

# 車載用ゾーン ベース パワー ディストリビューション システムにおけるオフボード容量性 性負荷の駆動

**Dilip Jain**  
Systems Manager  
Power Switches

**Rakesh Panguloori**  
Applications Manager  
Power Switches

## はじめに

自動車アーキテクチャのドメイン ベースからゾーン ベースへの移行は、車載用パワー ディストリビューションを大きく変化させつつあり、半導体スイッチ ベース ソリューション (図 1 を参照) は、ワイヤ ハーネスの保護に使用されている従来型溶融ヒューズを置き換えようとしています。これらのソリューション

は、ヒューズ時間電流のばらつきが少ないなどの利点があるため、ワイヤ ハーネスのケーブルの直径、重量、コストを低減できる可能性があります。半導体スイッチは間接的にリセットすることもできます。これは、ヒューズに簡単にアクセスできるようにする必要がないことを意味しており、設計者は、電源から負荷までのケーブル長が短くなるような位置にヒューズを配置できます。

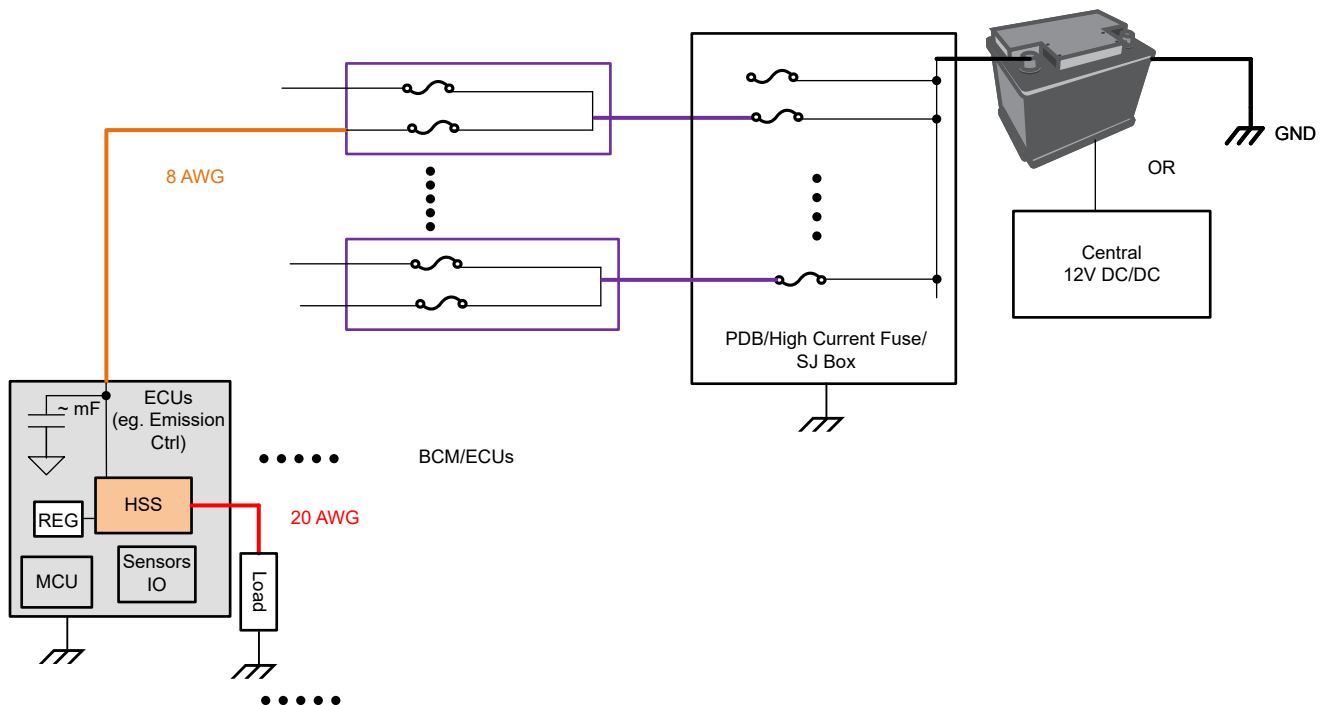


図 1. ドメイン ベースのパワー ディストリビューション アーキテクチャ。

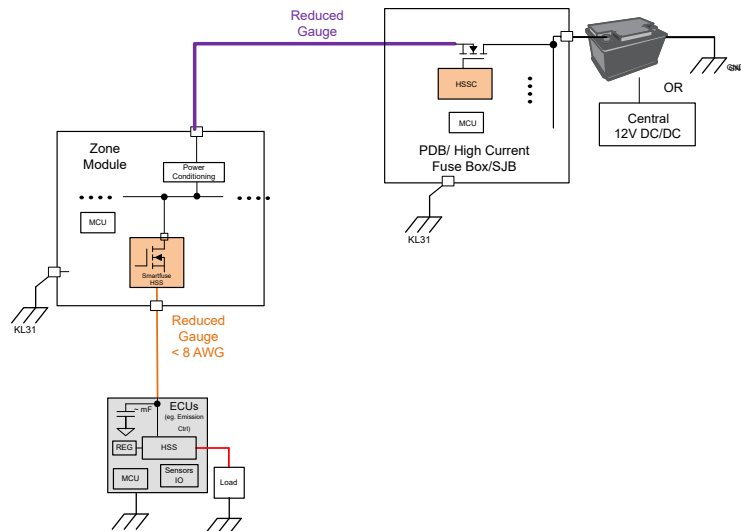


図2. ゾーンベースのパワー ディストリビューション アーキテクチャ。

半導体スイッチをスマートヒューズ デバイスとして使用する場合はシステム設計上の課題には、スイッチがオン状態のときの静止電流の低減と、負荷 (電子制御ユニット [ECU] 入力) で典型的に見られる大きな容量性負荷を駆動する出力のターンオンが含まれます。各パワー ディストリビューション ボックス (PDB) 出力に接続されている ECU のタイプと数に応じて、ECU は  $47\mu\text{F}\sim 5\text{mF}$  の入力容量を持っているため、ECU の起動時間 (高速充電時間 1ms 未満、中速充電時間 10ms 未満、低速充電時間 50ms 未満) には注意を払う必要があります。これらの ECU 入力容量を、ECU の起動時間内に MOSFET (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) スイッチを通して充電することは、ゾーン ベース アーキテクチャにおける主要なシステム設計課題の 1 つです。

この記事では、ハイサイド スイッチ コントローラを使って容量性負荷を駆動する際の課題に対応するための各種手法について説明します。

### 出力電圧スルーレート制御機能

この方法では、ゲートと GND との間にコンデンサ (C) を配置することで、ゲートおよび出力電圧のスルーレートによって突入電流を制限しています。図 3 に、出力電圧スルーレート制御機能を備えた回路構成を示します。

式 1 と式 2 に、起動時の突入電流と消費電力の計算式を示します。

$$I_{\text{INR}} = C_{\text{OUT}} \times \frac{dV_{\text{OUT}}}{dt} \quad (1)$$

$$P_{\text{D}}(V_{\text{out}} = 0) = V_{\text{IN}} \times I_{\text{INR}} \quad (2)$$

MOSFET は飽和領域で動作しているため、起動時に消費電力が安全動作領域 (SOA) 内に維持されるように、突入電流を十分小さくする必要があります。MOSFET の消費電力を低減し、より長い期間にわたって放散させると、MOSFET はより多くのエネルギー ( $1/2 C_{\text{OUT}} V_{\text{IN}}^2$ ) を扱うことができます。したがって、より高い容量性負荷に対応するには、突入電流の間隔をより長くする必要があります。

この方法は低速充電要件 (たとえば、5mF および 50ms) に適していますが、設計には常に  $C_{\text{OUT}}$ 、FET の SOA、充電時間、動作温度の間のトレードオフを含める必要があります。たとえば、テキサス・インスツルメンツのハイサイド スイッチング コントローラ **TPS1211-Q1** をゲートドライバとして使用して、5mF を 12V に充電する場合、1.5A の突入電流制限で、40ms を要します。参照セクションの [11] では、この方法を使って、起動時の FET SOA をチェックする手順を繰り返しています。一方、参照セクションの [22] には、特定の MOSFET の SOA マージンを推定するためのオンライン ツールについて記載しています。

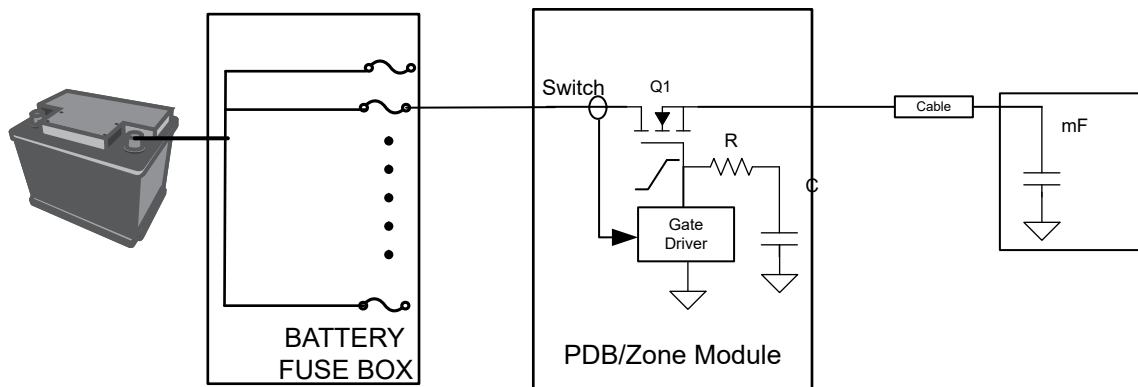


図3. 出力電圧スルーレート制御回路。

### 並列プリチャージ経路

この方法は通常、プリチャージ FET を駆動するために追加のゲートドライバを必要とする大電流並列 FET に基づく設計で使用されます (図 4 を参照)。式 3 を使って、以下のようにプリチャージ経路のプリチャージ抵抗 ( $R_{pre-ch}$ ) として特定の値を選択することで、突入電流を制限できます。

$$R_{pre-ch} = \frac{V_{IN}}{I_{INR}} \quad (3)$$

プリチャージ抵抗は、起動中のすべての電力ストレスに対処するため、消費電力の平均値とピーク値 (式 4 と式 5) の両方に耐える必要があります。

$$P_{avg} = \frac{E_{pre-ch}}{T_{pre-ch}} = \frac{0.5 \times C_{OUT} \times V_{IN}^2}{5 \times R_{pre-ch} \times C_{OUT}} \quad (4)$$

$$P_{peak} = \frac{V_{IN}^2}{R_{pre-ch}} \quad (5)$$

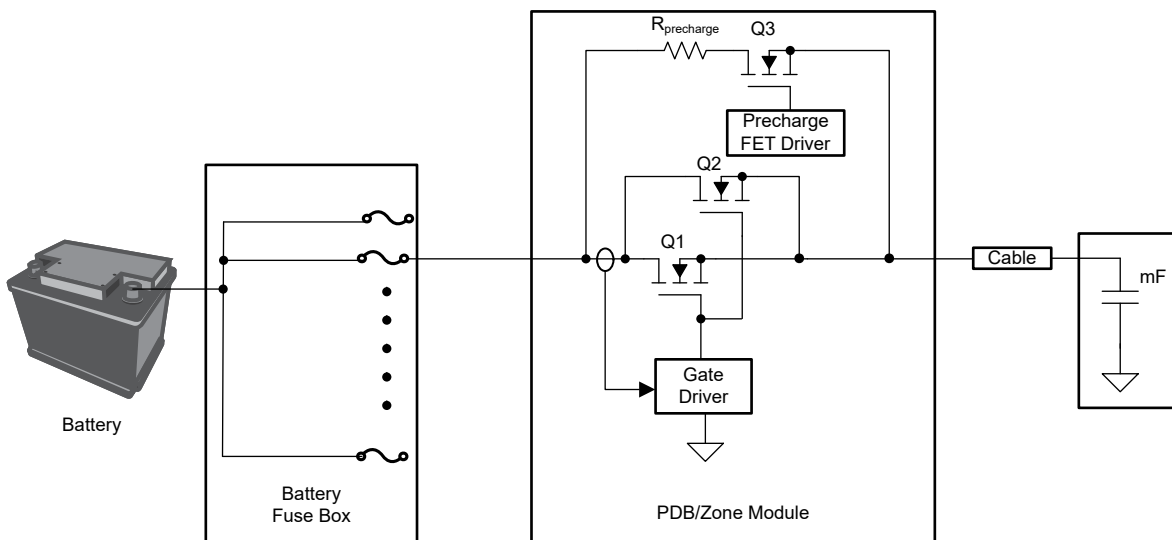


図4. プリチャージ抵抗と FET を並列経路に配置した回路。

この場合、出力を素早く充電できますが、その代償として寸法が非常に大きいプリチャージ抵抗が必要です。たとえば、5mF を 10ms で 12V に充電する場合、定格電力 36W、ピーク電力 360W に耐える 0.4Ω プリチャージ抵抗が必要となり、結果的に大型の巻線抵抗が必要になります。したがって、多くの種類の最終製品では、この方法は実行できません。同じ PCB 上に多くのチャンネルが存在するためです。この方法は、各チャンネルに大型の抵抗が必要なため、スペース効率が劣ります。

## PWM に基づく、容量の自動充電

図 5 に示すように、PCB のハイサイドドライバ出力は 1m~数 m の長いケーブルを介してリモート ECU に接続されています。たとえば、50A ワイヤ (8AWG) ハーネスは、2mΩ/m、1.5μH/m の特性を持っています。D1 ダイオードは、ケーブル

ハーネスの誘導電流のためのフリーホイール経路を形成するシステム設計の一部です。ハイサイドドライバは、短い (1μs 未満) ターンオンおよびターンオフ時間で並列 FET を駆動できる強力なゲート駆動出力を備えており、過電流および短絡保護機能も備えています。ケーブルの寄生素子、D1 ダイオード、ハイサイド MOSFET は、代表的な降圧レギュレータ構成を形成しています。

起動中、充電されていない出力コンデンサには突入電流が流れ込み、その突入電流が短絡保護スレッショルド ( $I_{SCP}$ ) に達すると、短絡イベントがトリガされます。ハイサイドドライバは電力経路をターンオフし、リトライ期間 ( $T_{AUTO-RETRY}$ ) 後にターンオンを再開します。このプロセスは、出力容量が完全に充電されるまで続き (図 6 を参照)、その後ハイサイドドライバは通常動作に移行して、負荷を駆動します。

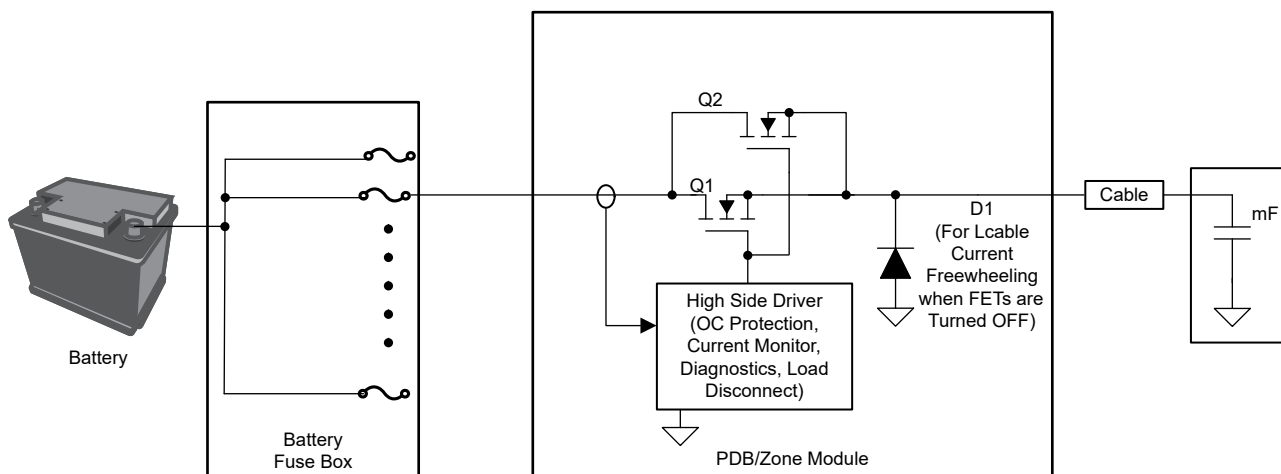


図 5. ハイサイドドライバを使用したパルス幅変調 (PWM) 充電の回路図。

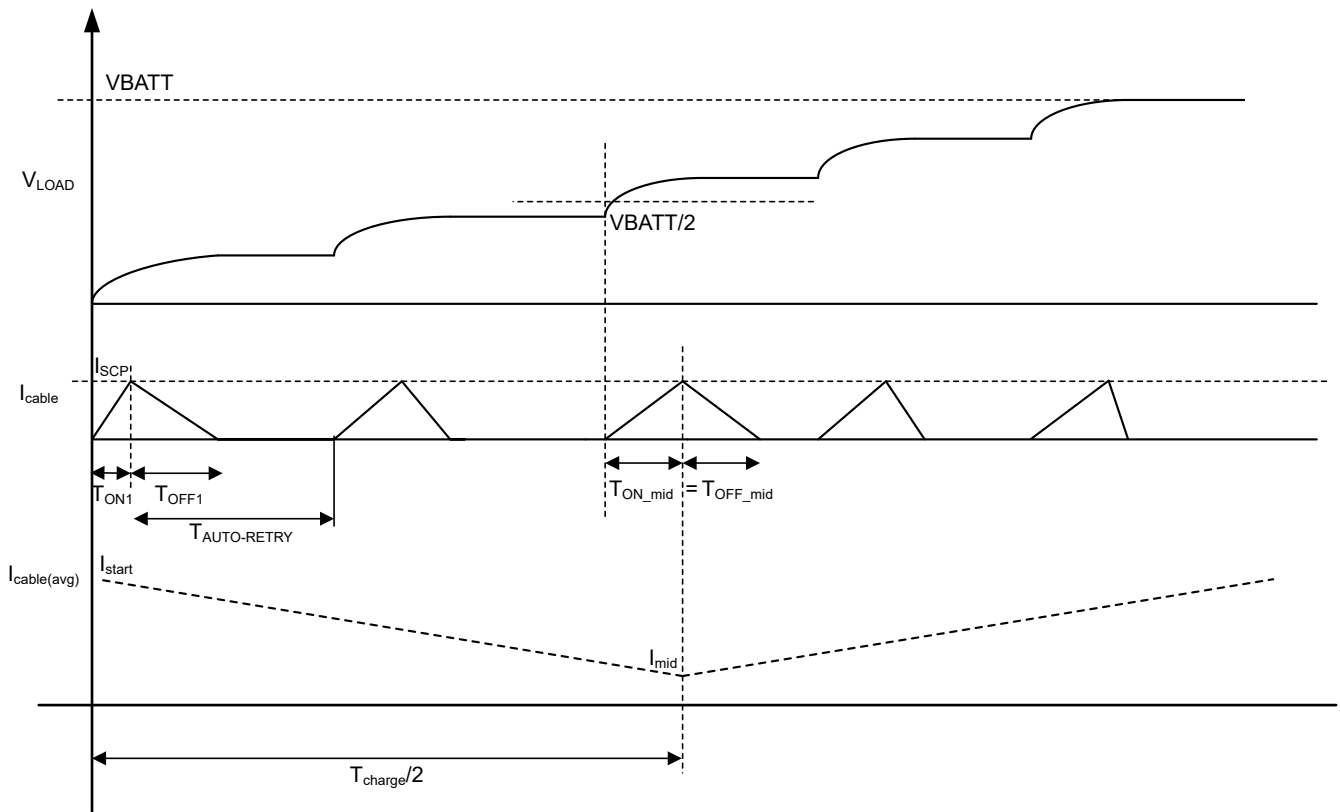


図 6. 起動時の PWM 充電方式の波形の概略図。

図 7 に、制御動作を示します。図に示すように、この方法には 2 つの変数 ( $I_{SCP}$  と  $T_{AUTO-RETRY}$ ) があり、入力電圧 ( $V_{IN}$ )、負荷容量、必要な充電時間に基づいて、ハイサイドドライバ用に設定する必要があります。より大きい  $I_{SCP}$  スレッショルドまたはより短い  $T_{AUTO-RETRY}$  遅延は、より速い出力充電を可能にし、このソリューションを、どのような負荷容量値に対しても使えるものにします。

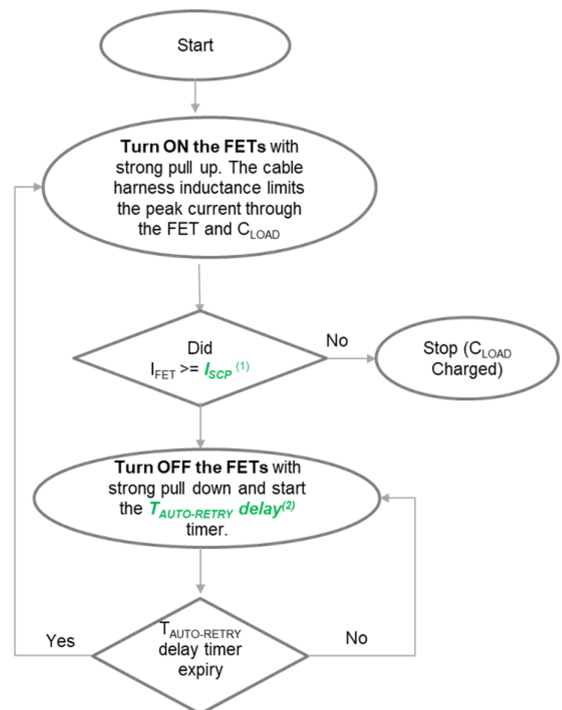


図 7. PWM 充電制御方式のフローチャート。

このソリューションは、一般的なハイサイドドライバシステムで利用可能な既存の素子（ケーブルハーネスのインダクタンスと D1 ダイオード）を利用し、ハイサイド MOSFET をスイッチングモードで動作させることで、高効率の充電方法を実現しています。従来の方法とは異なり、提案ソリューションはもはや FET の SOA に依存せず、大型のプリチャージ抵抗もプリチャージ FET およびドライバも必要としません。本ソリューションは、ハイサイドドライバの固有の短絡保護機能を利用して、いかなる外部制御信号も複雑なアルゴリズムも使わずに自律的に動作します。

### 設計上の考慮事項とテスト結果

50A 負荷を想定した次のシステム設計例を考えます。

- バッテリ電圧 ( $V_{BATT}$ ) = 12V。
- 負荷容量 ( $C_{LOAD}$ ) = 5mF。
- 1.5m のケーブル = 8AWG でハイサイドドライバを ECU に接続 ( $L_{cable} = 2.25\mu\text{H}$ )。
- 充電時間 ( $T_{charge}$ ) = 10ms
- フリーホイール ダイオード電圧降下 ( $V_{D1}$ ) = 0.7V。

この設計では、 $I_{SCP}$  および  $T_{AUTO-RETRY}$  パラメータを選択する必要があります。50A 負荷設計の場合、 $I_{SCP}$  スレッシュホールドは通常、最大負荷電流よりも 20% 大きい値に設定されるため、この例では  $50\text{A} \times 1.2 = 60\text{A}$  とします。

ここで、 $T_{AUTO-RETRY}$  を計算するには、**図 6** を参照し、中点 ( $T_{charge}/2$ ) でのコンデンサの電流と電圧の関係を使って、次の**式 6**を求めます。

$$\frac{(I_{start} + I_{mid})}{3} \times \frac{T_{charge}}{2} = C_{LOAD} \times \frac{V_{BATT}}{2} \quad (6)$$

ここで

$$I_{start} = \frac{I_{SCP} \times (T_{ON1} + T_{OFF1})}{2 \times (T_{ON1} + T_{AUTO-RETRY})} \quad (7)$$

および

$$I_{mid} = \frac{I_{SCP} \times 2 \times T_{ON\_mid}}{2 \times (T_{ON\_mid} + T_{AUTO-RETRY})} \quad (8)$$

時間間隔  $T_{ON1}$ 、 $T_{OFF1}$ 、 $T_{ON\_mid}$  は、**式 9**～**式 11** を使って次のように計算できます。

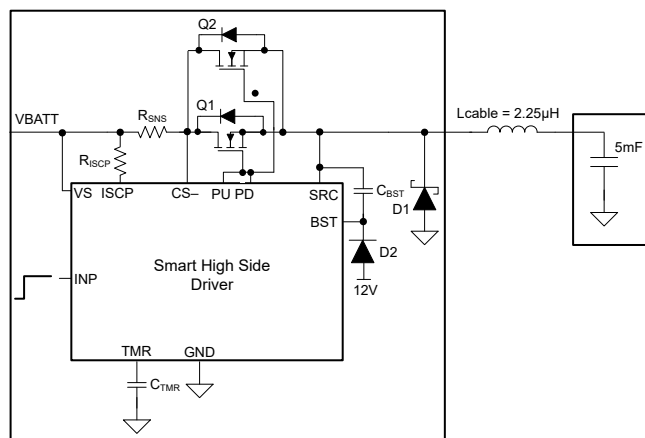
$$T_{ON1} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{V_{BATT}} \quad (9)$$

$$T_{OFF1} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{V_{D1}} \quad (10)$$

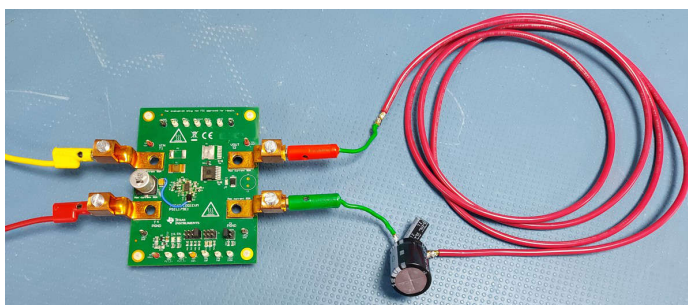
$$T_{ON\_mid} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{\left(\frac{V_{BATT}}{2}\right)} \quad (11)$$

既知のパラメータ  $V_{BATT}$ 、 $L_{cable}$ 、 $I_{SCP}$ 、 $V_{D1}$ 、 $C_{LOAD}$  を代入し、 $T_{AUTO-RETRY}$  について解くと、10ms の充電時間を達成するためのリトライ遅延 (200 $\mu\text{s}$  未満) が求められます。

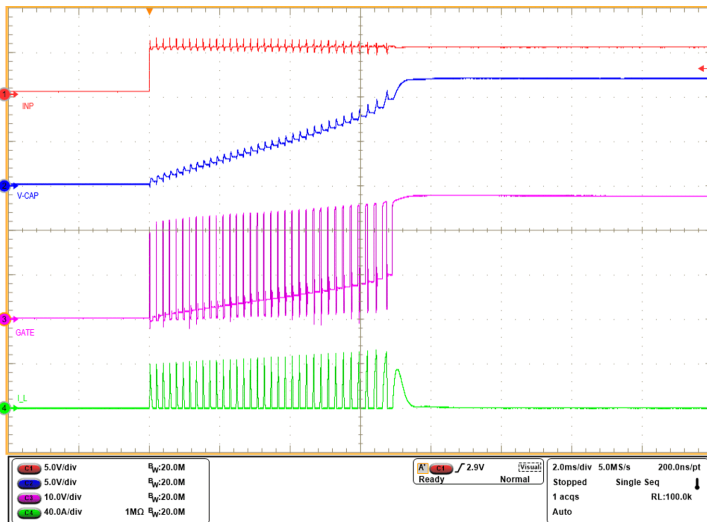
**図 8** と **図 9** に、TPS1211-Q1 ハイサイドドライバを使って 5mF の負荷容量を充電するためのアプリケーション回路図とテスト構成を示します。 $T_{AUTO-RETRY}$  は 180 $\mu\text{s}$  であるため、充電時間は 7ms となります (**図 10** を参照)。



**図 8.** 容量性負荷を駆動するための代表的なアプリケーション回路図。



**図 9.** TPS1211-Q1 評価基板と 1.5m ケーブルハーネスを使用したテスト構成。



## 関連ウェブサイト

- [TPS1211-Q1](#)
- [TPS1200-Q1](#)

図 10. TPS1211-Q1 をスイッチング モードで使用し、5mF の負荷容量で起動。

## まとめ

半導体を使ったスマートヒューズソリューションは、ヒューズの時間電流特性とソフトウェアによるリセット可能性が大幅に優れていることから、車載用パワー ディストリビューションにおいて従来型溶融ヒューズを凌駕して普及が進みつつあります。ケーブルがより細くかつ短いため、これらの利点はケーブルハーネスの総重量の低減を可能にします。

半導体を使ったスマートヒューズソリューションによるシステム設計上の課題の 1 つは、容量性負荷の充電がシステムの起動時間要件を満たせるかどうかです。テキサス・インスツルメンツのハイサイドスイッチコントローラ デバイスは、容量性負荷駆動の課題を解決するためのさまざまな手法を提供します。

## 参考資料

1. Rogachev, Artem、2014 年、『[堅牢なホットスワップ設計](#)』、テキサス・インスツルメンツ アプリケーション レポート、文献番号 SLVA673A、2014 年 4 月
2. [dv/dt に基づく起動のための FET SOA マージン カリキュレータ](#)

**重要なお知らせ:**ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。



## 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