.65s にわたる各種の過電流期間では I^2t シャットダウンは発生しません。PWM 負荷電流の周期は 3.3s です。

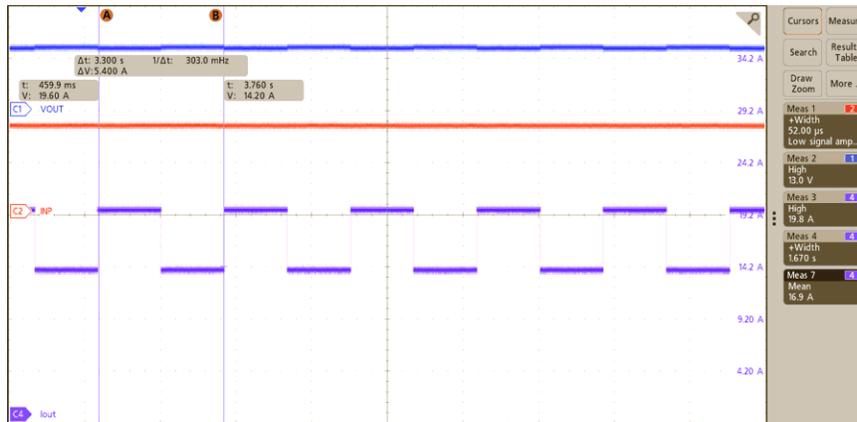


図 4-13. PWM 過電流テスト

4.4.6 短絡保護

このテストでは、最初に電子負荷を 5A でターンオンし、定抵抗モードに設定しました。次に、TPS1213-Q1 の短絡イベントを開始させるため、電子負荷の「短絡」オプションをクリックしました。図 4-14 に示すように、TPS1213-Q1 が 6 μ s 未満でメインゲートをターンオフする前に、電流は約 85A まで急増します。この状態では、nFLT は Low をアサートし、S2 または S3 が押されるまで、メインゲートはオフ状態にラッチされます。これにより、INP をトグルしてラッチをクリアするように、MSPM0L1306-Q1 に信号が送られます。ラッチが正常にクリアされると、nFLT は High をアサートし、フォルトがクリアされたことを MCU に警告します。図 4-15 に、短絡イベントから正常に回復した例を示します。

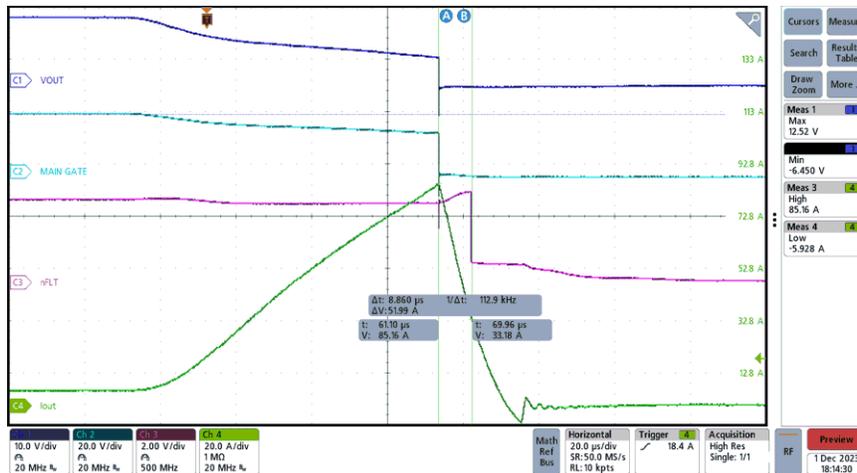
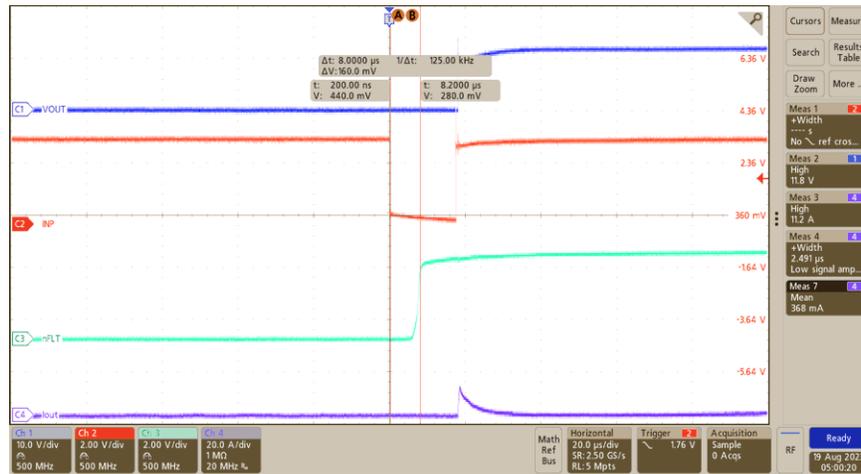
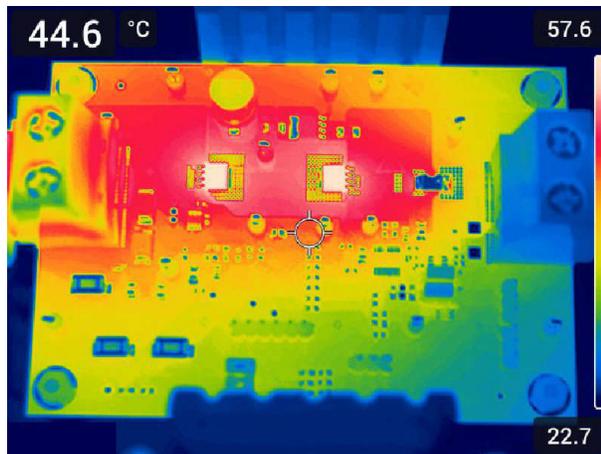
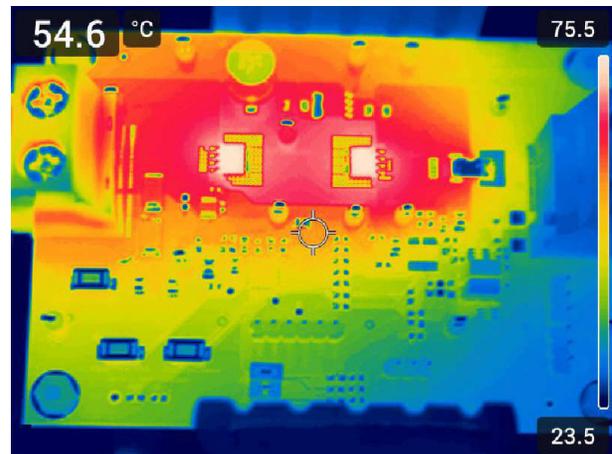


図 4-14. 短絡イベント


図 4-15. 短絡ラッチのクリア

4.4.7 温度テスト

TIDA-020065 の放熱特性は、25A と 30A の両方の連続電流においてキャプチャされました。これらのテストではどちらも、サーマル カメラによるスクリーンショットをキャプチャする前に、本システムは熱平衡状態に達することができました。室温は 25°C であるため、**図 4-17** では 55.5°C の FET 温度上昇が観測されました。


図 4-16. 25A 負荷 (熱平衡状態)

図 4-17. 30A 負荷 (熱平衡状態)

4.4.8 CISPR-25 エミッション テスト

セクション 4.4.8.1 と セクション 4.4.8.2 に、TIDA-020065 の EMI 特性を示します。これらのテストは、完全に最適化されたレイアウトを使わなくても、TIDA-020065 の部品が CISPR-25 要件に合格することを示しています。テストは、0.15MHz ~ 108MHz の周波数範囲の CISPR-25 伝導エミッションと、0.15MHz ~ 5.925GHz の周波数範囲の放射エミッションについて行われました。

伝導エミッションと放射エミッションのテストでは、以下のテスト条件で電磁波が測定されました。

- 環境ノイズフロア (EUT 電源遮断時)
- EUT 低消費電力モード (CE は 120mA、RE は無負荷)
- EUT 無負荷
- EUT 3A 負荷

ここで、

- EUT は TIDA-020065 を表します。

4.4.8.1 伝導エミッション テスト

図 4-18 に、伝導エミッション (CE) テストの構成を示します。テストには電圧プローブ法を使用しました。12V 車載バッテリーも LISN に接続されています。LISN は車載バッテリーの隣の青い箱です。EUT は絶縁素材の上に置かれており、出力に 4Ω の負荷が接続されています。 4Ω の負荷はローカルに接地されているため、EUT はアクティブ状態で 3A を駆動します。

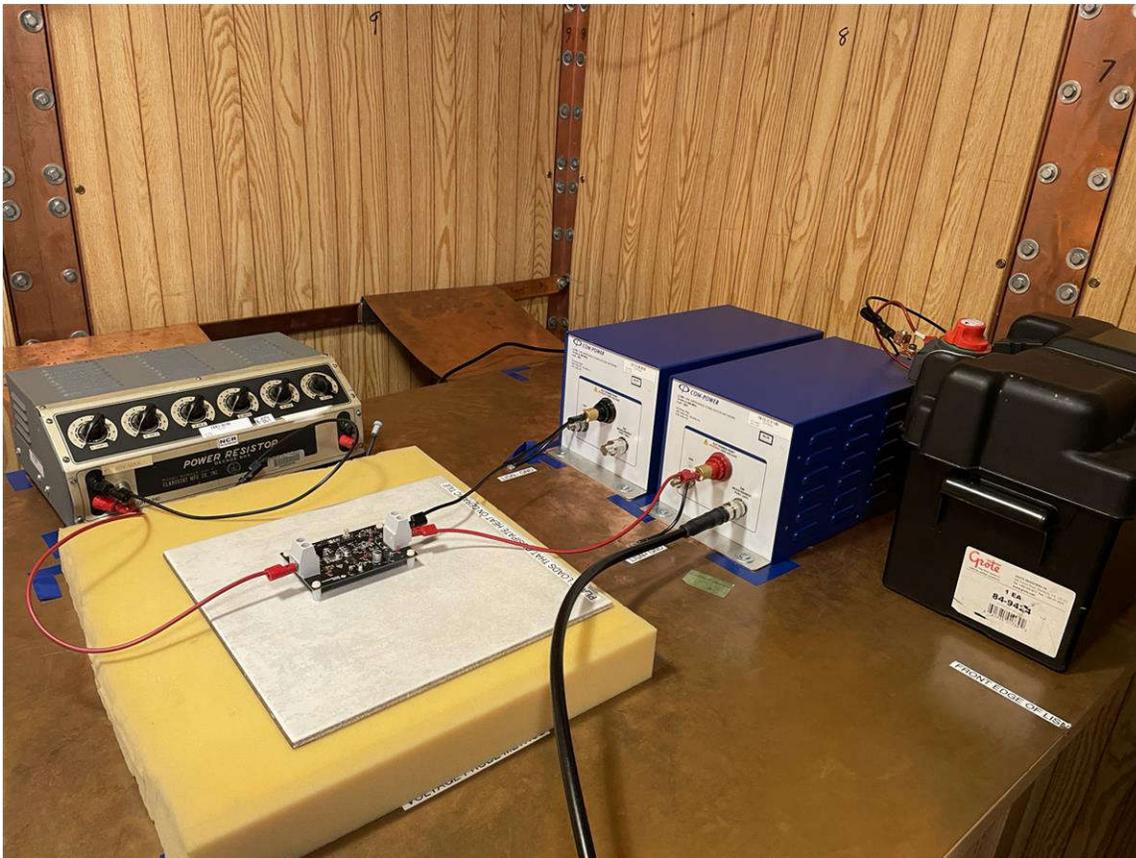
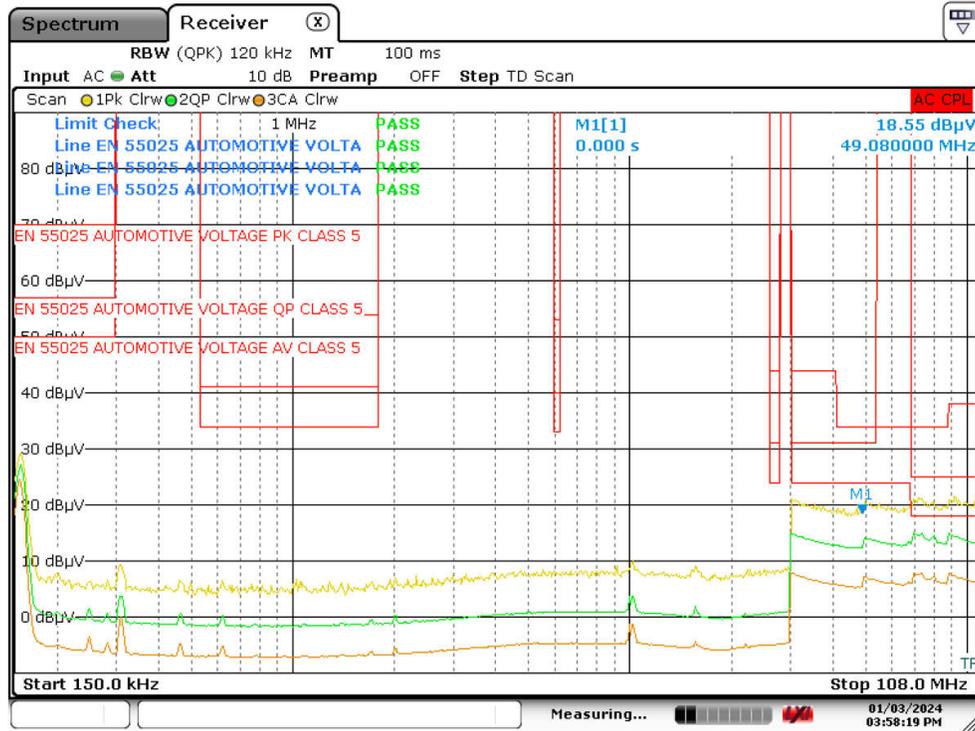
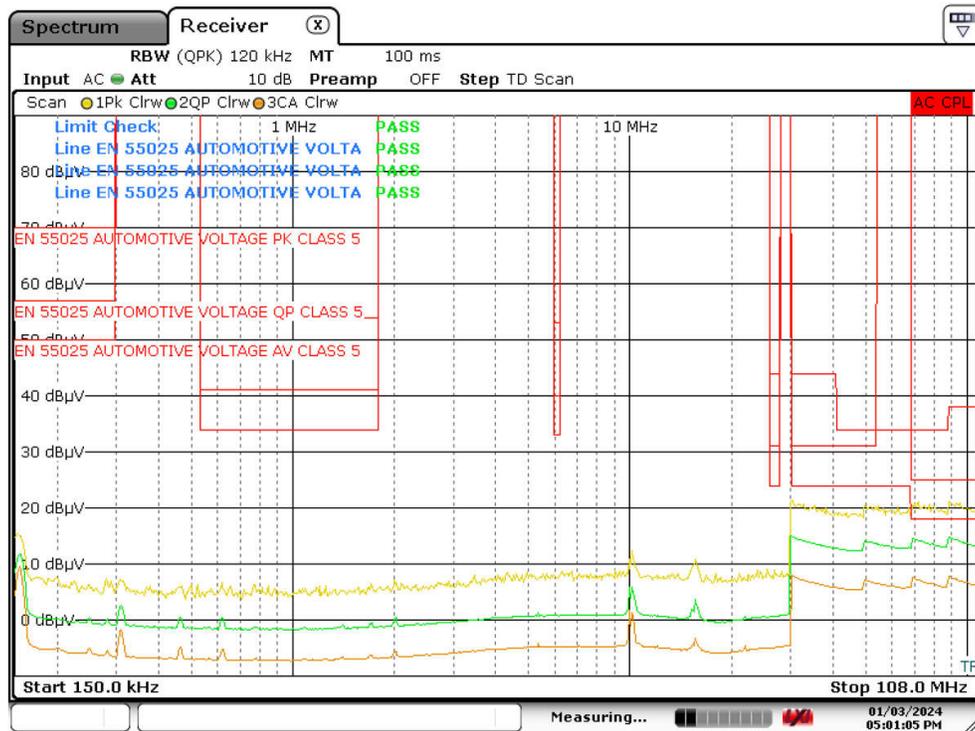


図 4-18. 伝導エミッション テスト構成



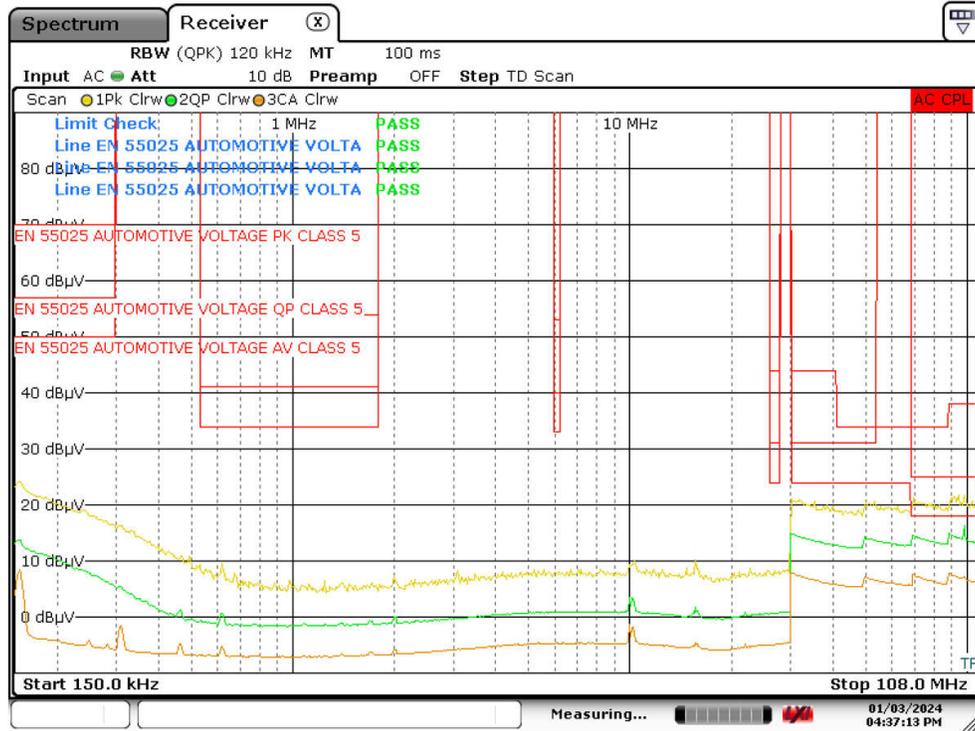
Date: 3.JAN.2024 15:58:18

図 4-19. CE 環境ノイズフロア (0.15MHz~108MHz)



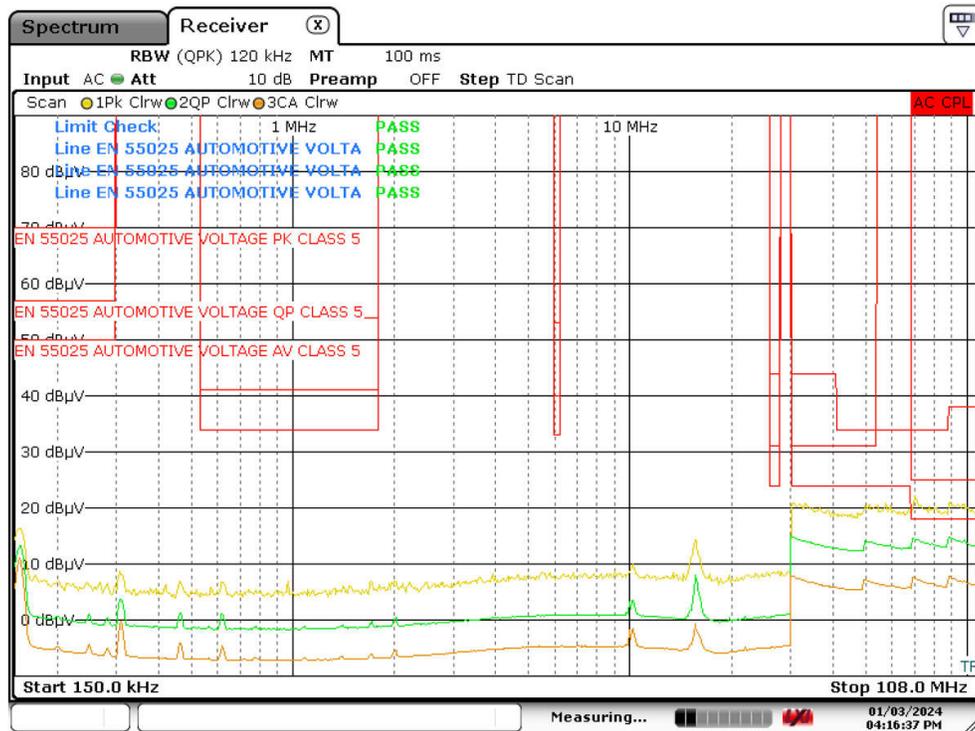
Date: 3.JAN.2024 17:01:05

図 4-20. CE 低消費電力モード (0.15MHz~108MHz)



Date: 3.JAN.2024 16:37:13

図 4-21. CE 無負荷 (0.15MHz~108MHz)



Date: 3.JAN.2024 16:16:36

図 4-22. CE 3A 負荷 (0.15MHz~108MHz)

4.4.8.2 放射エミッション テスト

CISPR-25 の全周波数範囲の信号を取り込むため、4 種類のアンテナを使って放射エミッション (RE) テストを実施しました。これらのテストには、12V 車載バッテリーと LISN を使います。EUT を LISN に接続すると、 4Ω の負荷が EUT から LISN に配線され、EUT の実際のアプリケーションがよりの確に再現されます。モノポール、バイコンカル (双円すい)、ホーンアンテナを使用したテストでは、低消費電力モードと無負荷のテストは示されていません。これらの測定値は環境ノイズフロアと酷似しているためです。

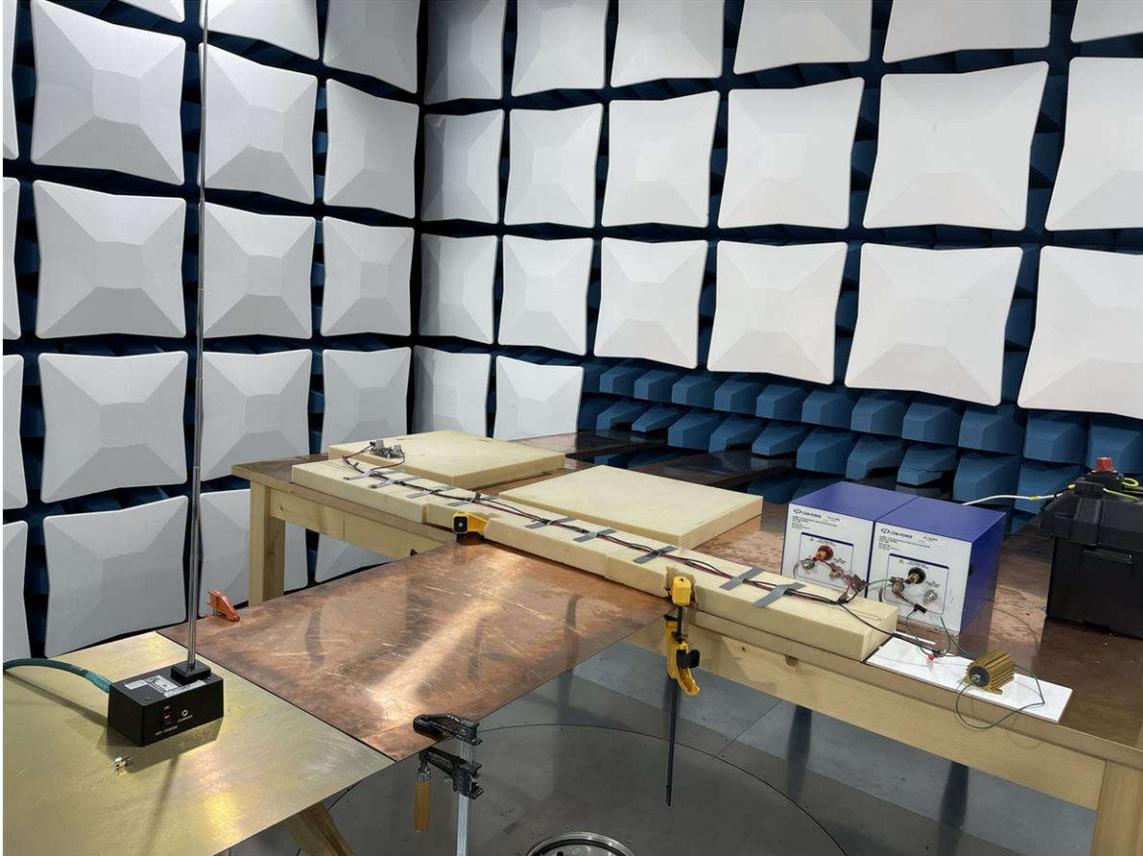


図 4-23. モノポール アンテナを使用した RE 構成:0.15MHz~30MHz

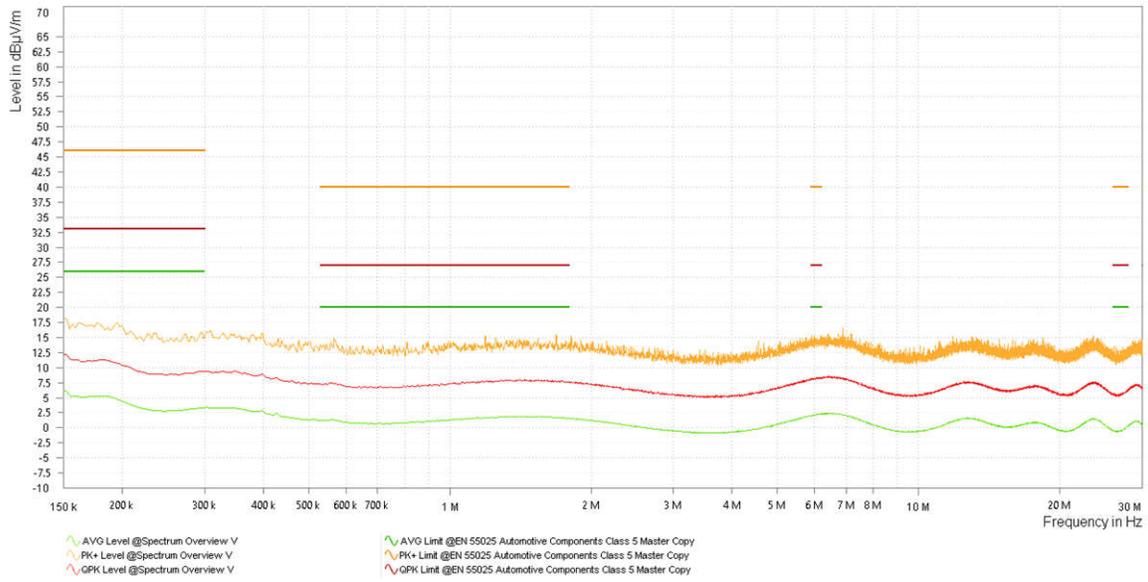


図 4-24. RE 環境ノイズフロア:0.15MHz~30MHz

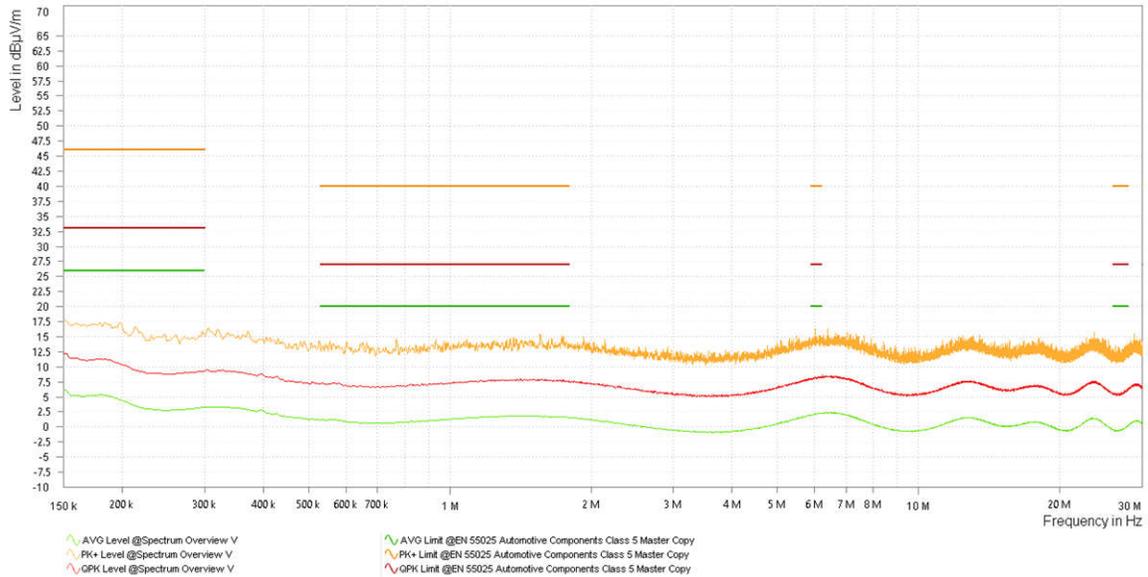


図 4-25. RE 3A 負荷:0.15MHz~30MHz



図 4-26. バイコニカル アンテナを使用した RE 構成:30MHz~200MHz

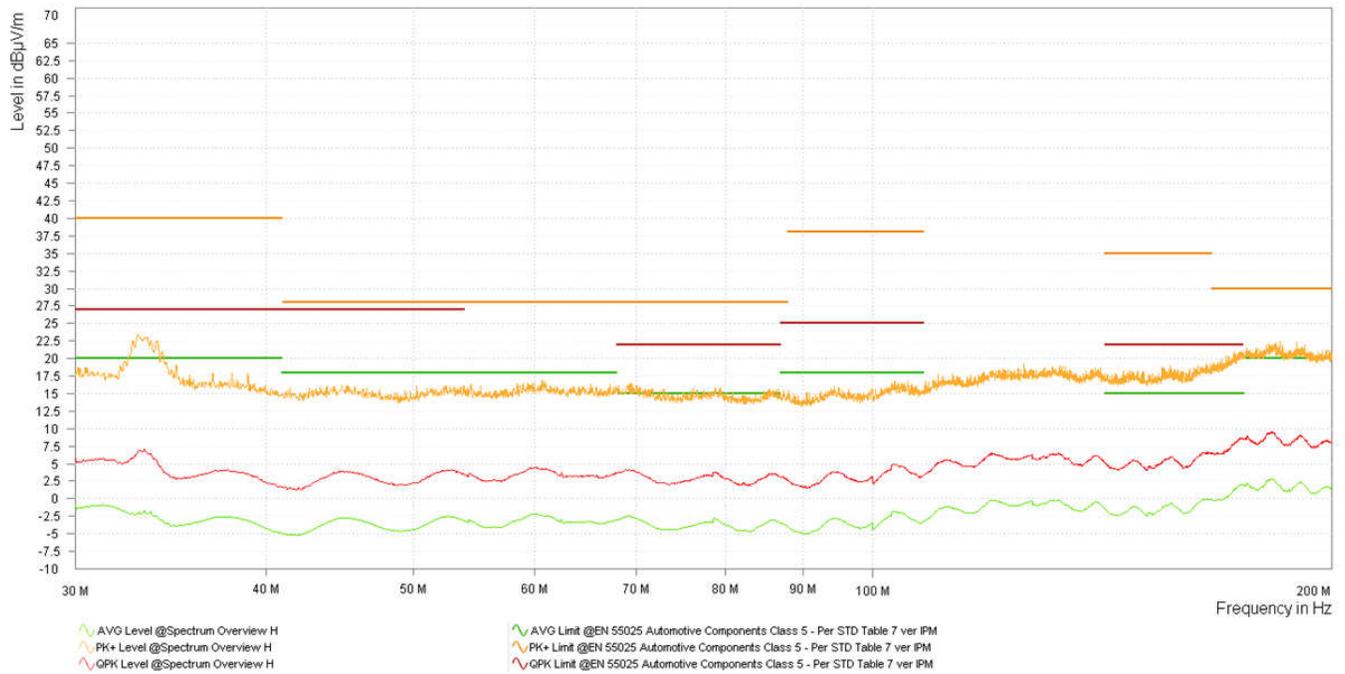


図 4-27. RE 環境ノイズ フロア (水平アンテナ):30MHz~200MHz

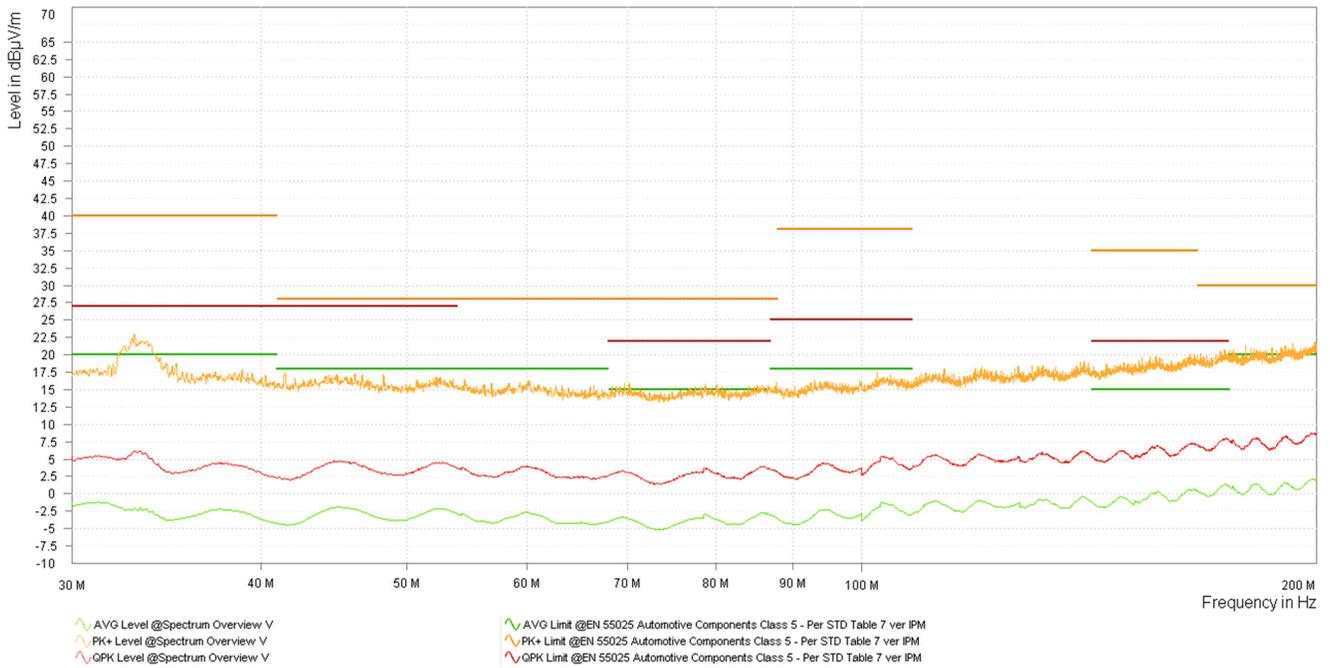


図 4-28. RE 環境ノイズフロア (垂直アンテナ): 30MHz~200MHz

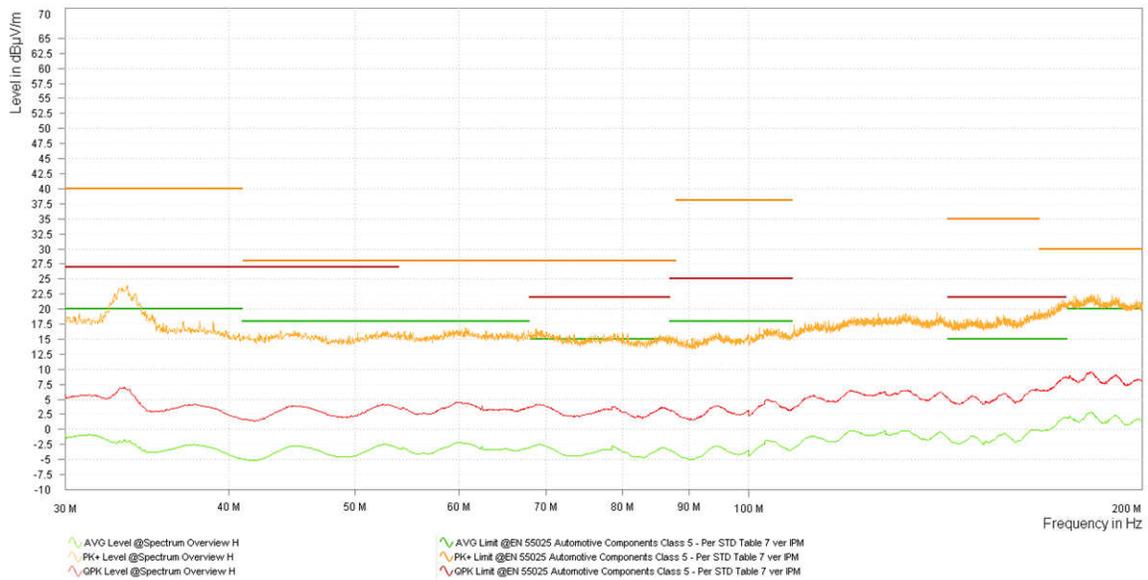


図 4-29. RE 3A 負荷 (水平アンテナ): 30MHz~200MHz

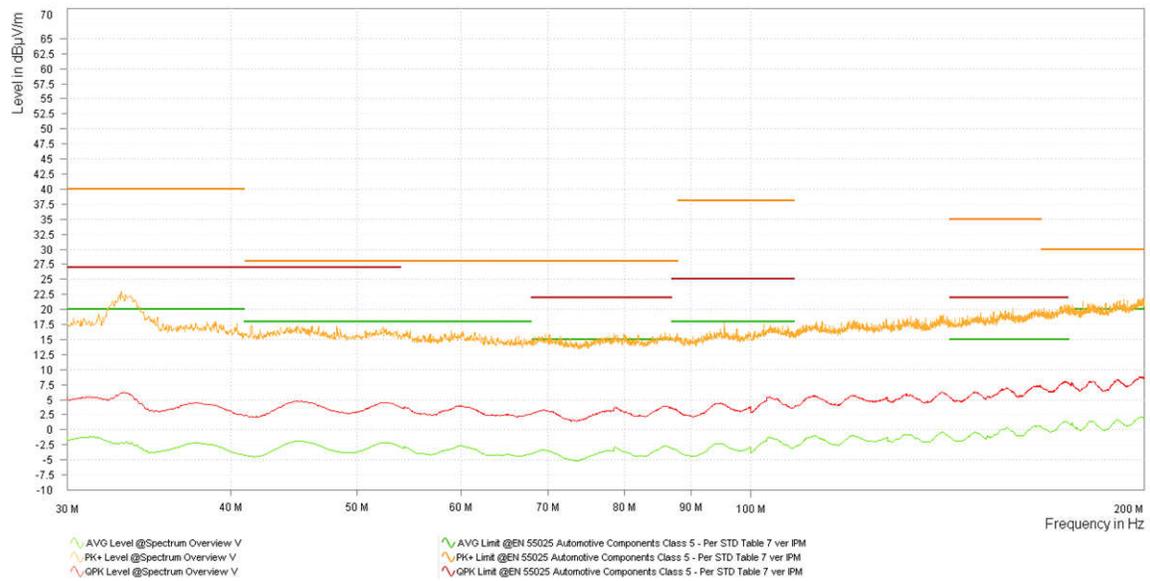


図 4-30. RE 3A 負荷 (垂直アンテナ):30MHz~200MHz

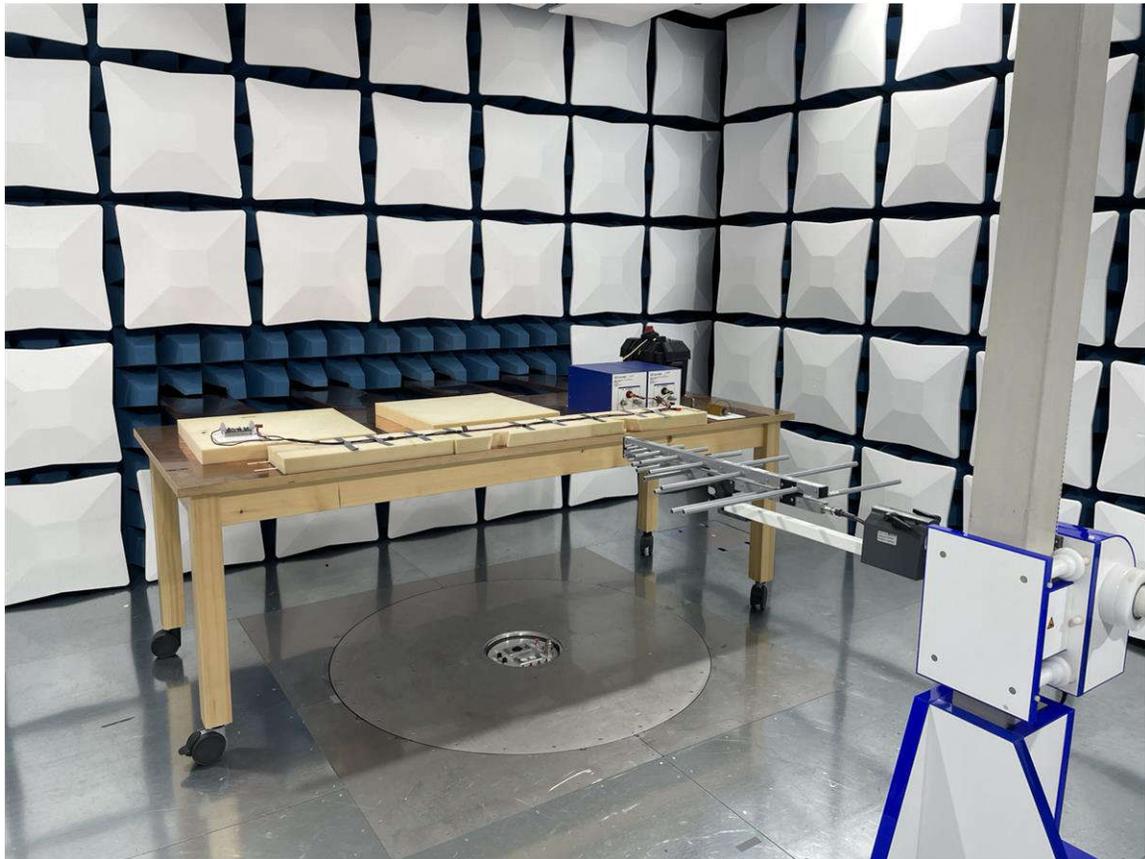


図 4-31. 対数アンテナを使用した RE 構成:200MHz~1GHz

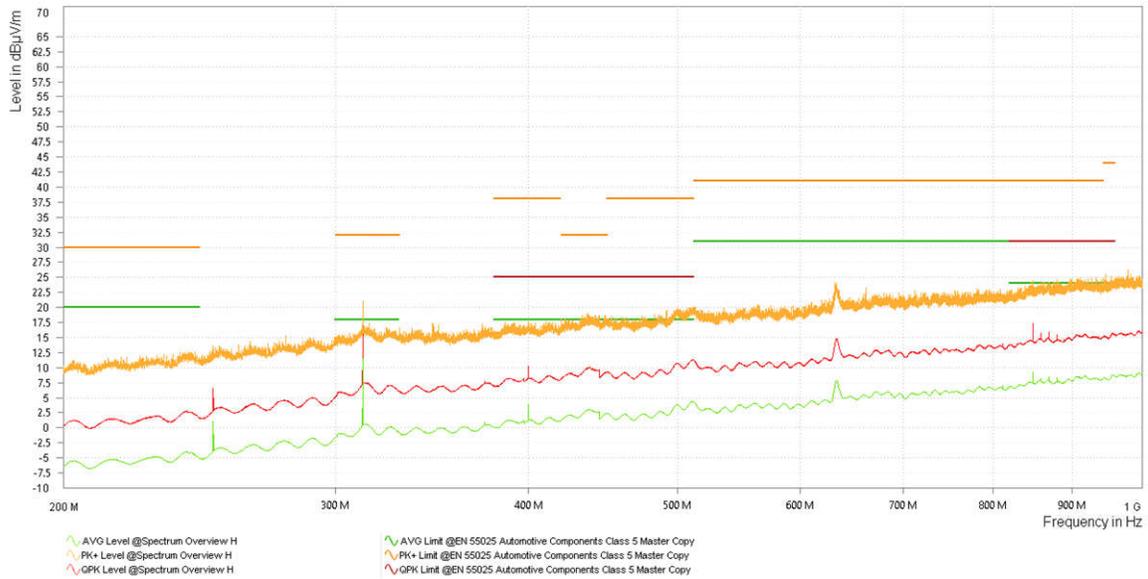


図 4-32. RE 環境ノイズフロア (水平アンテナ): 200MHz~1GHz

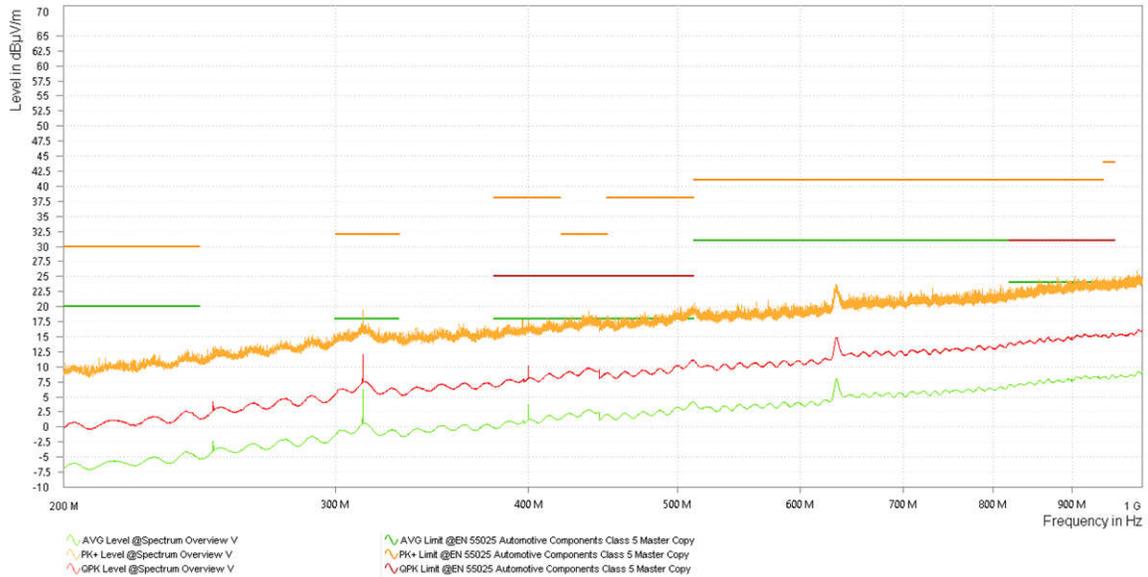


図 4-33. RE 環境ノイズフロア (垂直アンテナ): 200MHz~1GHz

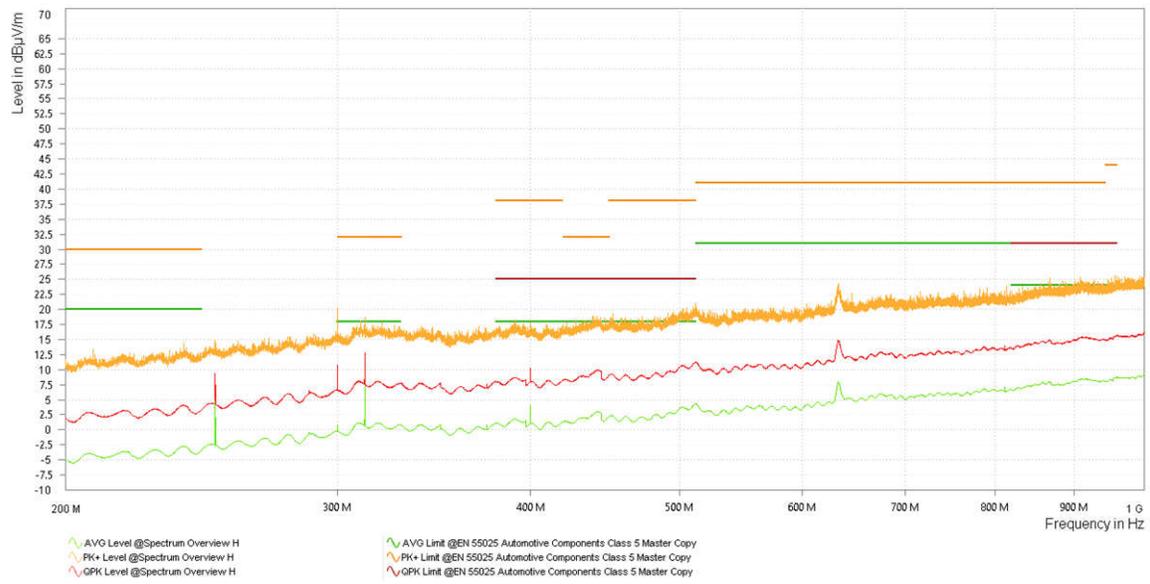


図 4-34. RE 低消費電力モード (水平アンテナ):200MHz~1GHz

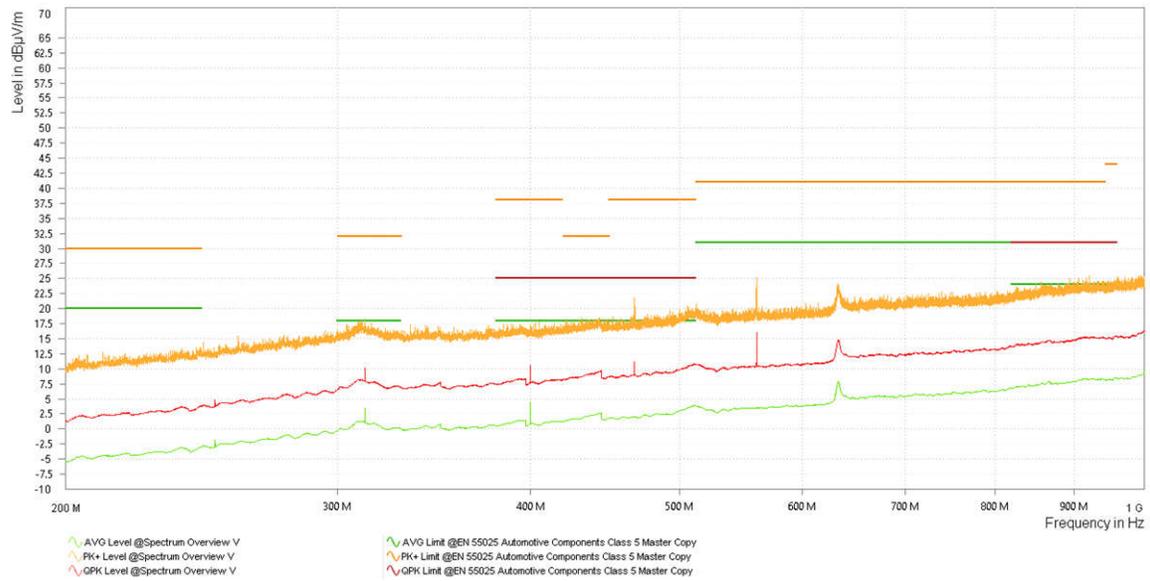


図 4-35. RE 低消費電力モード (垂直アンテナ):200MHz~1GHz

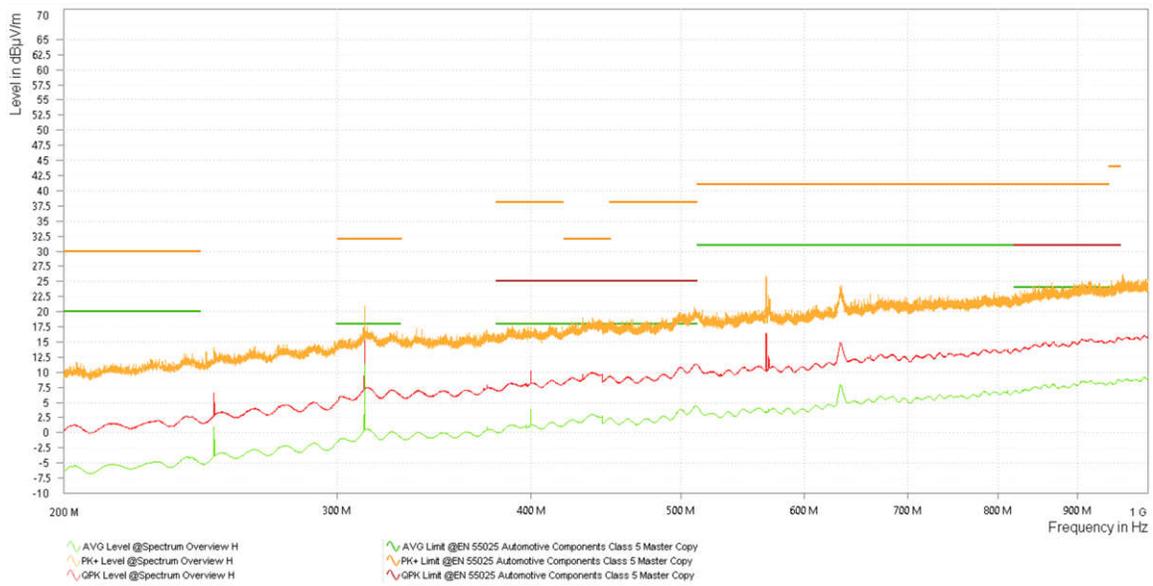


図 4-36. RE 無負荷 (水平アンテナ):200MHz~1GHz

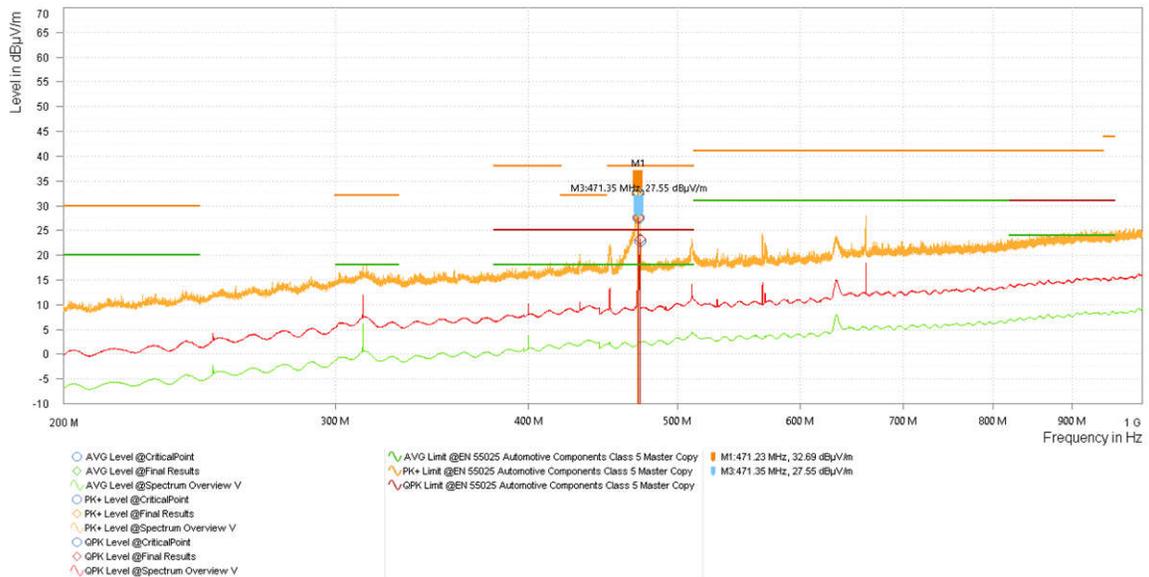


図 4-37. RE 無負荷 (垂直アンテナ):200MHz~1GHz

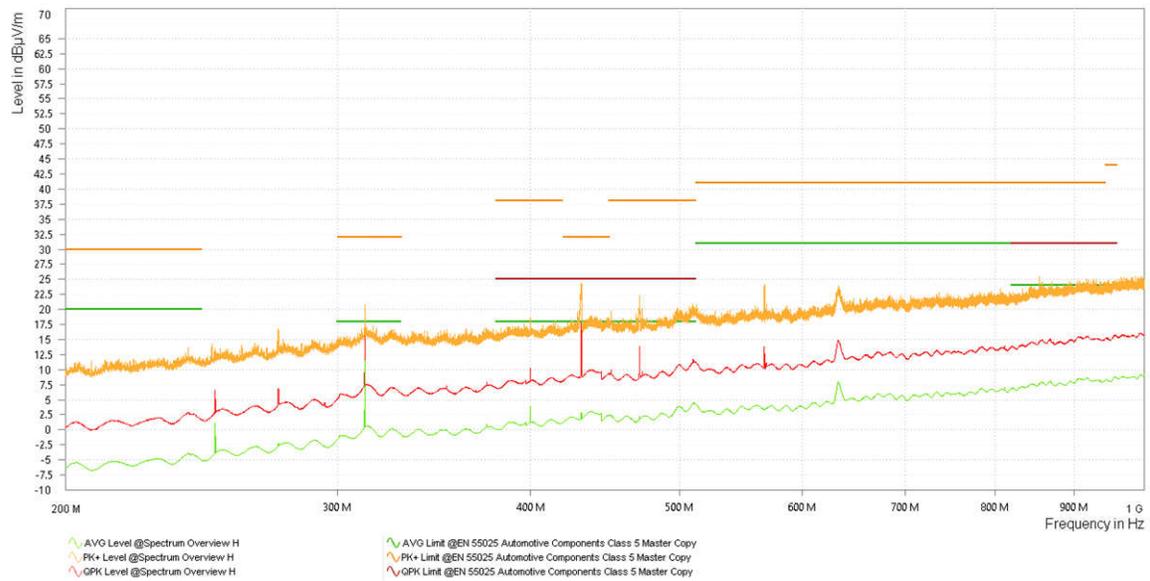


図 4-38. RE 3A 負荷 (水平アンテナ): 200MHz~1GHz

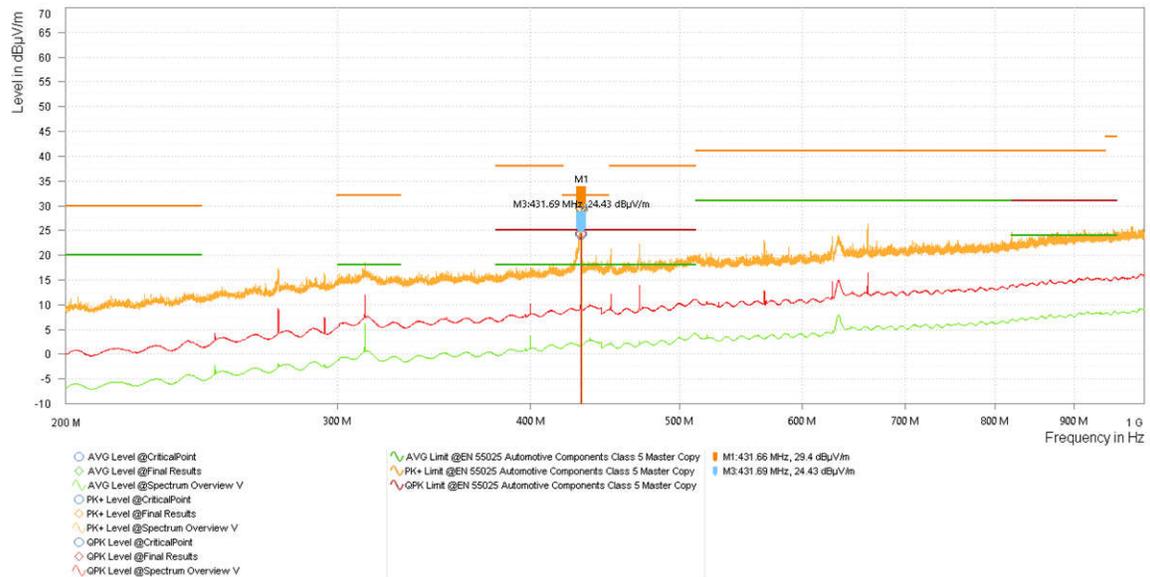


図 4-39. RE 3A 負荷 (垂直アンテナ): 200MHz~1GHz



図 4-40. ホーン アンテナを使用した RE 構成: 1GHz~5.925GHz

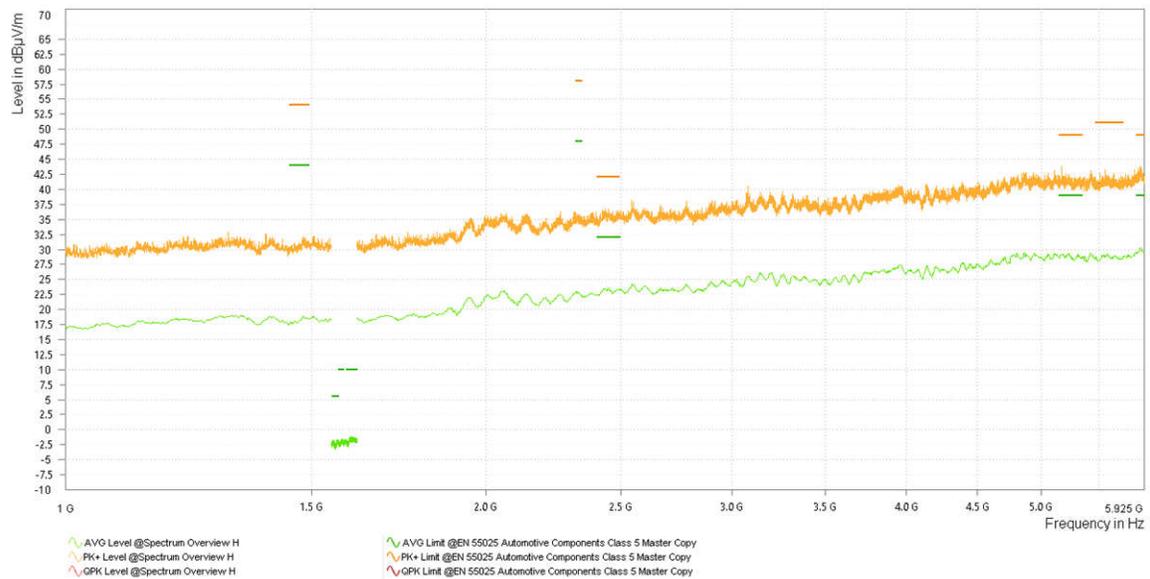


図 4-41. RE 環境ノイズ フロア (水平アンテナ): 1GHz~5.925GHz

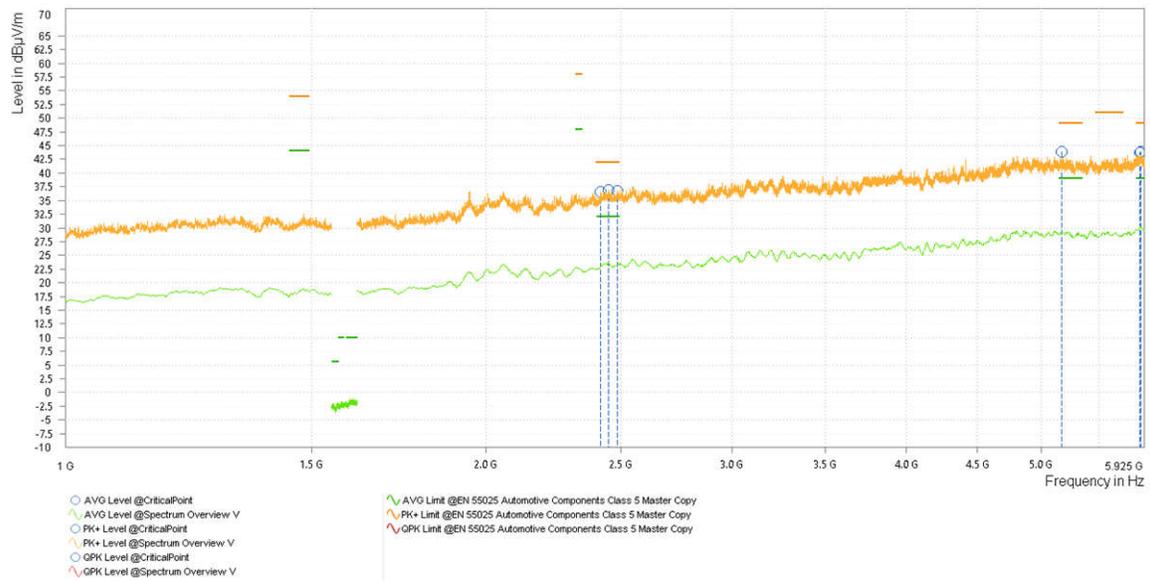


図 4-42. RE 環境ノイズフロア (垂直アンテナ):1GHz~5.925GHz

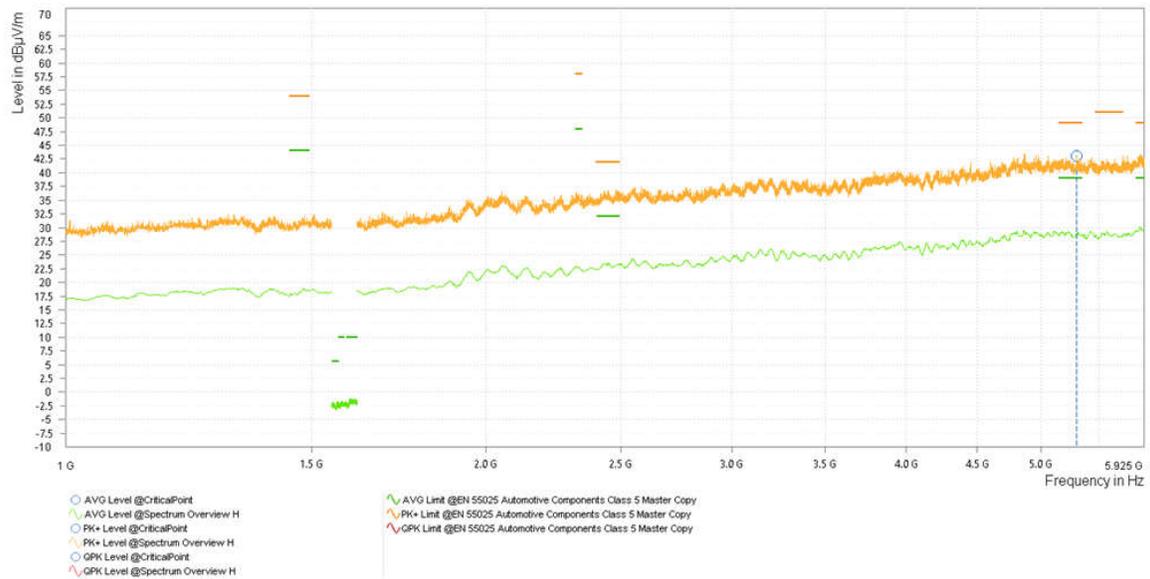


図 4-43. RE 3A 負荷 (水平アンテナ):1GHz~5.925GHz

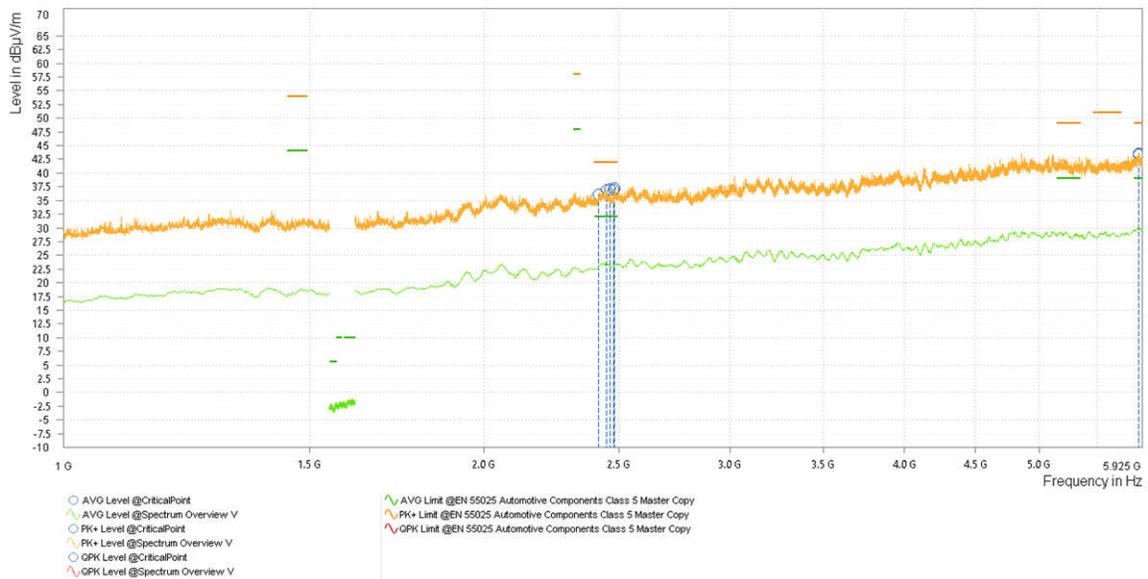


図 4-44. RE 3A 負荷 (垂直アンテナ): 1GHz~5.925GHz

4.4.8.3 結果のまとめ

TIDA-020065 はすべての CISPR-25 テストに合格しています。図 4-37 と 図 4-39 に複数の際どい点が見られます。これらは LM74704-Q1 のチャージポンプに起因しており、入力コンデンサ (C4) を 220nF に増やし、C4 と並列に 10nF のコンデンサを追加することで、これらのピークを改善できます。

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

5.1.3.1 レイアウト プリント

レイヤ プロットをダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.4 Altium プロジェクト

Altium プロジェクト ファイルをダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.5 ガーバー ファイル

ガーバー ファイルをダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.6 アセンブリの図面

アセンブリの図面ファイルをダウンロードするには、[TIDA-020065](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.2 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、[『TPS1213-Q1 45V、低 I_Q 車載用ハイサイド スイッチ コントローラ、低消費電力モードおよび可変負荷ウェークアップトリガ付き』データシート](#)
2. テキサス・インスツルメンツ、[『INA296x-Q1 AEC-Q100、-5V~110V、双方向、1.1MHz、8V/μs、超高精度電流センス アンプ』データシート](#)

5.3 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ [E2E™ サポート・フォーラム](#)は、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

5.4 商標

E2E™ and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 著者について

DAVID MARTINEZ は、テキサス・インスツルメンツのシステム エンジニアです。車載システム エンジニアリング チームのメンバーとして、David はパワー ディストリビューション ボックスを専門とし、自動車メーカーのお客様の最終機器のブロック図とリファレンス デザインの作成を支援しています。David はテキサス州カレッジ ステーションのテキサス A&M 大学で電気工学の学士号を取得しました。

ROBERT SMITH は、車載フィールド アプリケーション チームのメンバーとして、HEV および EV システムを主に担当しています。Robert は、オレゴン州立大学で電気およびコンピュータ工学の学士号を取得しました。Robert は、大電力分配から RF 回路、検出回路まで、あらゆる種類のアナログ回路に精通しています。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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に該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated

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に該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

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](#)、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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated