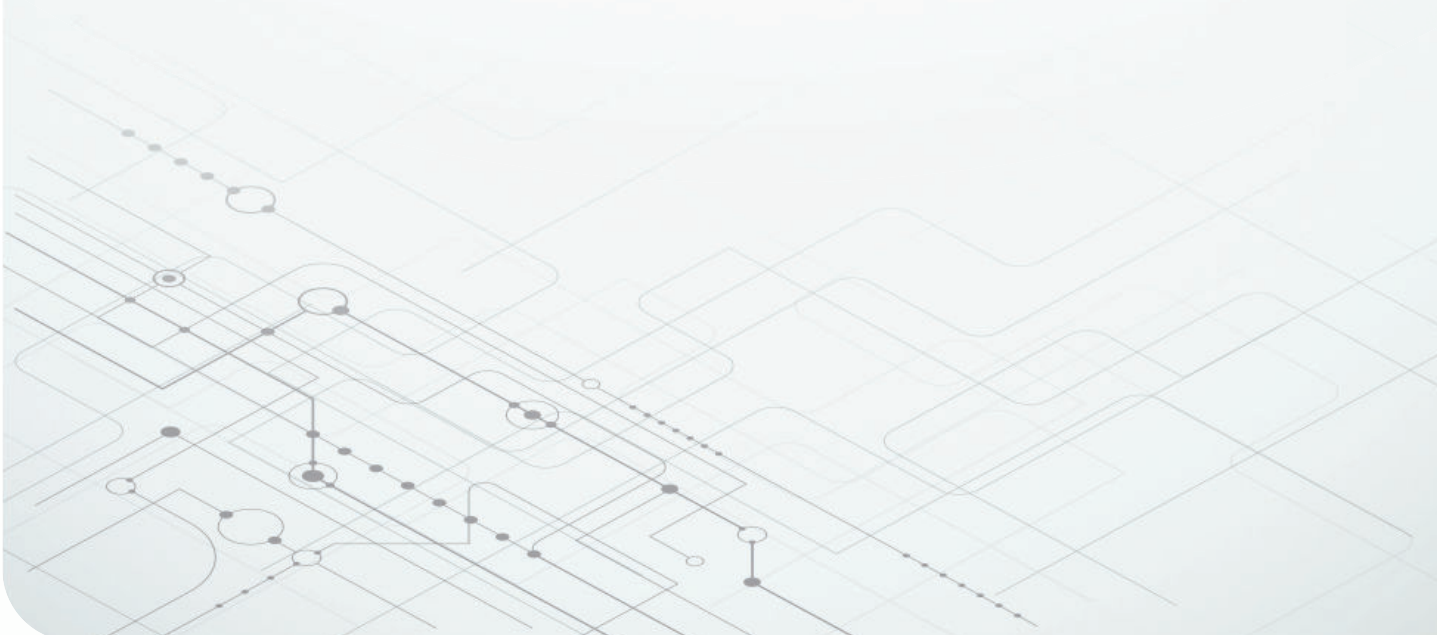


よりスマートなパワーディストリビューション: 車載技術の将来像



David Martinez
Systems engineer



このホワイトペーパーでは、ゾーンアーキテクチャ、48V システムといったトレンドの台頭が、自動車内のパワーディストリビューションのよりいっそうのスマート化、安全性向上、最適化をどのようにして実現したか解説します。

概要



1

パワーディストリビューションが変化する理由

電源の変更、ゾーンアーキテクチャ、48V 低電圧レール、さらに安全要件が、車載パワーディストリビューションにどのような変化をもたらしているか把握します。



2

パワーディストリビューションアーキテクチャの進化

車載アーキテクチャの変化が、配線の最適化やソフトウェア制御の強化に対するニーズに拍車をかけている理由について解説します。



3

パワーディストリビューションモジュールの内部構造

パワーディストリビューションモジュールの設計アプローチのほか、設計に関するさまざまな注意事項、検討事項について学びます。

はじめに

自動車のパワーディストリビューションアーキテクチャと電子制御ユニット(ECU)は、インテリジェント半導体ソリューションの追加を通じて、安全で信頼性の高い電力を効率的に配電するために進化を続けています。自動車が自動運転と電動パワートレインへの移行を進めている現状で、故障状態が発生した場合でも安全かつ信頼性の高いパワーディストリビューションを保証するために新しい規制が導入されています。

このホワイトペーパーでは、政府の規制、ゾーンアーキテクチャ、48V のシステム、安全を重視した電源設計が、パワーディストリビューションアーキテクチャの変化にどのような影響を及ぼすか、またこうしたアーキテクチャが現在直面している課題と検討すべき事項について解説します。

パワーディストリビューションが変化する理由

新しい規制により、(特に欧州連合において)鉛酸バッテリー搭載車両の販売がより困難になっており、自動車 OEM メーカー(OEM)は従来の鉛酸バッテリーからの脱却を進めています。鉛酸蓄電池はリチウムイオン電池に比べて安価で製造しやすいものですが、寿命が短く、環境に悪影響を及ぼします。こうした各国政府の規制と電気自動車の普及により、図 1 に示すとおり、リチウムイオンバッテリー、DC/DC コンバータ、スーパーキャパシタなど、さまざまな入力電力源採用をするようになっています。

Input source combinations

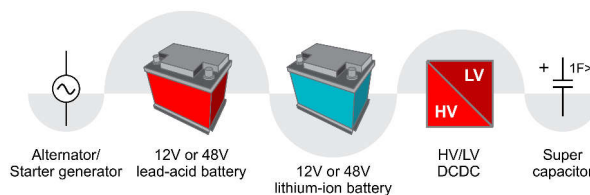


図 1. 車両用各種電源の比較

リチウムベースのバッテリー、スーパーキャパシタ、またはその両方に移行する場合、過充電状態を防止するための追加回路が必要になります。これらの電源に充電する回路には、専用の高電圧/低電圧 DC/DC 電源充電回路が必要です。また、インテリジェントなパワースイッチを使用して、充電電圧と充電電流の分配と監視を行います。バッテリー方式の電気自動車(BEV)とハイブリッドの電気自動車(HEV)の登場により、航続距離を最大化するため、車両の走行中や停車中にパワーディストリビューション回路を使用してバッテリーを再充電することが特に重要になっています。

スーパーキャパシタは、車載用の入力電源として興味深い追加要素です。長期的なエネルギー貯蔵にはあまり適していませんが、短期間では、鉛酸バッテリーに比べて、クランキングサイクル(エネルギーが大幅に低下する前に大量のバースト電力を供給できる回数)が多いため、バーストモード電源を必要

とするアプリケーションに優れています。したがって、スーパーキャパシタは、容量性突入電流やモーター起動のほか、クランキングなどの負荷過渡現象への対処で優位です。スーパーキャパシタを1個搭載したバッテリーを使用することで、設計者は自動車のバッテリーに加わるストレスの低減、バッテリー寿命の延長を実現することができます。

ゾーンアーキテクチャとスマート eFuse

OEM 各社は、車両をドメインアーキテクチャからゾーンアーキテクチャへ移行しようとしています。これは、図 2 に示すように、機能ではなく場所に基づいて電子制御をグループ化する概念です。ゾーンアーキテクチャは、車両内部の配線量を減らすことで、大幅なコスト削減を実現できます。

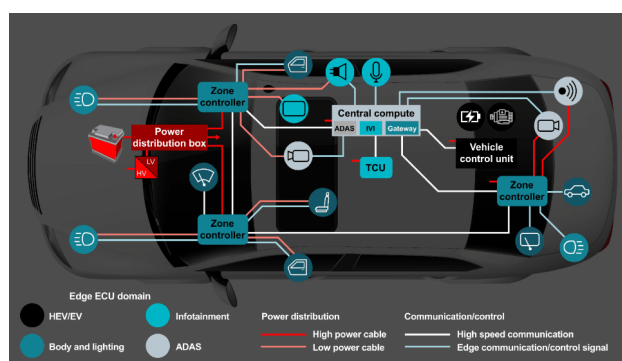


図 2. 最新車両のゾーンアーキテクチャ。

ゾーンアーキテクチャは、ヒューズボックスから電力をルーティングする代わりに、パワーディストリビューションボックス (PDB) とゾーン制御モジュール (ZCM) を通じて電力を分配します。PDB は、自動車の電源から、ZCM や他のハイパワー ECU に、高電流の一次電力分配を行います。その後、ZCM は近くにある ECU やセンサに 2 次的な電力供給を行います。この設計手法により、配線が最適化され、電子機器の消費電力のコントロールが強化されます。

また、ZCM と PDB では、溶断ヒューズと機械式リレーの機能を組み合わせたスマート eFuse と呼ばれる半導体ベースのスイッチを使用します。ソフトウェアによるリセットが可能なスイッチを追加することにより、ゾーンアーキテクチャではアクセス可能な PDB の必要性が効率的に排除されます。これは、ソフトウェアで各スイッチを個別に管理できるため、ワイヤハーネスの保護や故障からの回復に必要なアルゴリズムも含めて、アクセス可能な PDB が不要になるためです。

また、ゾーンアーキテクチャを採用すると、OEM 各社は車両の消費電力をより適切に管理できるようになり、これは、パワーディストリビューションシステムの制御能力の強化にも役立ちます。この場合、車両ソフトウェアが eFuse をオフにして各種の機能または未使用の機能の電源をオフにすることで、安全重視の機能に対して十分な動作電力を供給することになります。

特定の負荷に対する電力をオフにするというコンセプトは、eFuse の低消費電力機能を使用して常時電力供給 (PAAT) 負荷を駆動することで、総消費電力を最小限に抑えることにまで拡張されています。車両がキーオフ状態または駐車状態であっても、ドアラッチなどの PAAT 負荷には引き続き電力が供給されるため、安全上重要な機能は引き続き動作可能で、大きなバルク容量の充電状態が維持されます。PAAT 機能が動作すると、eFuse は低消費電力状態を終了し、負荷を完全に駆動して、ローカルのマイクロコントローラ (MCU) にアラートを送信します。その後、eFuse は一定時間アイドリングした後、低消費電力状態に戻ります。

48V 低電圧レール

コスト節減のもう 1 つの要因は、12V よりも高電圧の電源に移行することです。48V のパワーディストリビューションは車載分野では新しいコンセプトではありませんが、車両全体に分配される電力を増加させながら、車両の配線、重量、コストをさらに最適化することができます。特に、48V でのステアバイワイヤなどハイパワーの機能を実行するために必要な電流は、12V を使用する場合の負荷電流要件の約 25% に過ぎません。このため、低負荷の電流要件によって、車両内部の配線の寸法、重量、コストが低減され、二次電池式電気自動車 (BEV) の航続距離がさらに延長します。

自動運転車の実現に役立つ、より安全なパワーディストリビューション

パワーディストリビューションシステムが変化を続ける最終的な理由は、OEM が、他社の追従を許さない運転支援技術で強化された車載インテリジェンスを搭載することで車両の安全性を向上させようとしているからです。多くの OEM は、米国自動車技術者協会 (SAE) のレベル 2 を超える技術革新、あるいは現在存在する数少ないレベル 3 の車両を超える技術革新を競い合い、自動運転車の実現を目指しています。レベル 3 のパワーディストリビューションおよびそれ以降に必要なとされる安全原則では、冗長入力電源、1 つの電源に障害が発生した場合のインテリジェントな負荷管理、システム内の障害を分離するための干渉からの解放といった設計を実践的に行う必要があります。これらの安全原則は、ISO26262 と VDA450 の各規格で広範囲にわたって定義されています。

パワーディストリビューションアーキテクチャの進化

自動車内のパワーディストリビューションは、自動車のアーキテクチャ全体が変化しているため、進化を続けています。これは、配線の最適化とソフトウェア制御能力の強化に対するニーズが生じているからです。図 3 に示すように、パワーディストリビューションネットワークは車両の電源を PDB に供給し、PDB が各ゾーンに電力を分配しています。その後、電力は各ゾーンの付近にある ECU、アクチュエータ、センサにローカルに分配されます。

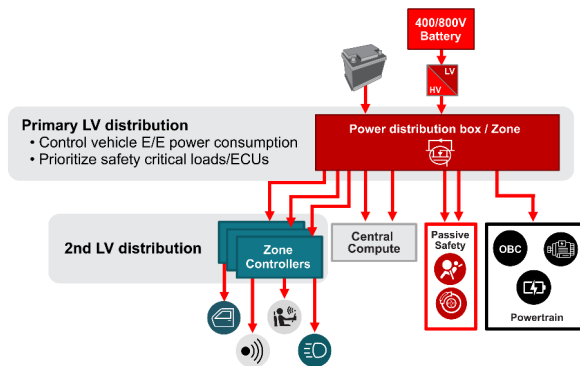


図 3. 最新のパワーディストリビューションアーキテクチャ。

図 4 に、各種のパワーディストリビューションアーキテクチャを示します。スマート eFuse や 48V システムの導入に伴い、OEM 各社は、ドライバが管理するアクセス可能なヒューズボックスを、自動車のソフトウェアが管理する電子式ヒューズボックスに置き換える形で、システムの強化を図っています。すべての負荷とアクチュエータが、これまでよりも高い電圧レベルへの移行に対応する準備ができていないわけではないため、48V のパワーディストリビューションへの移行には時間がかかります。その結果、第 1 世代の 48V システムには 12V の負荷が残っています。OEM 各社は、引き続き 48V のパワーディストリビューションを評価しており、パワーディストリビューションアーキテクチャは進化を続けているため、場合によっては (48V 電源が) 12V の電源に完全に置き換わることもあります。

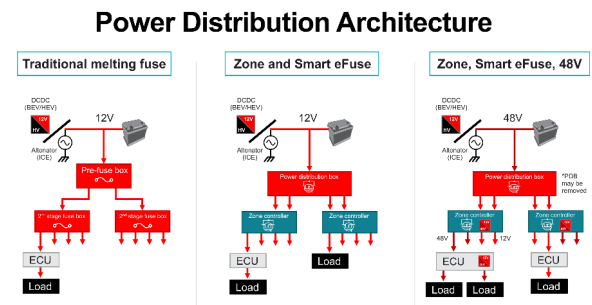


図 4. 今後のパワーディストリビューションアーキテクチャの比較。

48V システムは、ZCM が 1 次電源と 2 次電源の両方を分配するバックボーンアーキテクチャを使用できるので、さらなる進化が可能です。したがって、図 5 に示とおり、PDB をなくすることができます。48V アーキテクチャで負荷電流を低減することで、熱損失が低減されるため、ZCM ではより多くの電力分配入出力を実現できます。このトポロジを使用すれば、電力分配回路を大幅に簡素化できます。

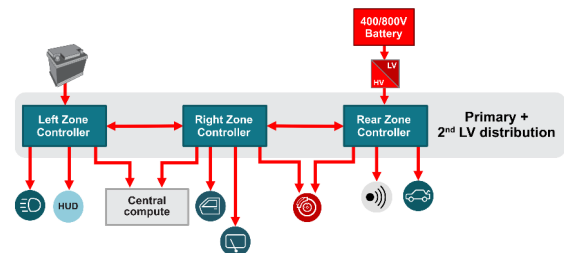


図 5. バックボーンのパワーディストリビューションアーキテクチャ。

パワーディストリビューションモジュールの内部構造

一般的な PDB と ZCM では、よりスマートな車両を実現するため複数の手法を採用しています。システムに PDB がない場合、その機能は ZCM に統合されている可能性があります。図 6 に、パワーディストリビューションのプライマリレベルの一般的な実装を示します。

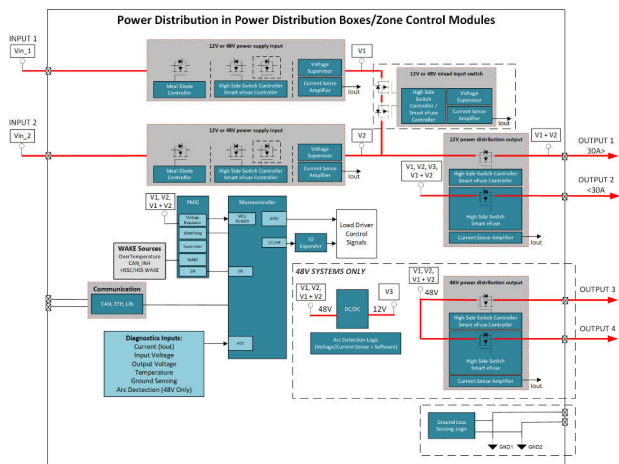


図 6. 一般的なパワー ディストリビューション モジュール

入力に関する注意事項

繰り返しになりますが、PDB または ZCM は、図 1 に示すように、5 種類の電源のいずれかを使用します。冗長入力を選択するには、システム内にどのような負荷過渡が存在するか、低消費電力モード（特に BEV の場合）または逆電流保護が必要か、双方向電流が許容されるか、システムにどのような安全性メカニズムが必要かといった課題について検討する必要があります。

スーパーキャパシタまたはバッテリーは突入電流に対処し、中断のない電力の確保が求められるので、負荷の過渡現象について考慮することが極めて重要です。一方、DC/DC コントローラやスマート eFuse スイッチには、こうした過渡突入電流からダウンストリームのコンポーネント部品を確実に保護できるように、電流制限機能のほか容量性負荷の充電機能が必要です。

低消費電力モード用に設計する際に注意が必要な入力電源は、低電圧バッテリーです。低電圧バッテリーは消費する電流がごくわずかなので、スーパーキャパシタとは異なり、電圧レベルは長期間にわたって安定しています。これに対し、ハイパワー

の DC/DC コンバータは無視できないほどの静止電流を消費します。それでも、低消費電力状態でシステムをサポートすることを目的として並列に低静止電流 DC/DC コンバータを使用すれば、高電圧バッテリーの消費電力を抑制することができます。車両のキープ状態に設計する場合、二次電池式電気自動車 (BEV) ではバッテリー充電も考慮します。DC/DC コンバータを 2 次入力電源として使用する場合、混入入力スイッチをオンにすると、キープ状態でバッテリーが充電され、図 7 に示す通り、ダウンストリームのスイッチがディセーブルになっているときでも VIN_2 から VIN_1 に電流が流れます。

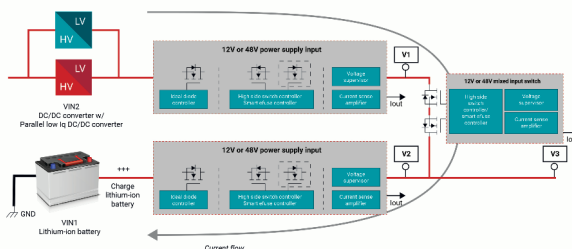


図 7. 混合入力スイッチを使用したリチウムイオン充電

理想ダイオードは、ホワイトペーパー「[理想ダイオードの基礎](#)」で説明しているように、逆電流ブロックや逆極性を必要とするアプリケーションに最適です。理想ダイオードは逆電流保護機能を備えているため、システムの冗長性を高めるために複数の電源を組み合わせる必要があるアプリケーションにも有用です。

一方、スマート eFuse やハイサイドスイッチは、一方向および双方向の電流アプリケーションに適しています。複数の電圧バスバーまたはドメインを使用して 1 つの ECU をサポートする場合、安全のために、バッテリーの充電に加えて、双方向の電流が求められます。このシステムで DC/DC コンバータまたはコントローラが故障した場合、車両のソフトウェアによって、たとえば図 3 または図 5 を使用して、バッテリーからの電力を左ゾーンからリヤゾーンの優先度の高い機能にルーティングされるように、車両のパワーディストリビューションを変更することができます。これらの追加機能をサポートする機能がバッテリー自体に悪影響を及ぼす可能性がある場合、車両のソフトウェアは電流検出アンプに流れる電源電流検知をすることにより、システム内のどの負荷をオフにするか判断し、優先順

位の高い機能に対する安定した電源電圧を維持できるようにします。

なお、安全メカニズムによって、パワーディストリビューションアーキテクチャが大きく変化する場合があります。混合入力スイッチを使用して V1 と V2 の両方の出力レールを組み合わせると、ECU 用に保護が追加された V1 + V2 出力が生成されます。また、スーパーキャパシタは MCU や外部 ECU などの重要なコンポーネントにも電力を供給できます。現在、スーパーキャパシタは、事故後に何らかの理由で電力が失われた場合にドアを開けるための電動ドアラッチなど、車両の重要な機能に使用されています。これらの例は、さまざまな安全機能を実装するための電源を選択するときに、設計者の創造性がいかに役立つかを示しています。

出力に関する検討事項

インテリジェントなパワーディストリビューション(配電)の目的で、溶断式ヒューズやリレーをスマート eFuse に置き換える必要性が高まっています。適切なスマート eFuse を選定するための検討事項として、プログラマブル配線保護(I2T)、容量性充電、低消費電力モード、制御用および設定用のピン数、電流と電圧のセンシング、安全性などの機能を挙げることができます。

動作電流、ピーク電流、負荷の種類、PAAT 要件、ASIL (Automotive Safety Integrity Level Rating: 車載セーフティインテグリティレベル)などの負荷プロファイル特性によって、選定したスイッチで必要とされる機能が決まります。非常に大きな動作電流に対応するには、負荷要件をサポートするために外部に電界効果トランジスタ(FET)を駆動するハイサイドスイッチコントローラを検討してください。非常に高い連続電流レベル、たとえば 30A 以上で駆動する場合には、外部 FET ソリューションを推奨します。これは、この電流レベルでは、統合 FET ソリューションの接合部温度が、統合 FET の $R_{ds(on)}$ 仕様に依拠して、維持できないレベルまで上昇するためです。

一方、ハイサイドスイッチとスマート eFuse は、性能とコストの両面で、より低い電流をサポートするのに優れています。PDB は一般に、ハイサイドスイッチの代わりにハイサイドスイッチコントローラで構成されています。これは、こうしたデバイスが、すべてのダウンストリームゾーンに必要な電力をサポートするために、最大数百アンペアを処理する必要があるか

らです。また、負荷プロファイルの特性は、スマート eFuse が過電流を検出したときに、ローカルマイコンを介さずに自動的にシャットオフするように、どのようなワイヤ特性をスマート eFuse にプログラムすべきかを示しています。図 8 に、eFuse のプログラマブルヒューズ特性の例を示します。

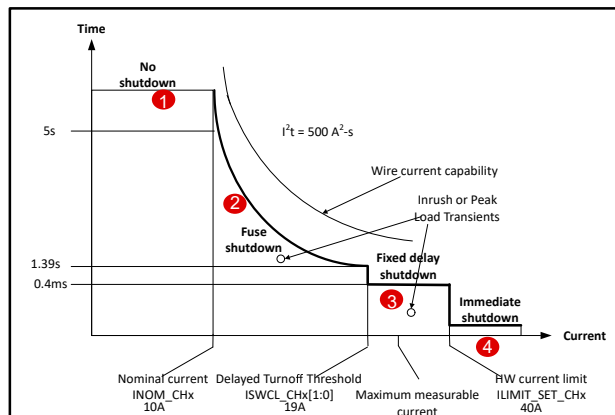


図 8. eFuse の各種プログラマブルヒューズ特性の例。

負荷電流とピーク電流の種類も、そのスマート eFuse 容量充電方式が使用できるかどうかの判断につながります。通常、スマート eFuse スイッチには、容量性突入電流に対処し、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の損傷を防止するために容量性突入電流技術が採用されています。一方、ブラシ付き DC モーターの起動時に流れる突入電流については、通常、スマート eFuse のドレイン-ソース間オン抵抗(RDS)の低減、あるいはパルス幅変調(PWM)や電流制限がない場合の外部 MOSFET が必要になります。

スマート eFuse の安全性メカニズムでは、特にこのリンプホームモード機能について検討することが重要です。リンプホームモードは、デバイスが、たとえば、ハイサイドスイッチが SPI コントローラ(通常はマイコン)との SPI 通信を失った場合などに起動するプログラム可能な安全機能です。リンプホーム(非常時の最小機能維持)機能を設計する場合、車両に必要な機能を維持するため、出力をオンのままにするかどうか、また回復方式をどのようにするかを検討することが重要です。これらは、スマート eFuse が故障の状態に入る前に、プログラムすることが可能です。

システムの注意事項

PDB の設計上注意の事項には、システム診断、部品表 (BOM)、入出力 (I/O)、スマート eFuse 故障回復が含まれます。

システム診断には、故障ステータスと各スイッチの電圧、電流、温度のようなパラメータに加え、接地損失などのシステムレベルのパラメータを含めることができます。電圧と電流のセンシングのため、精度要件が 1 %未満であることを考慮した電流検出アンプまたは電圧検出アンプを選定し、マイコン統合型 A/D コンバータ (ADC) を使用することができます。電流検出の精度要件が 1% ~ 5% の場合、スイッチに内蔵された検出機能を使用することで、システムの BOM を効率化することができます。内蔵の検出機能は、アクティブと低消費電力の両方のモードで電流または電圧の読み取りが必要なアプリケーションにも適しています。なお、これら 2 つモードの電流を正確に検出するには、少なくとも 2 つの電流検出アンプが必要です。最終的に、各スイッチのシステム診断機能を把握しておく、車載用のソフトウェアに多くの安全機能をインテリジェントに実装できます。

パワーディストリビューションモジュール用マイコンの汎用 I/O や他の周辺機器の数量を決定すると、マイコンとシステムのインタラクションを把握できるので、コストを大幅に削減できます。PDB、特に ZCM には、60 個を超えるハイサイドスイッチ、ハーフブリッジ、およびスマート eFuse 出力があります。これは、複数の負荷ドライバやスマート eFuse IC とのインターフェイスを確立するために、300 を超える I/O ピンと ADC MCU ピンが必要であることを意味しています。シリアルペリフェラルインターフェイス (SPI) ベースの eFuse と SPI/I2C I/O エクスパンダを使用すれば、マイコンのパッケージサイズとピン数の最適化が可能になります。図 9 により、各 IO ベースの eFuse について、4 つのピン (EN、診断有効化、WAKE、ISNS) が必要であり、I2T 特性はプログラムできないことがわかります。なお、SPI ベースの各 eFuse に必要なマイコンピンは 5 つだけで、追加デバイスごとにステップセレクトを 1 つだけ追加します。

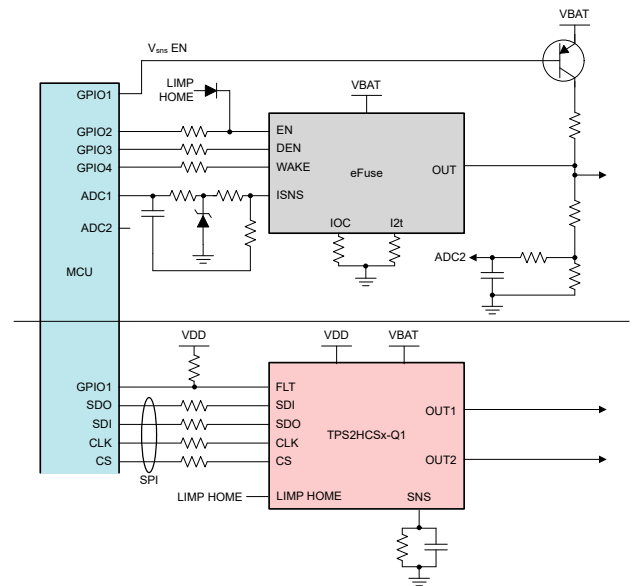


図 9. SPI ベースの eFuse を活用した IO 数の最適化。

各 eFuse の回復方法を決定する上で、ソフトウェアは必要不可欠です。溶断ヒューズは、過電流を検出すると入力と出力を溶かして遮断し、電流の流れを停止します。テキサスインスツルメンツのスマート eFuse には、単純に出力をオフにするだけで、設定された時間が経過すると出力が自動的にオンになるオプションが用意されています。また、ケーブルの熱モデルと配線抵抗を使用してワイヤ温度を推定し、出力をオンに戻しても安全かどうかを判定するために、より複雑な負荷回復アルゴリズムをローカルのマイコンや配電システムに実装することも可能です。このように、スイッチのリセット方法を自動化することで、最終的にアクセス可能な PDB の必要性が低下し、スイッチを負荷の近くに配置できるようになり、電源から ECU までのケーブル長が短縮されます。

48V に関する検討事項

48V アーキテクチャは 12V アーキテクチャによく似ていますが、いくつか別の課題があります。

第 1 に、48V では電圧アーク放が電問題となるため、電圧レベルの異なる 2 点間でのアーク放電を防止できるように、出力と部品は十分な沿面距離と空間距離を確保する必要があります。ソフトウェア、電圧、電流の各センシングを組み合わせることで、アーク放電の検出と、アーク放電の防止に必要なスイッチの迅速な遮断が行えます。また、機械学習アルゴリズムを開発することができれば、アーク放電の波形と車両内部の自然過渡現象を的確に区別し、誤検出を防止することも

可能です。**図 10** に、48V アーキテクチャにおけるアーク放電で最も頻度の高い原因を示します。

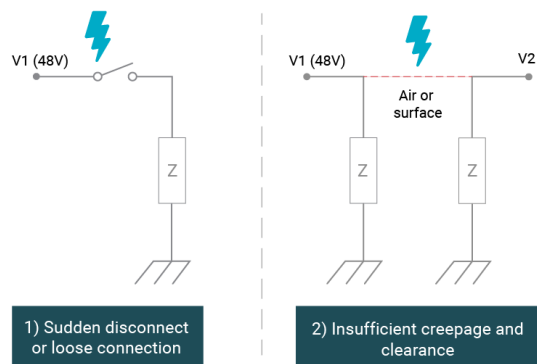


図 10. 48V アーキテクチャにおけるアーク放電で最も頻度の高い原因

なお、48V から 12V に変換する DC/DC コンバータは、すべてのアクチュエータおよび半導体が 48V 動作に移行していないことから、引き続き第 1 世代の 48V アーキテクチャが必要です。48V から 12V への変換を行う場合、必要な電力、基板サイズ、コスト、効率に応じて、さまざまなトポロジを検討する必要があります。標準的なアプローチとしては、従来型の降圧コンバータまたはコントローラのほか、スイッチト キャパシタ コンバータ (SCC) やスイッチト タンク コンバータ (STC) などの高度なトポロジが挙げられます。

参考資料

1. ゾーン アーキテクチャの詳細については、『**ゾーン アーキテクチャによって実現する完全なソフトウェア定義の自動車**』をご覧ください。
2. ゾーンアーキテクチャに加わった利点と、それがソフトウェア定義自動車に及ぼす影響については、『**ソフトウェア定義自動車は今後車載エレクトロニクスによるギアコンポーネントへと移行する**』をご覧ください。
3. 48V アーキテクチャの詳細、その設計上の課題、および 48V アーキテクチャが再登場した理由については、『**48V 車載システム**』をご覧ください: **なぜ今なのか？**

4. スマート eFuse システムの利点とその注意事項に関して理解を深めるには、『**Fully Software Configurable High Side Switch for Power Distribution Applications in Zone Controllers**』をご覧ください。
5. スマート eFuse を使用して I/O 要件を緩和する方法については、『**Reducing System Bill of Materials and MCU Pin Requirements With SPI eFuse Switches. (SPI eFuse スイッチを使用したシステム部品点数とマイコンピン要件の低減)**』をご覧ください。

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

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated